

数字技术在雷达中的应用

西北电讯工程学院

戴树荪 等 编

国防工业出版社

数字技术在雷达中的应用

西北电讯工程学院

戴树荪 等编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书内容包括有雷达数据的数字化、用数字技术处理雷达信号和检测雷达目标、雷达数据的数字化处理和显示。书中以介绍实现方法为主，辅以必要的理论阐述和分析。书末附有所需要的数学基础知识。由于数字技术在雷达中的应用极为广泛和灵活多样，因而在编写时力求选择主要的、常用的和有代表性的方法予以介绍。

本书除作为雷达专业高年级学生的加选课教材之外，还可供从事雷达研制工作的工程技术人员参考。

数字技术在雷达中的应用

西北电讯工程学院

戴树荪 等编

*

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

*

787×1092¹/₁₆ 印张16¹/₈ 375千字

1981年2月第一版 1981年2月第一次印刷 印数：0,001—3,800册

统一书号：15034·2146 定价：1.70元

前 言

本书系高等学校工科电子类雷达专业统编教材之一，是雷达专业高年级学的加选课教材，教学时数为40~60学时。

本教材的第一章概要介绍课程内容、重点及注意事项；第二章介绍雷达的距离和角度数据数字化的方法；第三章讨论雷达信号的数字化检测方法和恒虚警处理、动目标显示与脉冲压缩等处理技术；第四章研究雷达数据的数字化过滤和外推；第五章介绍雷达数据的数字化显示。书末附有Z变换、离散傅氏变换和快速傅氏变换简介，以及各章的主要参考书与思考练习题。

“数字技术在雷达中的应用”课程宜在“脉冲与数字电路”、“统计无线电技术”、“雷达系统”、“系统与控制”等课程之后开设，课时无法安排时，也可部分地与上述后两门课程的部分课题并行讲授。

由于数字技术和器件的发展迅速和多变，新技术、新成果不断涌现，因此在教学中应随时注意将成熟的和典型的新技术吸收进来，同时删除陈旧的内容。

书末所列思考练习题仅供参考。

本教材的主审单位是成都电讯工程学院，由黄振兴、张元莉等同志负责审查。主编单位是西北电讯工程学院，由戴树荪同志负责总编和编写第一章，余雄南同志负责编写第二章，保铮同志负责编写第三章，张以杰、赵树芎同志负责编写第四章，郭学仁同志负责编写第五章。附录由余雄南同志负责编写。

由于编者学识水平不高，缺乏“数字技术在雷达中的应用”的教学和工作实践经验，加之时间仓促，因此在内容的选择及叙述等方面会有不少的缺点和错误，恳切希望读者予以批评指正。

编者

目 录

第一章 绪论	1
第二章 雷达数据的数字化	3
§ 2.1 概述	3
§ 2.2 距离数据的数字化	3
2.2.1 距离编码器	3
2.2.2 距离编码误差的分析	4
2.2.3 减少量化误差的其它方法	6
2.2.4 目标回波到达时刻的确定	9
2.2.5 有距离模糊情况下距离数据的录取	10
§ 2.3 角度数据的数字化	13
2.3.1 角度编码器	14
2.3.2 用角度传感器的编码器	19
2.3.3 目标角度位置数据的录取	29
2.3.4 叠交多波瓣法测角时目标角度数据的录取	30
§ 2.4 高度数据的数字化	32
第三章 雷达信号的数字式检测和处理	33
§ 3.1 概述	33
§ 3.2 雷达信号数字化处理的几个基本问题	33
3.2.1 雷达信号的模/数转换	34
3.2.2 数字滤波的实现	40
§ 3.3 雷达信号的数字式检测	48
3.3.1 相参脉冲串和非相参脉冲串的最佳检测	49
3.3.2 二进制检测原理	58
3.3.3 几种实用的二进制检测器	60
3.3.4 双极点滤波器	68
3.3.5 非瑞利杂波背景中信号的检测	71
§ 3.4 雷达信号的恒虚警率处理	73
3.4.1 噪声电平恒定电路	74
3.4.2 邻近单元平均恒虚警率电路	76
3.4.3 地物杂波的恒虚警率处理	83
3.4.4 非瑞利杂波的恒虚警率处理	85
3.4.5 非参量型恒虚警率检测电路	89
3.4.6 高性能恒虚警率电路举例	92
§ 3.5 数字式动目标显示	93
3.5.1 数字式相消器	95
3.5.2 改善因子和诸因素的关系	100
3.5.3 盲速和盲相的消除	102
3.5.4 盲速的消除和重复周期参差跳变	105
3.5.5 线性动目标显示和动目标检测	110
3.5.6 自适应动目标显示系统	114
§ 3.6 数字式脉冲压缩	118
3.6.1 线性调频信号的数字式脉冲压缩	118

3.6.2 相位编码信号的数字式脉冲压缩	122
第四章 雷达数据的数字化处理	125
§ 4.1 概述	125
§ 4.2 线性滤波器	126
4.2.1 维纳滤波器	126
4.2.2 α - β 滤波器	129
4.2.3 卡尔曼滤波器	135
§ 4.3 α - β 滤波器在数字式自动距离跟踪系统中的应用	143
4.3.1 基本工作原理	143
4.3.2 性能分析	146
§ 4.4 数字技术在雷达自动方向跟踪系统中的应用	148
4.4.1 卡尔曼滤波技术在边扫描边跟踪雷达中的应用	148
4.4.2 数字技术在指向跟踪系统中的应用	153
§ 4.5 雷达目标航迹的处理	162
4.5.1 外推计算	163
4.5.2 航迹-点迹相关	164
第五章 雷达数据的数字化显示	171
§ 5.1 概述	171
§ 5.2 数字式显示器的类型	171
§ 5.3 在示波管上显示字符	173
5.3.1 对字符显示的主要要求	173
5.3.2 在示波管上显示字符的方法	173
5.3.3 字符产生器	176
5.3.4 偏转控制法与辉亮控制法的比较	184
§ 5.4 图形产生器	185
5.4.1 数字式矢量产生电路的基本工作原理	185
5.4.2 速率乘法矢量产生电路	186
5.4.3 移位寄存法矢量产生电路	191
5.4.4 累加法矢量产生电路	192
5.4.5 矢量的平滑	195
5.4.6 数字与模拟相结合的矢量产生电路	197
§ 5.5 平面位置显示器 (PPI) 主扫描电路的数字化	199
5.5.1 数字式 PPI 主扫描电路的组成	200
5.5.2 正余弦产生器	200
5.5.3 数字式主扫描线产生中的几个问题	202
§ 5.6 数字式录取显示器	205
5.6.1 半自动录取设备	206
5.6.2 数字式综合显示器举例	211
§ 5.7 新型显示器件和显示技术简介	215
5.7.1 等离子显示板	213
5.7.2 电致发光板	216
5.7.3 液晶显示器件	216
5.7.4 新型彩色显示技术	217
5.7.5 大屏幕显示技术	218
附录	221
附录 I Z 变换	221
附录 II 离散傅氏变换 (DFT)	230
附录 III 快速傅氏变换 (FFT)	237
主要参考资料	248
思考练习题	250

第一章 绪 论

数字技术的一些数学基础——离散数学、逻辑数学等，早在十七~十八世纪就已经出现。但是发展成为数字技术并付诸实用，则有待于电子技术和器件的发展。数字技术一经出现并应用于科学技术的各个领域后，就显露出它的巨大活力，促使这些领域取得了难以想象的提高和发展。反过来，这些领域的发展和提高又进一步为数字技术的发展创造了条件，并提出了更迫切的要求。电子数字计算机的发展和提高可说是数字技术发展和应用的一个实例，正是符合上述情况的。

六十年代以前，是以使用电子管为主的时期，这时要在雷达中实际大量采用数字技术是有困难的。主要是因为设备极为庞大，功率消耗很多，可靠性和稳定性也不易满足要求。随着半导体器件、集成器件和超大规模集成器件的出现，情况就发生了根本性的改变。所以从六十年代以来，数字技术在雷达中的应用迅速而又普遍地发展起来。如今，可以说数字技术已应用于雷达的一切方面，并且还不断地在开拓着新的应用。雷达在采用数字技术后，所取得的进展也是十分注目的。

数字技术在雷达中的应用是很广泛的，归纳起来，主要的有以下几个方面：

(1) 采用电子数字计算机来进行雷达参数的选择和模拟总体设计，使设计达到最优化。

(2) 用电子数字计算机来控制雷达的运转，使雷达实现环境的自适应和“无人”管理。

(3) 应用于雷达信号的产生和辐射。相控阵列天线是数字技术与天线技术相结合的产物；孔径综合天线或信息处理天线已经超出于一般天线的概念，而把数字技术应用到天线设计中去了。在雷达信号的产生方面，出现了数字式频率综合器。复杂调制或编码信号的形成可以或必须采用数字技术，高稳定载频或载频捷变也往往要用数字技术来实现或控制。

(4) 应用于雷达信号的处理和检测。雷达以辐射电磁波作为手段，达到发现目标和测定其参数。可是在雷达接收到的信号中，除了有用的目标回波信号外，总是混有噪声，有时还有杂波和干扰，这就需要进行过滤以获得最佳的信噪比，然后再以一定的逻辑准则来判定有否目标存在，这就是对信号的处理和检测。用数字技术完成上述任务，在质量、灵活性和可靠性等方面要比用模拟技术的好得多。例如，模拟式动目标显示的质量和稳定性就远不如数字式动目标显示或动目标检测。数字式的恒虚警率处理、多种逻辑的目标检测器及视频积累等等也是难于用模拟技术实现或达到相近的性能指标的。

(5) 雷达数据的数字化处理。经过处理和检测确认接收到的信号是含有有用目标回波的信号后，就要对目标的实时坐标及其它参数进行录取。不仅如此，现代雷达还希望能提供目标既往的和未来的运动状况的信息。例如，将目标的实时坐标数据与以往的坐标数据按批次加以分组，得出目标的航迹、航向和未来位置的估值等。这些都是属于雷达数据处理的任务。在采用模拟技术时，一般地只能取得目标的位置数据。采用数字技术，特别是和电子数字计算机相结合后，所能取得的目标数据或关于目标的信息要多得多，质量上也

有明显的提高。

(6) 雷达显示器的数字化。人们为了利用雷达所取得的关于目标的信息,就必须把目标数据显示出来。过去采用模拟技术的显示方法,只能显示较为简单的雷达图象。采用数字技术后,不仅能显示一般的雷达图象,而且能以数字或符号把目标的某些数据或属性显示在目标亮斑的附近,还能把其它一些图形或曲线,如雷达周围的地形或供指挥用的某种曲线也一并显示出来。还可以按目标的批次将它的各项数据列成表格显示出来,使人们观看时一目了然。雷达显示器的数字化不仅在于外观,而是获得这种外观所用的电路和器件也是数字式的(部分地与模拟电路和器件相结合)。

鉴于雷达、天线、计算机和信息科学等专业或学科有一定的分工,并考虑到本课程是雷达专业高年级的加选课程,有脉冲与数字电路、统计无线电技术、雷达系统、系统与控制等课程相配合,因而本书仅讨论雷达信号和数据的处理与显示中所应用的数字技术,并且除必要时辅以一定的理论分析而外,以讨论数字技术在这些方面的应用及其实现为主。章次的安排是首先把雷达的原始坐标数据从模拟形式转换为数字形式,然后按照雷达的工作顺序,由信号的处理与检测至数据的处理和显示分章叙述。

数字技术应用于雷达后,已经显露并将继续发展的主要成果有:

(1) 一些在理论上已经或基本上得到解决的课题,过去由于缺乏技术实现手段无法实现或所得结果离理论值相差较大,由于采用了数字技术使情况有了较大的改变。例如,雷达信号序列的匹配滤波和雷达数据的最佳过滤。

(2) 为把电子数字计算机与雷达相结合,为构成高质量的雷达情报网创造了条件。

(3) 使雷达的潜在能力高效能地发挥出来,使质量、灵活性、可靠性等性能指标在矛盾对立统一的过程中不断提高。使大型、多功能、高精度雷达的研制和使用成为现实。

但是,不要把雷达中应用数字技术误认为是雷达的唯一发展方向,也不要把数字技术应用于雷达上的优越性夸大到不适当的程度,或认为模拟技术没有发展前途了。事实上,雷达的发展是多方面的,数字化仅是其中之一。从目前的状况来说,电子模拟器件及信号模拟处理技术也还都在发展,表面声波器件和电荷耦合器件及有关的信号处理技术就是一例。采用数字技术所带来的电路的复杂程度增大也是应当充分估计到的。

最后要指出的是,数字技术的具体应用是和器件的发展分不开的。例如,微处理机和微计算机的出现,雷达处理模块的出现,会给在雷达中应用数字技术带来变革。信号和数据的处理,从理论到方法都不断有所发展,这也会给数字技术的具体应用带来影响。例如,非正弦正交信号的应用和快速傅利叶变换算法等等。所以,要能完满地应用数字技术解决工程实际问题,还必须关心数字器件的发展和有关基础理论的学习。

第二章 雷达数据的数字化

§ 2.1 概 述

雷达的基本任务是要能在各种环境条件下发现目标和测量它的坐标以及其它参数。这些任务可以用模拟设备来完成,也可以用数字设备来完成。在用数字设备时,由于载荷上述信息的信号是模拟量,例如,反映目标存在与否是信号的幅度是否超过检测门限电平;反映目标距离的是信号延迟时间;反映目标角度位置的是收到回波信号时天线波瓣轴线指向等等。因此,在采用数字技术检测目标和处理信号时,有必要把模拟量转换为数字量。在把雷达测得的目标数据送往计算机处理和显示时,也有把数据数字化的问题存在。有关信号数字化的问题将在第三章里结合信号处理和检测介绍。本章讨论的是雷达数据数字化的问题。

雷达测得的目标坐标数据有两类:斜距的(习惯称为距离的)和角度的。它们各包括位置数据和变化率数据。一般雷达能取得的是距离和角度位置数据,有些雷达还可以取得目标距离变化率(习惯称为速度)数据。其它数据往往是间接求得。所以在这一章里只介绍距离和角度位置数据的数字化。

讨论数字化的问题时,着重于实现方法及其优缺点和精度。有了这一基础,不难作出选择设备及其参数的结论和确定设备的组成。

§ 2.2 距离数据的数字化

大家知道,雷达是以测量目标回波相对于发射信号的延迟时间来确定目标距离 R 的:

$$R = \frac{1}{2} c t_R \quad (2.1)$$

式中 t_R 是电磁波往返于雷达和目标之间所需时间; c 是电磁波传播速度, $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/sec}$ 。

由此可知,把目标距离数据数字化就是把延迟时间 t_R 数字化。这一工作是在录取目标数据的录取设备里完成的。

2.2.1 距离编码器

把和目标距离相应的延迟时间转换为对应的数码的装置叫做距离编码器。图 2.1 所示为单个目标距离编码器的组成方框图和波形图。

在图 2.1 里,在雷达发射信号开始时刻出现的启动脉冲使触发器置“1”,于是计数脉冲产生器的计数脉冲经与门进入距离计数器。当目标回波脉冲到达时,触发器置“0”,与门封闭,计数器停止计数且保持所计数码。在需要读取目标距离数码时,将读数控制信号加到控制门而读出距离数据。

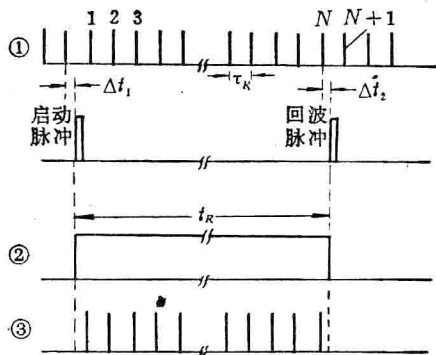
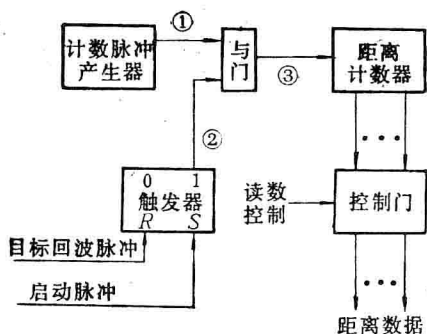


图 2.1 单个目标距离编码器

若计数脉冲产生器的频率为 f_0 ，那么在 t_R 时间里距离计数器计得的数码 N 是

$$N \approx f_0 t_R \quad (2.2)$$

式 (2.2) 里用近似等号是因为启动脉冲和回波脉冲不一定与计数脉冲重合 (见图 2.1 里的 Δt_1 和 Δt_2)。

对比式 (2.1) 与式 (2.2)， R 和 N 都和 t_R 成正比，只是比例系数 $c/2$ 和 f_0 不同，但两者都是已知和固定的，所以 N 就能反映目标距离。

图 2.1 的单个目标距离编码器只适用于个别类型的雷达，如机载测高雷达。它不能满足在同一方向上测量多个目标的距离的要求。不仅如此，图 2.1 只能对最近距离的目标起作用。图 2.2 的多个目标距离编码器消除了上述限制，其工作原理是：雷达发射信号开始时刻出现的启动脉冲使触发器置“1”，计数脉冲就经与门使距离计数不断递增，直至距离计数器产生溢出脉冲使触发器置“0”，封闭与门。目标回波脉冲加到读数脉冲产生器，由它产生的读数脉冲控制着控制门，把目标回波到达时刻的距离计数经控制门读出。图中还把计数脉冲经延迟线，获得短的延迟后才加到读数脉冲产生器，这是为了保证读数在计数器稳定后才进行。由图 2.2 可知，只要有回波脉冲到来就可以读出相应的距离数码，所以是多目标的距离编码器。

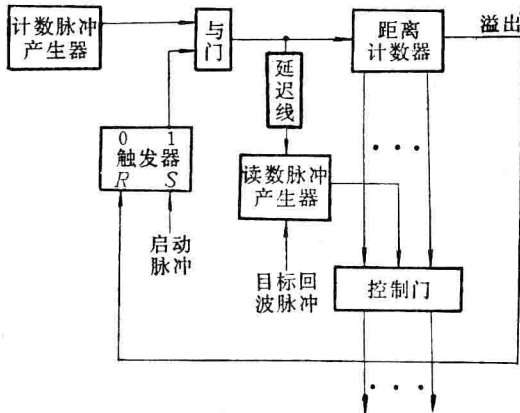


图 2.2 多个目标距离编码器

2.2.2 距离编码误差的分析

引起距离编码误差的原因很多，主要的有如下三项：

- (1) 编码器启动脉冲的零距离误差及其与计数脉冲不重合所造成的误差；
- (2) 计数脉冲频率不稳所造成的误差；
- (3) 距离量化所引起的误差。

下面分别予以说明。

(一) 编码器启动脉冲的零距离误差及其与计数脉冲不重合所造成的误差

在前面的叙述中, 把启动脉冲的出现时刻定在发射脉冲开始的时刻, 这是不严格的。严格地说, 启动脉冲的出现时刻应当是零距离目标回波到达的时刻。如果不是这样就会造成测距误差。发射脉冲开始时刻和零距离目标回波出现时刻的不一致是由于馈线系统和接收系统的延迟所造成。通常是由调整发射脉冲相对于编码器启动脉冲的延迟时间来消除这种误差。

此外, 如果编码器的启动脉冲与计数脉冲的出现时刻不重合, 有了图 2.1 里的 Δt_1 存在, 那也会带来距离编码误差。显然, 计数脉冲的频率越高, 由此造成的误差就越小。要从根本上消除 Δt_1 , 就必须采取从时钟振荡器用同步分频的办法形成计数脉冲、发射脉冲(未经零距离校正的)及编码器启动脉冲。

(二) 计数脉冲频率不稳所造成的误差

距离编码器读出的距离数码取决于目标回波延迟时间 t_R 里输入计数器的计数脉冲个数。如果计数脉冲的频率不稳, 会造成计数不稳和误差。

若计数脉冲的频率设计为 f_0 , 实际工作时由于某些原因变为 f'_0 , 频率偏移率

$$\alpha = \frac{f'_0 - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (2.3)$$

式中 $\Delta f = f'_0 - f_0$ 为频率偏移量。

计数脉冲频率的改变使延迟时间的量化单元(也就是距离量化单元, 二者相差比例常数 $c/2$) 改变。以 τ'_R 代表频率改变后的量化单元, 则

$$\tau'_R = \frac{1}{f'_0} = \frac{1}{f_0(1 + \alpha)} = \frac{\tau_R}{1 + \alpha} \quad (2.4)$$

$$\Delta \tau_R = \tau'_R - \tau_R = \frac{-\alpha}{1 + \alpha} \tau_R \quad (2.5)$$

式中 $\tau_R = 1/f_0$ 。

目标的距离不同, 由于计数脉冲频率不稳所造成的误差也不同。如果计数脉冲频率变为 f'_0 后计得目标距离数码为 N' , 那么延迟时间(与频率为 f_0 时相比)的误差

$$\Delta t_R = N' \Delta \tau_R \approx \frac{t_R}{\tau_R} \left(\frac{-\alpha}{1 + \alpha} \right) \tau_R = \frac{-\alpha}{1 + \alpha} t_R \quad (2.6)$$

可见目标距离愈远误差愈大。当目标处于雷达的最大作用距离处时 $t_R = t_{R \max}$, 计数为 $N_{\max} = t_{R \max} / \tau_{R0}$

$$\Delta t_{R \max} \approx \frac{-\alpha}{1 + \alpha} t_{R \max} \quad (2.7)$$

或

$$\Delta t_{R \max} \approx \frac{-\alpha}{1 + \alpha} N_{\max} \tau_R \quad (2.8)$$

如果做到

$$|\Delta t_{R \max}| \approx \left| \frac{-\alpha}{1 + \alpha} \right| N_{\max} \tau_R < \tau_R$$

那么即使计数脉冲频率由 f_0 变为 f'_0 , 编码器读得的目标距离数码仍然不变。由此可得

$$|\alpha| < \frac{1}{N_{\max}} \quad (2.9)$$

例如, 雷达的最大作用距离 $R_{\max} = 300\text{km}$, 相应的 $t_{R\max} = 2000\mu\text{s}$ 。计数脉冲频率 $f_0 = 1\text{MHz}$, $\tau_R = 1\mu\text{s}$ 。 $N = t_{R\max}/\tau_R = 2000$ 。要使距离数码不因计数脉冲频率不稳而变动, 则应使 $|\alpha| < 1/2000 = 5 \times 10^{-4}$ 。晶体振荡器的频率稳定度可达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$, 采用它就可以消除计数脉冲频率不稳而造成的误差。

(三) 距离量化引起的误差

如图 2.1 的波形①所示, 当目标回波出现于第 N 个与 $(N+1)$ 个计数脉冲之间时, 距离计数器的计数总是 N , 因此就产生相当于图中 Δt_2 所对应的距离误差。

若延迟时间的量化单元是 τ_R , 目标回波脉冲落在第 N 和 $(N+1)$ 个计数脉冲之间任何时刻的概率密度是相等的, 那么 $\Delta t_2 = t_R - N\tau_R$ 的方差

$$\sigma_{\Delta t_2}^2 = \int_{N\tau_R}^{(N+1)\tau_R} (t_R - N\tau_R)^2 \frac{1}{\tau_R} dt_R = \frac{\tau_R^2}{3} \quad (2.10)$$

可见, 要减小量化所引起的误差就必须减小 τ_R 或提高计数脉冲的频率。例如, 雷达的最大作用距离为 150km , 当要求量化所引起的距离误差小于 0.1% 时, 计数脉冲的频率应大于 1MHz ; 若要求量化误差小于 0.01% , 则计数脉冲频率应大于 10MHz 。随着量化误差的减小, 距离计数器的位数要增多, 速度要加快。在所举的例子中, 用 1MHz 计数脉冲时, 需要用 10 位的计数器, 且计数器应能在 $1\mu\text{s}$ 时间内完成 10 位翻转; 当计数脉冲频率提高至 10MHz 时, 计数器就应当是 14 位的 ($2^{14} = 16384 > 10000$), 且速度要提高到 100ns 内完成 14 位翻转。所以, 单纯以提高计数脉冲频率来降低量化误差有时仍不能满足要求或在实际上不宜采用, 还需要有其它的降低量化误差的方法。

2.2.3 减少量化误差的其它方法

除了提高计数脉冲频率可降低量化误差外, 其它的降低量化误差的方法有:

- (1) 游标计数法;
- (2) 具有小数位的计数法;
- (3) 插值延迟线法。

插值延迟线法在以往的数字式距离跟踪系统中用得较多。但是, 由于它用了模拟式延迟器件, 精度上受到限制。随着数字器件速度和集成度的提高, 这种方法已逐渐不再采用, 这里不再介绍, 读者如有需要可参阅有关书籍。

(一) 游标计数法

游标卡尺是大家熟悉的精密测量长度的工具, 把它所用的原理应用到距离编码器里就成为游标计数法。图 2.3(a) 所示为采用游标计数法的距离编码器的原理图。图中的主计数器和前面介绍过的距离计数器相同, 但增加了一个游标计数器。游标计数器的计数脉冲由游标脉冲产生器供给。假设目标回波脉冲出现在第 N 和 $(N+1)$ 个主计数脉冲之间 (见图 2.3(b)), 于是主计数器计到数码为 N 时就停止了。这时, 回波脉冲与第 N 个主计数脉冲的出现时刻相差 Δt_2 , 如果没有游标计数器, 它就成为量化误差。

现在, 由于有游标计数器, 量化误差将不由 Δt_2 决定。在目标回波脉冲到达时, 触发器

2 置“1”，游标脉冲产生器开始送出游标脉冲，游标计数器开始计数，当游标计数器计到某一数值 n 时，主计数脉冲和游标脉冲恰好同时出现，符合电路输出一个脉冲将触发器 2 置“0”，游标计数器也就停止工作。

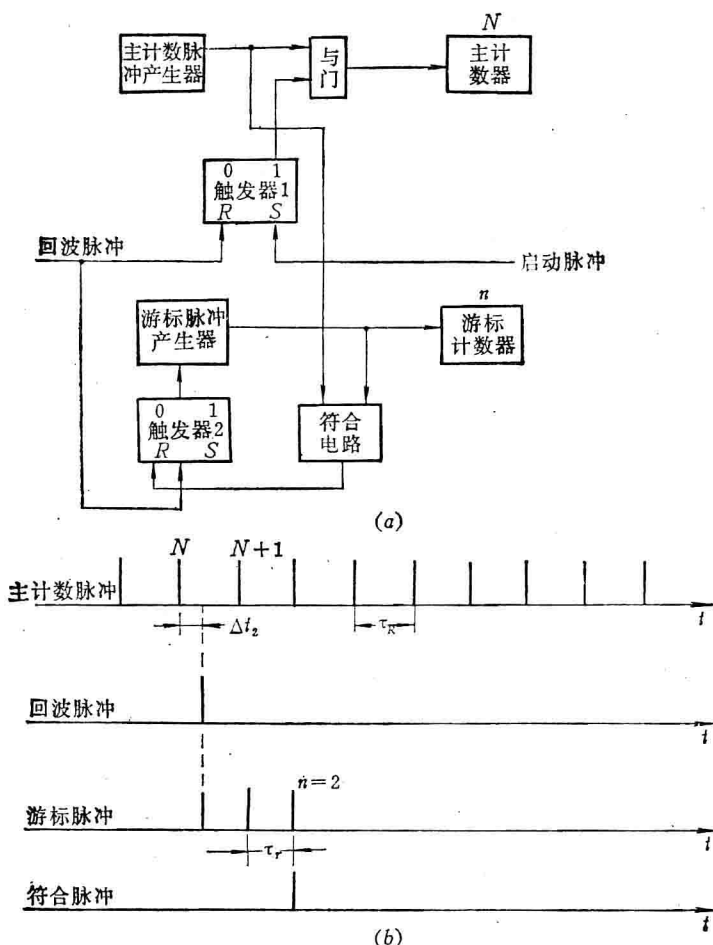


图 2.3 游标计数法距离编码器

由图 2.3(b)可以看出，游标计数器的计数 n 应满足

$$\Delta t_2 + n\tau_r = n\tau_R \quad (2.11)$$

或
$$\Delta t_2 - n(\tau_R - \tau_r) = 0 \quad (2.12)$$

式中 τ_r 是游标脉冲周期。

从游标原理可知，采用游标后仍然会有量化误差。无游标时最大量化误差为 τ_R ，从式 (2.12) 可以看出，加游标后由于 n 只能取正整数，其最大量化误差为 $(\tau_R - \tau_r)$ 。如果要求加游标后的测距精度提高 k 位 (二进制的)，即量化误差为原来的 $1/2^k$ ，于是有

$$(\tau_R - \tau_r) = \tau_R / 2^k \quad (2.13)$$

或
$$\tau_r = \frac{2^k - 1}{2^k} \tau_R \quad (2.14)$$

这就是根据提高精度要求 (即 k 值) 所确定的游标脉冲周期 τ_r 。游标脉冲总的数目应为

$2^k - 1$ 。

如上所述,加游标的设备是利用主计数脉冲和游标脉冲符合而工作的,同时它还存在量化误差,因此这两种脉冲不能太窄,否则对有些 Δt_2 值将得不到符合输出。但主计数脉冲和游标脉冲宽度也不能太宽,这可以用图 2.4 来说明。当第 $(N+n)$ 个主计数脉冲的前沿恰好与第 n 个游标脉冲的前沿对准时,第 $(N+n-1)$ 个主计数脉冲的前沿与第 $(n-1)$ 个游标脉冲的前沿相差 $\tau_R - \tau_r = \tau_R/2^k$ 。如果主计数脉冲的宽度小于 $\tau_R/2^k$,那么设备能正常工作,否则会产生误差。一般将主计数脉冲宽度取为略小于 $\tau_R/2^k$ 。

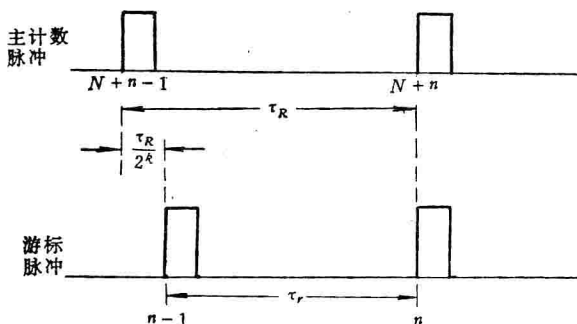


图 2.4 计数脉冲宽度的限制

由此可见,当为了提高精度而选取大的 k 值时,设备将在极窄的脉冲条件下工作,通常是不易做到的,所以 k 值不能选得太高,一般在 3 左右。

图 2.3 所示距离编码器适用于单个目标。读者可根据图 2.2 的原理构成适用于多目标的距离编码器。应当指出,游标法用于多目标距离编码器时,会使距离分辨率显著降低。事实上,当游标计数器的计数为最大值 $n_{\max}$ 时,即为 $\Delta t_2 = \tau_R$, 所以

$$n_{\max} = 2^k \quad (2.15)$$

这时游标脉冲串将在回波脉冲之后延续 $2^k \tau_r$ 的时间。在此期间若有另一目标的回波脉冲出现,距离编码器将不能正常作出响应。所以雷达的距离分辨率降低了 $2^k \tau_r$ 所对应的距离。

游标计数法距离编码器输出的目标距离数码由主计数器的和游标计数器的两部分合成。当 $\tau_r = (2^k - 1) \tau_R / 2^k$, k 为正整数,且采用二进制计数时,只要简单地把主计数器的数码和游标计数器的数码按图 2.5 所示排列就是完整的输出数码。

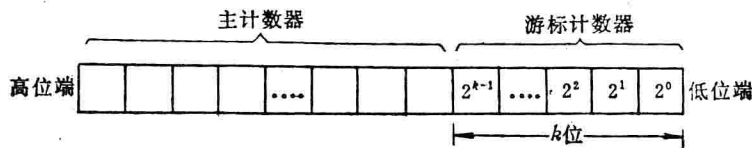


图 2.5 输出数码的排列

(二) 具有小数位的计数法

这种方法是在主计数器的相邻主计数脉冲之间插入一组精密计数脉冲,由这些脉冲与回波脉冲作精密的符合。就象我们在日常计数时,为了精密计数而在相邻整数之间插入小数那样。例如在整数 1 和 2 之间插入小数成为 1.1, 1.2, 1.3, ……就可以提高计数精度 10 倍。

图 2.6 所示为采用此法的距离编码器。图中 $D_1 \sim D_3$ 用来产生精密计数脉冲。如果要在相邻两计数脉冲间插入 2^k 个精密计数脉冲, k 为正整数,那就需要 $(2^k - 1)$ 节延迟时间为 $\tau_R/2^k$ 的延迟线,图 2.6 所示为 $k = 2$ 的情况。

延迟线输出的精密计数脉冲在触发器 T 为“1”时,经与门或或门使小数位计数器计数,小数位计数器每当主计数脉冲出现时置“0”。这仿佛是在主计数器之后插进了小数。回波脉冲到来时,所有的与门都封闭,主计数器及小数位计数器的状态被固定下来。

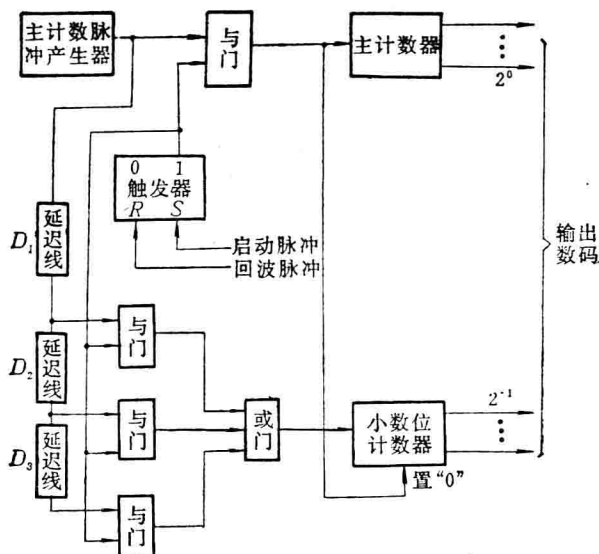


图 2.6 小数位法距离编码器

在这种距离编码器里，主计数脉冲的宽度也有限制，它不能大于或等于每节延迟线的延迟时间。与游标法相比，这种距离编码器的距离分辨率没有因为采用了小数位而变坏，这是它的优点。

2.2.4 目标回波到达时刻的确定

目标距离数据的数字化实际上是回波脉冲延迟时间的数字化，这和确定目标回波到达时刻有密切关系。

有两种定义目标回波到达时刻的方法：一种是以回波脉冲的前沿作为它的到达时刻；另一种是以回波脉冲的中心作为它的到达时刻。对于点目标来说，两种定义法所得的距离数据一样[●]。对于有一定纵深的目标来说，所得距离数据相差目标纵深的一半。

实际的目标回波信号不是矩形脉冲而是近似为钟形脉冲（图 2.7）。为了确定前沿，可将回波信号与一比较电平相比较，把回波信号穿越比较电平的时刻作为其前沿，这不难用电压比较器实现。用前沿作为到达时刻的缺点是容易受比较电平的不稳及迭加在回波上的噪声的影响。

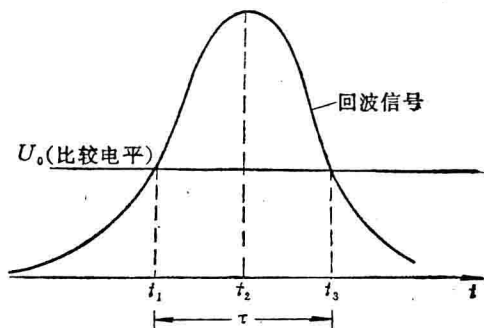


图 2.7 回波到达时刻的确定

图 2.8 是一个确定回波脉冲中心的设备的原理方框图。来自接收机的视频回波信号与比较电平 U_0 在比较器 1 里作比较，其输出是宽度为 τ 的矩形脉冲（见图 2.7），此输出经延迟 $\tau/2$ 的延迟线 D_1 送往符合电路。另一路把接收机的视频回波信号送往串接的有同样抽头数的延迟线 D_2 和 D_3 （在图 2.8 里是各有 5 个抽头，

● 固定的时间差可通过校零予以消除。

相邻抽头间延迟 $\tau/10$)。 D_2 和 D_3 的输出各送往求和电路 Σ_1 和 Σ_2 , Σ_1 和 Σ_2 的输出送往比较器 2。当 Σ_1 和 Σ_2 的输出相等时, 比较器 2 送出负脉冲。参阅图 2.7, 如果回波信号是对称的钟形脉冲, 则比较器 2 将在 t_3 时刻送出负脉冲。这时比较器 1 的输出经 D_1 延迟线也到达符合电路, 于是符合电路输出一脉冲, 经标准脉冲形成电路成为标准宽度和幅度的脉冲输出。

应当指出, 输出的标准脉冲比中心迟后 $\tau/2$, 但这是一个固定量, 所以不难用校正的办法从距离计数中予以消除。此外, 比较器 1、延迟线 D_1 和符合电路是必须的, 否则求和电路 Σ_1 和 Σ_2 在没有回波脉冲而只存在噪声时, 也可能出现相等的输出而使比较器 2 输出负脉冲, 以致造成差错。

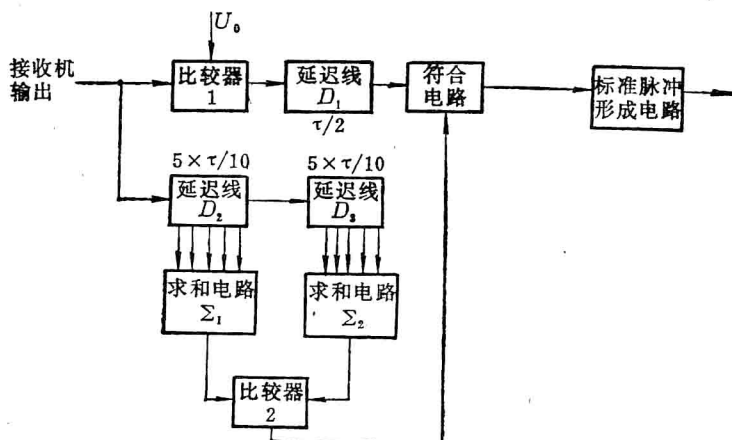


图 2.8 确定回波脉冲中心

图 2.8 的设备对点目标和对称的回波信号是工作得比较好的。对于有一定纵深的目标的回波, 则会有一定的判断中心的误差存在, 读者可自行分析。这种设备确定的回波中心的时刻受比较电平 U_0 和迭加在回波信号上的噪声的影响。

2.2.5 有距离模糊情况下距离数据的录取

在脉冲雷达里, 如果目标回波信号的延迟时间 t_R 大于重复周期 T_r , 那就成为“跨周期”回波 (见图 2.9)。看起来就象目标回波具有延迟时间 t'_R 似的。这就叫做发生了距离模糊。

在过去, 雷达采用模拟式处理和显示时, 发生了距离模糊就无法测出目标的真实距离。因此, 只能靠降低雷达的重复频率, 使要测量的最远目标的距离也不发生距离模糊。雷达重复频率的降低, 在对作用距离要求不变的情况下, 就要加大

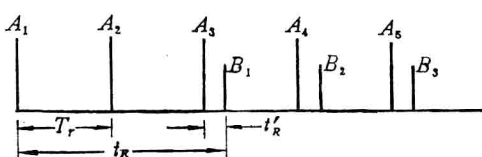


图 2.9 距离模糊的说明

发射脉冲功率或脉冲宽度等措施来补救, 这都会带来一些不利因素。雷达重复频率的降低还会使它的测速性能变坏。对于需要探测洲际导弹、人造卫星等目标的雷达来说, 靠降低雷达重复频率来解决距离模糊问题是不可行的。在脉冲多卜勒雷达里, 为了获得良好的测速性能 (无速度模糊), 要采用高达数十千赫的重复频率。这时, 即使目标距离并不远, 也存在距离模糊。

存在距离模糊并非从根本上就测不出目标距离, 如果采用数字技术测出回波信号“跨过”的周期数 N , 那么就可以用下式求出 t_R 或目标真实距离 (相差比例因子 $c/2$, c 为光速):

$$t_R = NT_r + t'_R \quad (2.16)$$

在图 2.9 里 $N = 2$ 。 t'_R 的录取仍可采用前面几节所介绍的方法。所以下面的讨论主要是解

决如何获得跨周期数 N 。

(一) 在发射信号里赋予判断跨周期数的标记

根据所用发射信号形式的不同,为判断 N 值所用的标记也不相同。当发射信号是简单的高频脉冲或线性调频脉冲时,可采用“舍脉冲”法添加标记 $\bullet$ 。其原理可用图 2.10 说明。图中的发射脉冲串里,每 M 个发射脉冲中有一个不发射,这就是添加的标记,这里是 A_1 到 A_M 中 A_2 不发射。与发射脉冲相对应,接收到的回波脉冲串同样地每 M 个回波脉冲中缺少一个。只要从 A_2 开始(A_2 本身不计数)逐个累计发射脉冲数,直到某一发射脉冲(在图中是 A_2)后没有回波脉冲(图中为 B_2)时停止计数,那么累计的数值就是跨越的周期数 N 。

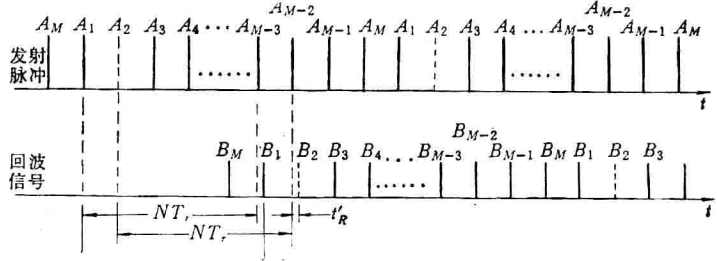


图 2.10 舍脉冲法的说明

其实,如果我们单独把各个 A_2 挑出来,那就可以看到 A_2 的重复周期是 MT_r 。只要满足

$$MT_r > NT_r + t'_R \quad (2.17)$$

那么对 A_2 来说就不存在距离模糊(A_2 在实际上并不发射)。 t'_R 的值在 $0 \sim T_r$ 之间,所以 M 和最多的跨周期数 $N_{\max}$ 之间应满足如下关系式:

$$M > N_{\max} + 1 \quad (2.18)$$

这里的 $N_{\max}$ 是要测的最远目标的跨周期数。

由图 2.10 还可以说明下列问题:

(1) 这种方法只适用于有单个目标回波存在的情况或雷达处于距离跟踪状态下测量和录取目标距离。

(2) 适用于回波信号信噪比较大的情况,否则由于叠在回波信号上的噪声的起伏,会造成判断 N 值发生差错。

(3) 如果 $t_R = NT_r$ 或 $t'_R = 0$,那么由于脉冲雷达在发射脉冲期间接收通道是关闭的,将造成始终没有回波的状况。解决的办法是雷达用两种或多种不同,但相差不多的重复频率工作。

如果雷达用的发射脉冲是相位编码脉冲,那么只要在 M 个发射脉冲中有一个的相位编码与其余 $(M-1)$ 个不同,就能达到赋予标记的目的。由此还可以想到,如果采用的发射脉冲是伪随机编码脉冲,那么只要伪随机序列的长度 $M > N_{\max} + 1$,就可以消除距离模糊。

(二) 用变更重复频率的办法确定跨周期数

跨周期数 N 还可以用变更雷达重复频率的办法间接地测量出来。

如果雷达要测量的最远目标的距离为 $R_{\max}$,那么可选定一基本频率 f_B 使满足

$$\frac{c}{2f_B} > R_{\max} \quad (2.19)$$

● 由于舍掉一些发射脉冲有损于目标检测,所以只在判断 N 值时才这样工作。