

# 易懂的雷达信号处理

面向学生与工程师

## 第一章：雷达是什么

作者：唐承乾

版本：社区版 V1

官方仓库：<https://github.com/apple-art/easy-radar-tutorial>

权利声明：本资料为《易懂的雷达信号处理》社区版 V1，仅供个人学习、教学交流与  
非商业分享使用。作者保留全部著作权；未经授权，请勿擅自商用、删改署名或再版  
传播。

# 目录

<b>1.1 雷达的基本概念</b>	<b>1</b>
1.1.1 电磁波与回波探测 . . . . .	1
1.1.2 回波中的距离与速度信息 . . . . .	2
1.1.3 从原始回波到处理结果 . . . . .	3
1.1.4 全书结构与主线 . . . . .	4

## 1.1 雷达的基本概念

雷达与我们的生活并不遥远，天气预报里常见的降雨云图，机场里用来监视飞机起降的旋转天线，高速公路上用于测速的设备，汽车前保险杠里的毫米波模块，这些都属于雷达。它们的用途不一样，但做的事情很接近：主动发出电磁波，再根据回波判断前方有什么、在什么位置、是不是在运动。

### 1.1.1 电磁波与回波探测

人对世界的判断，很多时候依赖光和声音。眼睛靠接收光判断物体的位置，耳朵靠声音的强弱和到达方向判断环境。雷达也一样，只不过它不等外界把信息送来，而是自己先发出电磁波，再接收目标反射回来的回波。

我们把这个过程和生活场景类比下。假设我们站在山前喊一声，过一会儿才听到回声，说明山离你有一段距离，回声延迟的长短，反映了山的远近；现在我们把手放到嘴边，不断地前后煽动，嘴里发出啊的声音，我们会听到声音的音调忽高忽低，音调反映着我们手运动的快慢，不信你把手像蜗牛一样慢慢动。雷达做的事与此类似，只是把声波换成了传播速度更快的电磁波，把耳朵换成了接收机。

雷达与回声之间也有明显差异。电磁波传播极快，往返时间往往非常短，回波也通常很弱，周围还会混着噪声、杂波和其他目标的响应。接收机得到的不是可以直接读懂的结论，而是一段需要继续处理的电信号。



图 1: 图 1.1 雷达在日常场景中的应用

上图把几种常见场景放在一起看，会更容易抓住雷达的共性。天气雷达关心的是云团和降雨的位置变化，机场监视雷达关心的是飞机的方位和距离，测速雷达关心的是目标是不是在靠近或远离，汽车毫米波雷达关心的是前车距离和相对速度。应用场景不同，但判断依据都来自回波。

### 1.1.2 回波中的距离与速度信息

要理解雷达后面为什么会走向距离测量、速度测量和目标检测，先要知道回波本身能提供什么信息。

雷达发出一个电磁波脉冲后，目标把其中一部分能量反射回来。假设从发射到接收到回波，中间经历的往返时间是  $t$ 。因为电磁波的传播速度接近光速  $c$ ，而且这段时间对应的是“去一趟再回来一趟”，所以目标距离满足

$$R = \frac{ct}{2}$$

这个式子后面第 4 章还会详细展开，这里先抓住物理意义：回波到得越晚，目标通常越远。雷达测距的出发点，就是这么朴素。

除了距离，回波里还带着目标运动的信息。若目标相对雷达沿视线方向靠近或远离，回波频率会相对发射频率产生轻微偏移，这就是多普勒效应。对单站雷达，速度和多普勒频率之间有一个最基本的关系：

$$v = \frac{\lambda f_d}{2}$$

其中  $\lambda$  是发射电磁波的波长， $f_d$  是回波的多普勒频率偏移。这个式子说明：只要能测出频率偏移，就能反推出目标速度。第 5 章要做的，就是把这件事一步一步讲透。

这里先不必急着把两个公式背下来，而是把它们各自回答的问题分清楚：时间延迟主要回答“目标在哪儿”，频率偏移主要回答“目标是不是在动、动得多快”。后面的雷达处理链，正是围绕这两个问题逐层展开的。

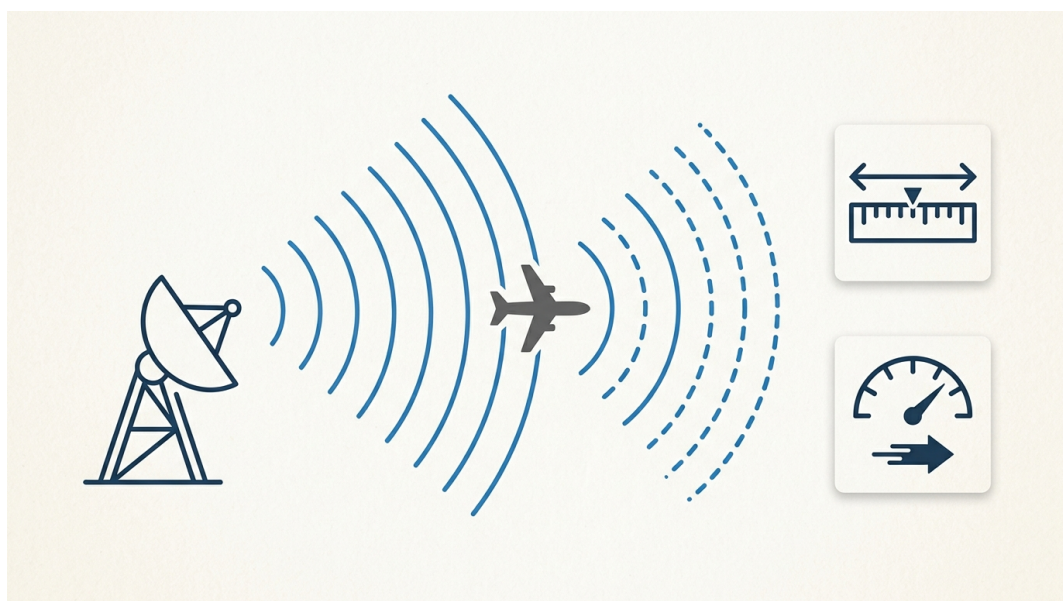


图 2: 图 1.2 从回波到距离和速度

上图把这两个最基本的判断放在同一张图里。左边是发射和接收，右边分别对应两类最重

要的信息：往返时间差对应距离，回波频率变化对应速度。至于“怎样在实际数据里把它们稳定地量出来”，那就不是一句直观解释能解决的了，而是本书后面几章的任务。

### 1.1.3 从原始回波到处理结果

第一次接触雷达时，读者很容易形成一种印象：既然距离可以由时间延迟得到，速度可以由频率偏移得到，那么接收机是不是一拿到回波，就能直接读出目标距离和速度？实际情况并不是这样。

原因在于，接收机拿到的通常是一段看上去乱七八糟的原始电信号，而不是已经写着“目标在 6 km、速度 30 m/s”的结果。若场景里有多个目标，不同目标的回波会叠在一起；即使只有一个目标，噪声、地物反射、设备本身的限制，也会让回波看上去并不整齐。对人来说，这样的原始波形往往没有直接可读性。

因此，雷达系统要做的不只是“收回波”，而是把原始回波一步一步整理成可以解释的结果。通常要经过这样几类处理：

- 先沿时间方向区分不同的延迟，从而把不同距离上的目标分开；
- 再沿脉冲序列分析频率或相位变化，从而把不同速度上的目标分开；
- 最后结合阈值判决，从噪声和杂波里挑出真正值得报告的目标响应。

这几步对应的正是后面几章的主线：第 4 章解决“怎样更稳地量距离”，第 5 章解决“怎样更稳地量速度”，第 6 章解决“怎样判断哪个响应算目标”，第 7 章解决“怎么判断目标在哪个角度”，第 8 章再把它们接成完整程序。

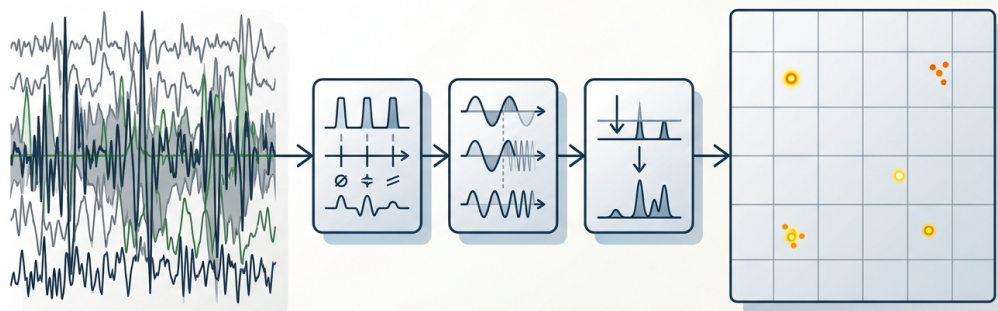


图 3: 图 1.3 为什么雷达离不开信号处理

上图展示了这个转变：左边的原始回波看上去只是混在一起的起伏，中间经过距离处理、速度处理和目标检测，右边才变成能够读出含义的结果图。信号处理是把回波整理成可解读结果的必要步骤。

### 1.1.4 全书结构与主线

读者在后面的章节里会遇到很多新词：时域、频域、采样、匹配滤波、多普勒、CFAR、距离-速度图。第一次接触这些词时，容易把注意力全放在术语上，反而忘了它们各自是在替哪一个问题服务。其实本书始终围着同一条主线展开：

先有回波，再从回波里提取距离和速度，最后从结果里判定目标。

沿着这条主线去读，章节关系就会清楚很多。第 2 章补信号基础，因为不懂信号，就看不懂“回波是什么”；第 3 章说明雷达发什么、收什么，因为不懂发射和传播，就不知道回波从何而来；第 4 章和第 5 章分别处理距离与速度；第 6 章讨论检测；第 7 章把整条链路变成 MATLAB 程序。

因此，第一章的任务并不是把所有技术细节一次讲完，而是先把地图摊开。只要这张地图在脑中立住了，后面遇到具体公式和代码时，读者就不会把它们看成零散技巧，而会知道它们各自处在整条链路的哪个位置。

如果想把这本书的安排再看得更清楚一些，可以先看下面这张图。它不是知识点导图，而是按章节整理出来的“路线图”：哪几章在补基础，哪几章在做参数测量，哪几章在往完整处理链路上收束，一眼就能看出来。

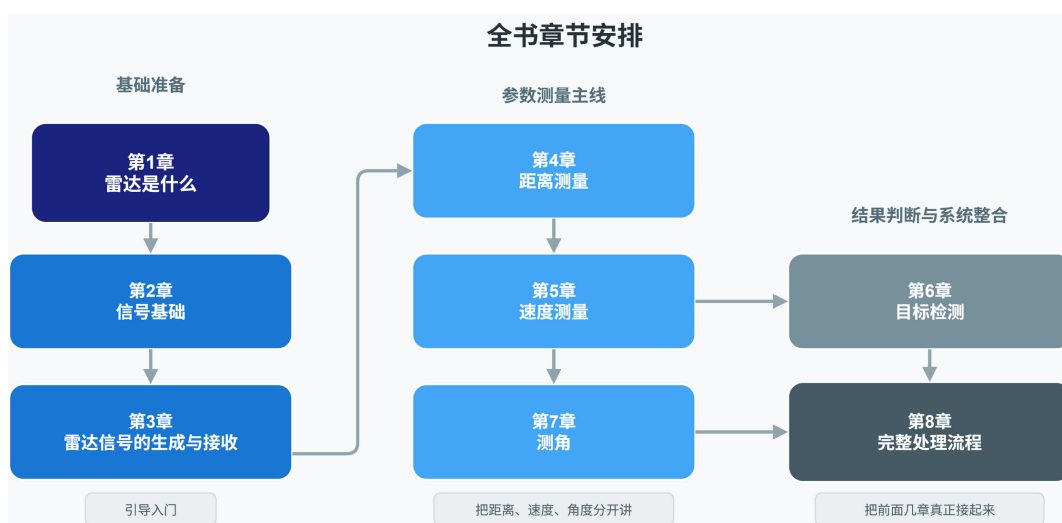


图 4: 全书章节安排与依赖关系

下一章开始进入信号基础。那时我们会先回答一个看似简单、但后面处处都会遇到的问题：什么叫信号？