

易懂的雷达信号处理

面向学生与工程师

第三章：雷达信号的生成与接收

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

3.1 雷达信号的基本形式	1
3.1.1 脉冲雷达的工作方式	1
3.1.2 连续波雷达的工作方式	2
3.2 反射与截面积	3
3.2.1 目标对电磁波的散射	3
3.2.2 雷达截面积 (RCS)	4
3.2.3 RCS 的工程意义	5
3.3 距离衰减	5
3.3.1 发射路径上的功率密度	6
3.3.2 目标散射后的功率密度	7
3.3.3 接收功率与雷达方程	7
3.4 接收端信号	9
3.4.1 时间延迟	9
3.4.2 幅度衰减	9
3.4.3 多普勒频移	9
3.4.4 噪声叠加	11
3.5 小练习	11
3.5.1 练习 1: 往返时间与距离	11
3.5.2 练习 2: 距离衰减的量级感	12
3.5.3 练习 3: 多普勒频移计算	12
3.5.4 练习 4: 脉冲参数设计	13

第 2 章把“信号”这件事讲清楚了，但那时我们讨论的还是比较通用的信号概念。到了这一章，问题开始变得更像真正的雷达了：雷达到底发出去什么？这些信号在空间里经历了什么？最后接收机看到的又是什么样子？

你可以把第 3 章看成后面几章的“剧情铺垫”。第 4 章要测距离，第 5 章要测速，第 6 章要判断有没有目标，可这些处理都不是凭空发生的，它们都建立在同一条链路上：发射、传播、反射、衰减、返回、接收。先把这条链路想顺，后面的距离、速度、检测才不会碎成互不相干的内容。

这一章建议按“从发出去，到收回来”的顺序来读：

核心内容（必须掌握）：

- 3.1: 雷达常见的发射体制是什么，脉冲和连续波各自适合解决什么问题
- 3.2: 目标为什么会反射电磁波，雷达散射截面积在描述什么
- 3.3: 信号为什么会随距离迅速变弱，这件事会给探测带来什么压力
- 3.4: 回到接收端以后，信号身上还剩下哪些可用信息

巩固内容：

- 3.5: 小练习，用来把“发射到接收”的整条链条再顺一遍

而从后续作用上看，第 3 章几乎就是第 4 到第 7 章的共同前置：

- 第 4 章从时延里读距离
- 第 5 章从频移里读速度
- 第 6 章从强弱起伏里做检测
- 第 7 章再进一步，从波束方向性里读角度

如果你读完本章之后，脑子里已经能把雷达想成这样一个过程：先发信号，信号一路传播，碰到目标后被反射，最后带着距离、速度和环境影响一起回到接收机，那这一章就算真正读到位了。

3.1 雷达信号的基本形式

雷达要探测目标，首先得向空中发射电磁波。发什么样的波，是整个雷达系统设计的起点。工程上有两种基本方案：**脉冲波**和**连续波**。两种方案有各自的特点，工程实现的时候常常需要权衡。

3.1.1 脉冲雷达的工作方式

想象你在一个黑暗的山洞里，想知道前方有没有墙壁。你拍一下手，然后屏住呼吸听回声。听到了，说明有墙；根据回声花了多久传回来，你能估算距离。声速大约 340 m/s，如果回声在 0.6 秒后传回，那墙壁大约在 $340 \times 0.6 / 2 \approx 100$ 米外。

脉冲雷达就是这个逻辑，只是把声波换成了电磁波，速度从 340 m/s 变成了光速 3×10^8 m/s。雷达天线先发出一段很短的电磁波脉冲，然后立刻停止发射，切换到接收状态，等待目标反射回来的回波。

理解了吗？恭喜你掌握了雷达测距的基本原理，没什么难得其实。更多细节我们在第四章再讨论。

脉冲宽度 τ 通常只有 1 微秒 (10^{-6} s)。1 微秒有多短？人眨一次眼大约需要 150,000 微秒。在这 1 微秒里，电磁波向前传播了 $c \times \tau = 3 \times 10^8 \times 10^{-6} = 300$ 米——大约三个足球场的长度。脉冲发完之后，雷达静默接收，等候来自各个距离的回波陆续返回。

脉冲方案的核心优势是：发和收可以分开进行，距离测量直接靠时间差，非常干净。

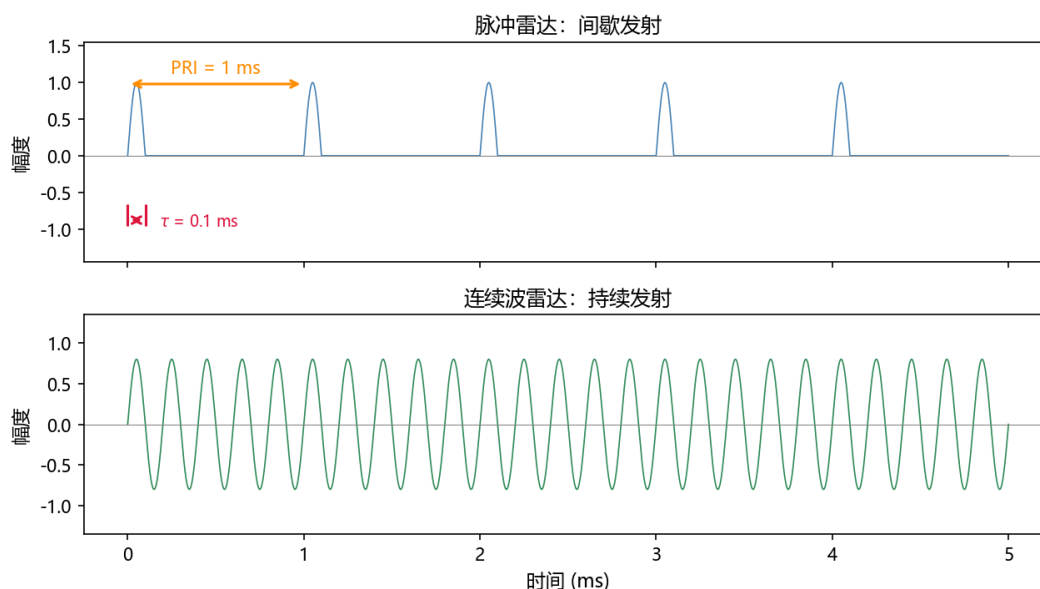


图 1: 脉冲雷达与连续波雷达发射信号对比

上图展示了两种体制的区别：脉冲雷达在短暂的 τ 内发射，其余时间静默接收；连续波雷达始终保持发射状态。

但脉冲方案有一个硬约束：不能在接收期间发射。这就自然而然的引出了两个参数。

脉冲重复间隔 (PRI, Pulse Repetition Interval) 是相邻两个脉冲之间的时间间隔。PRI 决定了雷达能探测的最大距离——你必须给回波足够的时间返回，才能发下一个脉冲，否则新脉冲发出去之后，上一个脉冲的远距回波还没到，两者就混在一起，搞不清楚哪个是哪个。

$$R_{\max} = \frac{c \cdot \text{PRI}}{2}$$

占空比 (Duty Cycle) 是脉冲宽度占 PRI 的比例，典型值约 1%。这意味着脉冲雷达有 99% 的时间在接收，只有 1% 的时间在发射。功率消耗相对低，但对峰值发射功率要求很高——必须在短短 1 微秒内把能量打出去。

3.1.2 连续波雷达的工作方式

另一种思路是完全不停发射，同时持续接收。这就是**连续波雷达** (CW Radar, Continuous Wave Radar)。

一边发射一边接收，发射信号不会淹没掉微弱的回波吗？这确实是个难题，实际的连续波雷达要用物理隔离（天线分开）或者特殊的滤波技术来压制发射信号的泄漏。

连续波雷达在测速上有先天优势。发射信号是连续的，接收到的回波频率和发射频率的差值（多普勒频移）可以被非常精确地测量出来。测速雷达（俗称测速枪）和气象多普勒雷达，大多是连续波或调频连续波（FMCW）。

但连续波雷达有一个明显的弱点：直接测距难。因为发和收同时进行，不存在一个明确的“出发时刻”可以用来计时。FMCW（调频连续波）通过给发射频率加线性扫频的方式，间接实现了测距能力，这部分内容到第 4 章再展开。

两种方案的对比：

	脉冲雷达	连续波雷达
发射方式	短暂脉冲，间歇发射	持续发射
测距	直接，靠时间差	困难（FMCW 可间接实现）
测速	需要多个脉冲对比	优秀，直接读多普勒频移
收发隔离	天然隔离（时间分开）	需要额外处理
典型应用	军事雷达、气象雷达（远程）	测速枪、FMCW 汽车雷达

本书后续章节以**脉冲雷达**为主要分析对象，因为它的信号处理链条最完整、也是雷达入门学习的标准路径。

不管发射什么样的信号，电磁波离开天线之后，都要经历“碰到目标 → 被反射 → 回波返回”这个过程。信号在这段旅程里发生了什么？下一节来看。

3.2 反射与截面积

雷达发射的电磁波飞出去，遇到目标——飞机、船只、雨滴、地面——会发生什么？

答案非常神奇，既不是“全部反射回来”，也不是“全部穿透过去”，而是一个复杂的散射过程。

你想呀，现在突然对着前方大叫一声，山能反射回声，而苍蝇没有呢？（理论上，微乎其微）要是苍蝇能产生回声，那么生活得有多乱呀。理解这个过程，是理解为什么远距离目标的回波那么弱的第一步。

3.2.1 目标对电磁波的散射

光射到镜子上，大部分能量按特定方向反射——这是镜面反射。但电磁波打到飞机上，情况完全不同：飞机表面形状复杂，不同部位的曲率各异，能量向四面八方散射出去，只有一部分恰好朝着雷达的方向反射回来。

目标散射：能量向四面八方散射，只有一部分回到雷达

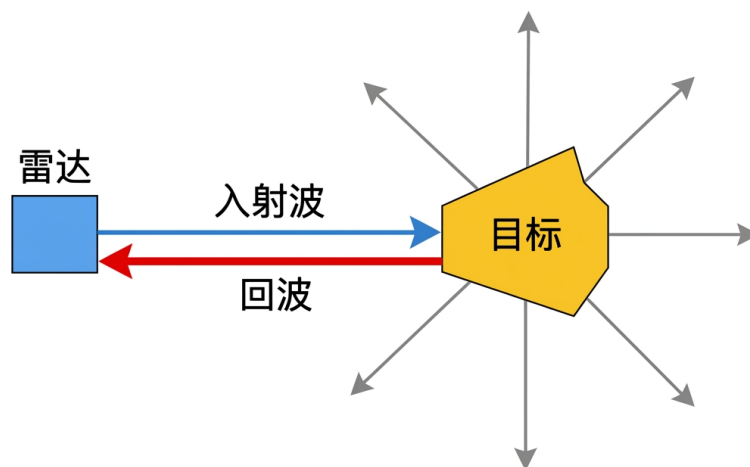


图 2: 目标散射示意图

这种散射的效率因目标形状、材质、电磁波频率的不同而差异巨大。一架隐身战斗机之所以难以被雷达发现，正是因为它的外形和涂层经过专门设计，把朝向雷达方向的散射能量压到极低。

我小时候就听说过隐形战斗机，以为飞机真的是肉眼见不到的。>_<

3.2.2 雷达截面积 (RCS)

工程师需要一个简洁的数字来描述目标对雷达的可见程度，这个数字叫**雷达截面积**，英文缩写 **RCS** (Radar Cross Section)，单位是平方米 (m^2)。

RCS 的定义有些绕：它不是目标的物理面积，而是一个**等效面积**。如果一个完美的镜面，能把射过来的能量，没有任何损失的反射给雷达，那么镜子面积等于这个 RCS。要是只能反射一半的能量，等效面积就是镜面面积的一半。

常见误区：RCS 不等于目标的物理几何面积。一根细长的金属杆，物理截面积积极小，但在某些角度下 RCS 可以远大于它的几何面积；反过来，一架大型飞机的 RCS 在某些角度可能比它的机翼面积小得多。RCS 衡量的是“散射回雷达方向的能量效率”，不是目标有多大。

换句话说，RCS 把目标的形状、材质、散射特性全部折叠成一个数，让雷达方程可以简洁计算。当然 RCS 是估算，并不是精确的数，不准很正常，干工程又不是做数学题。

几个典型目标的 RCS：

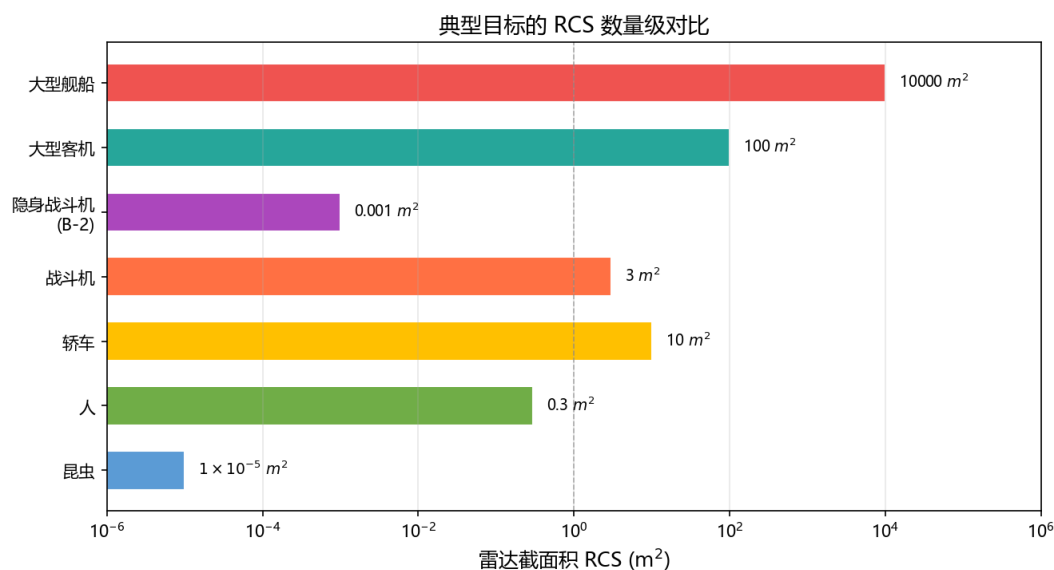


图 3: 典型目标 RCS 数量级对比

注意图中横轴是对数坐标——从昆虫到大型舰船，RCS 相差将近十个数量级。这意味着雷达接收到的回波功率差异同样巨大，信号处理必须能应对这种动态范围。

RCS 还有一个让初学者意外的特性：它不是固定值，而是随观测角度、雷达频率的变化而变化。

同一架飞机，正面迎向雷达和侧面对着雷达，RCS 可以相差 20 dB 以上（即 100 倍以上）。这就是为什么飞机在某些角度更容易被探测到，而特定机动动作有时能短暂降低被探测的概率。

高频雷达（毫米波）和低频雷达（米波）对同一目标测量出的 RCS 也可能差异显著——这与电磁波波长和目标尺寸之间的比例关系有关，这个话题到第 4 章讨论分辨率时会再涉及。

3.2.3 RCS 的工程意义

RCS 是雷达方程里的核心参数之一。雷达方程决定了在给定发射功率、天线增益、目标距离的条件下，接收机能接收到多少回波功率。RCS 越大，目标越“亮”，越容易被发现。

在下一节，我们来看另一个导致回波变弱的原因：距离衰减。即使 RCS 固定，目标离得越远，雷达能收到的功率就越少——而且衰减的速度比你想象的快得多。

3.3 距离衰减

你可能有过这样的体验：在山谷里喊一声，近处的石壁回声很响，远处山峰的回声轻得几乎听不见。距离越远，回声越弱，这不难理解。

但雷达的衰减比声音严重得多——功率随距离的衰减速率是距离四次方的倒数，写成公式就是 $1/R^4$ 。目标距离翻倍，接收到的功率变成原来的 $1/16$ ，不是 $1/4$ ，是 $1/16$ 。

这个“四次方”是哪来的？我们一步一步来看。

3.3.1 发射路径上的功率密度

雷达天线发射的功率不会全部集中在一条线上，而是向空间辐射，像一个（有方向偏好的）气球在膨胀。

先考虑最简单的情况：各向均匀辐射，没有方向偏好。功率 P_t 向所有方向均匀散开，到达距离 R 处时，这些功率分布在一个面积为 $4\pi R^2$ 的球面上。

各向均匀辐射：功率密度随 R^2 衰减

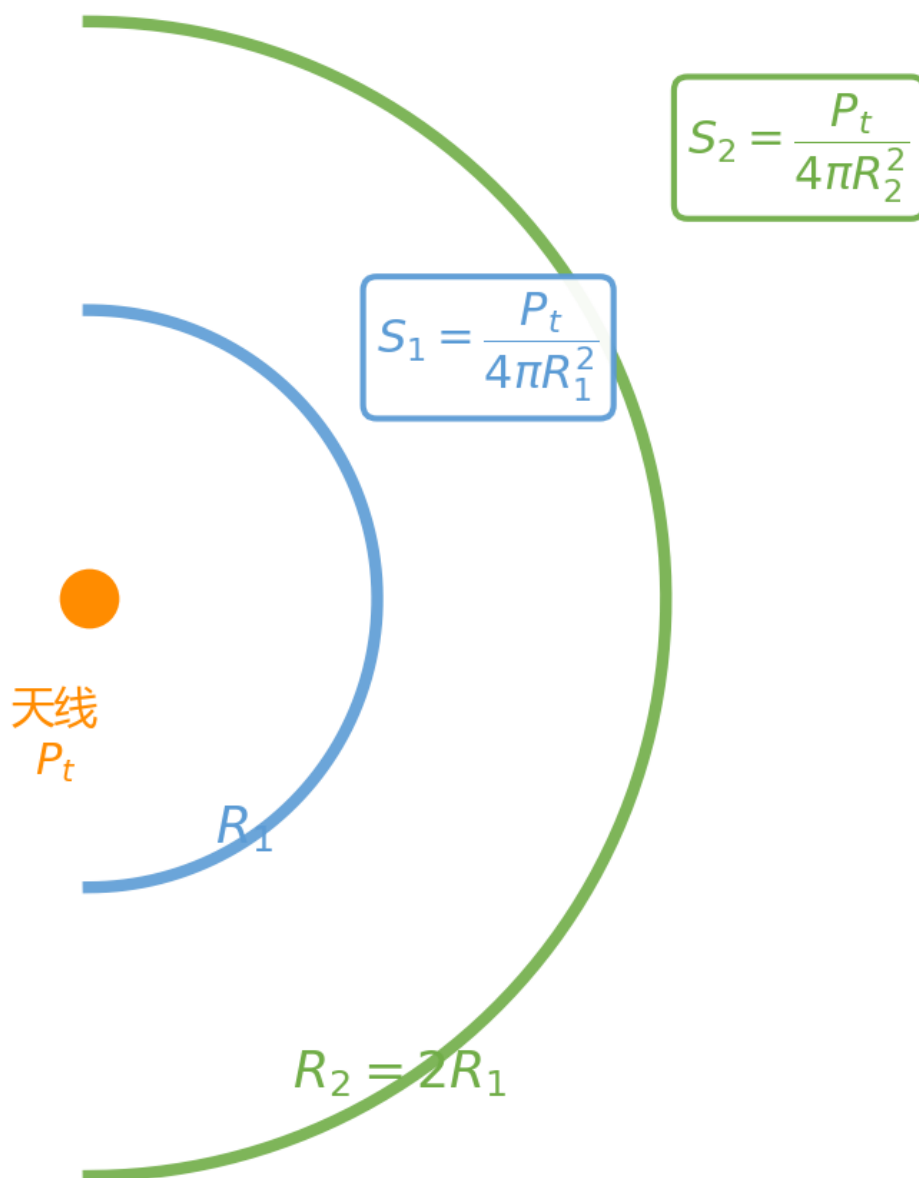


图 4: 球面辐射示意图

目标处的**功率密度**（单位面积接收到的功率）是：

$$S_1 = \frac{P_t}{4\pi R^2}$$

实际雷达天线有方向性，用天线增益 G 来描述它把功率集中在特定方向的能力。有方向性的天线发射方向上的功率密度是：

$$S_1 = \frac{P_t G}{4\pi R^2}$$

这是第一次 R^2 出现。

3.3.2 目标散射后的功率密度

目标在功率密度 S_1 的照射下，截获的功率正比于它的 RCS σ ：

$$P_{\text{intercepted}} = S_1 \cdot \sigma = \frac{P_t G \sigma}{4\pi R^2}$$

目标不是把所有截获的功率都送回雷达，而是向各方向散射。散射回雷达方向的功率，等效为从目标位置重新向外辐射，在距离 R 处（也就是雷达天线位置）产生的功率密度是：

$$S_2 = \frac{P_{\text{intercepted}}}{4\pi R^2} = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi)^2 R^4}$$

这是第二次 R^2 出现，两次叠加就是 R^4 。

3.3.3 接收功率与雷达方程

雷达接收天线不能把 S_2 全部收进来，只能收集它覆盖范围内的那一部分。天线的有效接收面积叫**有效孔径** A_e ，接收到的功率是：

$$P_r = S_2 \cdot A_e = \frac{P_t G \sigma A_e}{(4\pi)^2 R^4}$$

有效孔径 A_e 与天线增益 G 之间有一个关系。直觉上不难理解：天线增益越高，意味着它把能量越“聚焦”在特定方向，等效接收面积也越大；波长越长，天线与电磁波的耦合效率越高。这个关系从天线理论可以严格推导，此处直接引用结论：

$$A_e = \frac{G \lambda^2}{4\pi}$$

其中 λ 是电磁波波长。把这个代入上式，就得到**雷达方程**的基本形式：

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

我们用数值来感受下 $1/R^4$ 的衰减速度。

距离翻倍， R^4 变成 $2^4 = 16$ 倍，接收功率变成原来的 $1/16$ 。

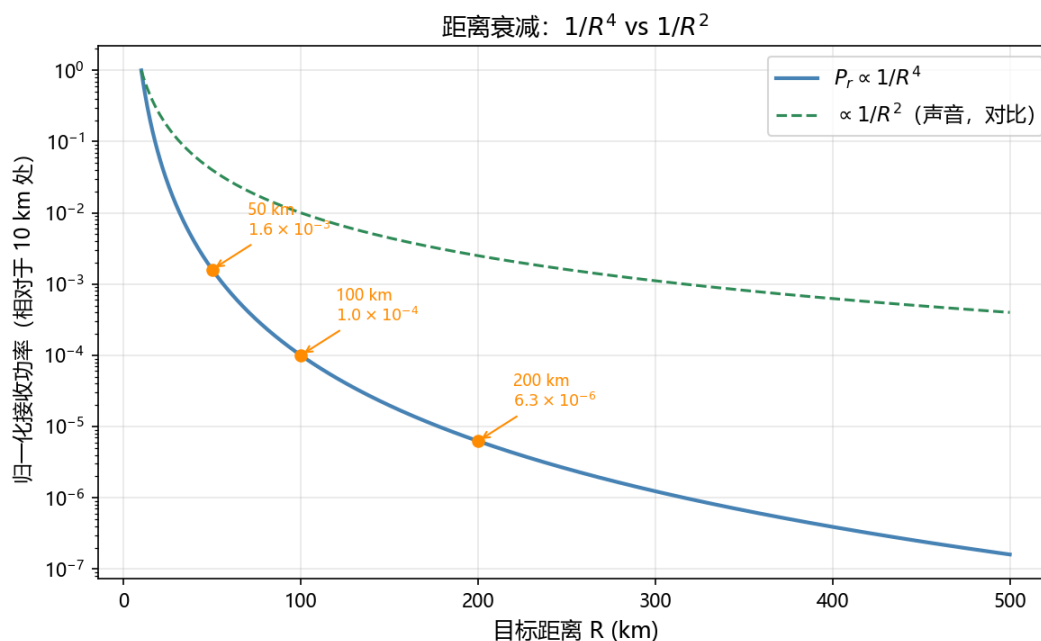


图 5: $1/R$ 距离衰减曲线

图中同时画出了声音的 $1/R^2$ 衰减作为对比。雷达回波需要走两次路（去和回），相当于两个 $1/R^2$ 叠在一起，衰减远比声音严苛。注意纵轴是对数坐标，曲线的斜率差异直接反映了衰减速率的差距。

举个具体数字说明量级：

- 目标在 100 km 处时， $R^4 = 10^{16}$
- 目标在 200 km 处时， $R^4 = 1.6 \times 10^{17}$ ，接收功率变成原来的 $1/16$

这就是为什么雷达要发射极高的峰值功率，哪怕发出兆瓦级的脉冲，经过来回各百公里的衰减，到达接收机的功率可能只剩下皮瓦 (10^{-12} W) 量级。

公式中其他几个参数的含义：

参数	含义	提高它的方法
P_t	发射功率	用更强的功率放大器
G	天线增益	用更大的天线，或相控阵
λ	波长（频率越高波长越短）	低频（长波长）更有利
σ	目标 RCS	取决于目标，雷达控制不了
R	目标距离	减少不了，只能靠提高其他项补偿

注意 λ^2 项：波长越长，接收功率越大。这是米波雷达能探测到某些隐身目标的原因之一——长波长让 λ^2 这一项更大，部分补偿了隐身涂层对 RCS 的压制。

这个公式只考虑了路径上的自由空间衰减。现实中还有大气吸收、雨衰、地面多径等额外损耗，完整的雷达方程会加入这些损耗因子。但基本结构不变： $1/R^4$ 始终是主导项，是雷达探测能力受到距离制约的根本原因。

信号经历了这一切衰减之后，回到接收端，还叠加了更多的变化。下一节看接收端实际收到什么。

3.4 接收端信号

经过一段漫长的旅途，回波信号终于返回雷达接收机。但这个信号已经不是当初发出去的那个样子了。接收端实际收到的，是原始发射信号经过四种同时叠加的变化之后的结果。

3.4.1 时间延迟

回波比发射信号晚到了 $\Delta t = 2R/c$ ，其中 R 是目标距离， c 是光速，因子 2 是因为信号要来回各走一遍。

一个距离 150 km 的目标，回波延迟是：

$$\Delta t = \frac{2 \times 150000}{3 \times 10^8} = 0.001 \text{ s} = 1 \text{ ms}$$

脉冲雷达正是靠测量这个 Δt 来计算目标距离的。时延测量精度越高，距离测量就越精确。

3.4.2 幅度衰减

上一节已经分析过：回波功率正比于 $1/R^4$ 。这意味着接收到的信号幅度极小，常常需要在接收机里做 60 dB 甚至 100 dB 以上的放大，才能在后续处理中使用。

100 dB 的放大是什么概念？ 10^{10} 倍，即一百亿倍。这也是雷达接收机设计的核心难点之一：在极高放大倍数下保证信号不失真、噪声不超标。

3.4.3 多普勒频移

如果目标相对于雷达有径向速度（靠近或远离），回波的频率会发生轻微偏移。这个现象叫**多普勒效应**，偏移量称为**多普勒频移** f_d ：

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

其中 v_r 是目标的**径向速度**（靠近为正）， λ 是雷达波长。

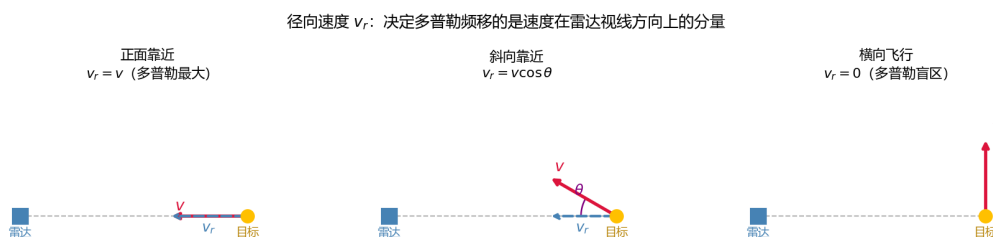


图 6: 径向速度分解示意图

三种典型情况：正面靠近时 $v_r = v$ ，多普勒频移最大；斜向靠近时 $v_r = v \cos \theta$ ，频移按角度缩减；横向飞行时 $v_r = 0$ ，频移为零。

举个数字：X 波段雷达 ($\lambda \approx 3 \text{ cm}$)，目标以 100 m/s 径向速度靠近：

$$f_d = \frac{2 \times 100}{0.03} \approx 6667 \text{ Hz} \approx 6.7 \text{ kHz}$$

相比发射频率 (10 GHz)，这 6.7 kHz 的偏移极其微小，时域波形上几乎看不出来。但在频域里，这是一根谱线相对于发射频率的位移——用第 2 章学过的频域分析工具，完全可以精确测量。

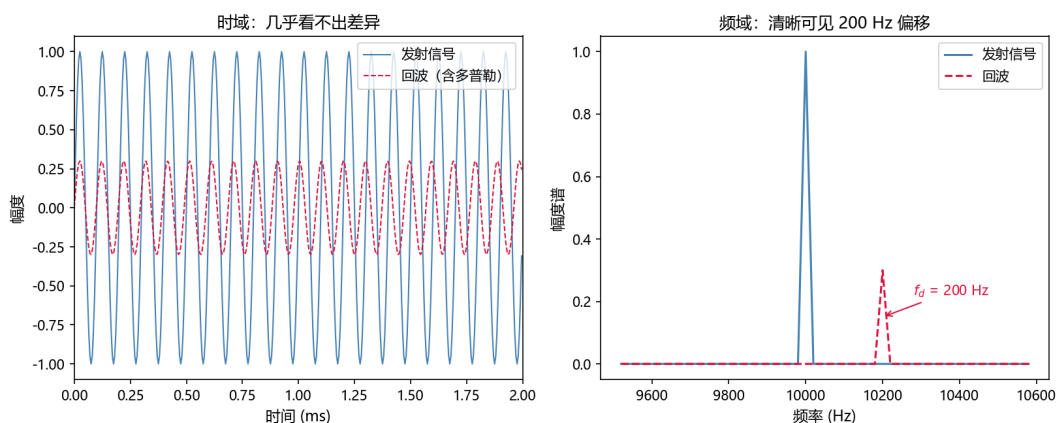


图 7: 多普勒频移：时域看不出，频域清晰可见

左图是时域波形，发射信号和含多普勒频移的回波几乎重叠，肉眼无法区分。右图切换到频域，两根谱线的位移一目了然。这就是为什么测速必须用频域的原因。

注意：公式里是**径向速度** v_r ，不是目标的总速度。如果目标横向飞行（运动方向与雷达视线垂直），径向速度为零，多普勒频移也为零——雷达无法从频率变化中感知到它的运动。低空侧飞的目标正是利用这一点来规避多普勒探测的。正如 3.1 节提到的，连续波雷达正是利用这一频移来测速，因此对横向目标同样存在这个盲区。

多普勒效应在雷达信号处理中的作用远不止测速——它是区分运动目标与静止杂波的核心手段。这部分内容将在第 5 章展开：如何用多普勒滤波器把飞机从地面回波中分离出来，以及脉冲多普勒雷达的工作原理。

3.4.4 噪声叠加

接收机自身的电子元器件在工作时会产生热噪声。任何温度高于绝对零度的电阻都在产生随机的电压波动，这些噪声无法消除，只能尽量压低。

噪声功率 P_n 由接收机的带宽 B 、系统温度 T 和噪声系数 F 共同决定：

$$P_n = kTBF$$

其中 $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K 是玻尔兹曼常数。带宽越宽，接收到的噪声越多；噪声系数 F 反映接收机自身引入的额外噪声，是接收机设计的核心指标之一。

在远距离目标的情况下，回波信号已经很微弱，而噪声的功率是固定存在的。信号能否被可靠检测，取决于**信噪比**（SNR，Signal-to-Noise Ratio）：

$$\text{SNR} = \frac{P_r}{P_n}$$

P_r 是回波功率， P_n 是噪声功率。SNR 越高，目标越容易被发现。

这四种效应同时叠加，构成了接收端面对的真实信号。接下来整个信号处理链——脉冲压缩、多普勒滤波、目标检测——都是在对抗这四种效应，从混乱中把目标信息提取出来。

3.5 小练习

这些练习围绕本章的三个核心内容展开：脉冲参数、距离衰减和回波中的多普勒信息。建议先自己算，再对照解析检查思路。

3.5.1 练习 1：往返时间与距离

问题：一部脉冲雷达探测到一个目标，测量到回波的时间延迟为 $\Delta t = 400 \mu\text{s}$ 。

- 目标距离雷达多远？（ $c = 3 \times 10^8$ m/s）
- 如果这部雷达的脉冲重复间隔 $\text{PRI} = 1$ ms，它能探测的最大不模糊距离是多少？

解析：距离由往返时延决定，因此

$$R = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{3 \times 10^8 \times 400 \times 10^{-6}}{2} = 60000 \text{ m} = 60 \text{ km}$$

最大不模糊距离由 PRI 决定，因此

$$R_{\max} = \frac{c \cdot \text{PRI}}{2} = \frac{3 \times 10^8 \times 10^{-3}}{2} = 150 \text{ km}$$

也就是说，这个目标距离 60 km，没有超过最大不模糊距离。若目标距离超过 150 km，就会出现距离模糊。

3.5.2 练习 2：距离衰减的量级感

问题：雷达方程中，接收功率正比于 $1/R^4$ 。

- (a) 目标从 50 km 移动到 100 km，接收功率变成原来的几分之几？
- (b) 目标从 100 km 移动到 400 km，接收功率变成原来的几分之几？
- (c) 如果 50 km 处的 SNR 是 30 dB，目标移到 100 km 时 SNR 是多少 dB？

如果你想把这些数量级和曲线一起看，可到公众号下载配套附件后运行 `ch03_exercise_radar_basics.m`。

解析：接收功率按 $1/R^4$ 衰减。

当距离从 50 km 变成 100 km 时，距离翻倍，因此功率变成

$$\frac{1}{2^4} = \frac{1}{16}$$

当距离从 100 km 变成 400 km 时，距离变成 4 倍，因此功率变成

$$\frac{1}{4^4} = \frac{1}{256}$$

功率下降到原来的 $1/16$ ，对应 dB 变化为

$$-10 \log_{10}(16) \approx -12 \text{ dB}$$

所以 SNR 会从 30 dB 降到约 18 dB。这说明目标距离一旦增加，回波强度会掉得非常快。

3.5.3 练习 3：多普勒频移计算

问题：一部 S 波段雷达，工作频率 $f_0 = 3 \text{ GHz}$ ，对应波长 $\lambda = 0.1 \text{ m}$ ，正在跟踪一架以 $v_r = 200 \text{ m/s}$ 径向速度靠近的飞机。

- (a) 多普勒频移 f_d 是多少？
- (b) f_d 相对于发射频率 f_0 的比例是多少？这说明什么？

如果你想把时域和频域的差别直观看出来，可到公众号下载配套附件后运行 `ch03_exercise_radar_basics`。

解析：多普勒频移满足

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2 \times 200}{0.1} = 4000 \text{ Hz} = 4 \text{ kHz}$$

相对于发射频率的比例为

$$\frac{f_d}{f_0} = \frac{4000}{3 \times 10^9} \approx 1.3 \times 10^{-6}$$

这说明多普勒频移虽然对测速非常关键，但它相对于载频本身只是一个极小的偏移。在时域上几乎看不出差别，必须借助频域分析才能把它稳定提取出来。

3.5.4 练习 4：脉冲参数设计

问题：一部脉冲雷达需要同时满足以下两个指标：

- 最大探测距离不小于 200 km
 - 脉冲宽度 $\tau = 1 \mu\text{s}$
- (a) PRI 至少需要多长？
- (b) 占空比是多少？
- (c) 如果发射机的平均功率限制为 1 kW，峰值发射功率最大能达到多少？

解析：若最大探测距离要达到 200 km，则 PRI 至少满足

$$\text{PRI} \geq \frac{2R_{\max}}{c} = \frac{2 \times 200000}{3 \times 10^8} \approx 1.33 \text{ ms}$$

实际取值时通常会留出余量，例如取 1.5 ms。

占空比为

$$\text{duty cycle} = \frac{\tau}{\text{PRI}} = \frac{1 \times 10^{-6}}{1.5 \times 10^{-3}} \approx 0.067\%$$

平均功率与峰值功率的关系为

$$P_{\text{avg}} = P_{\text{peak}} \times \text{duty cycle}$$

因此

$$P_{\text{peak}} = \frac{P_{\text{avg}}}{\text{duty cycle}} \approx \frac{1000}{0.00067} \approx 1.5 \text{ MW}$$

这说明脉冲雷达虽然平均功率不一定很高，但瞬时峰值功率可能非常大，这正是脉冲体制的典型特点。