

超宽带脉冲 雷达接收技术

余慧敏 韩明华 王生水 吴锋涛 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国家科技支撑计划项目 (2014BAK12B03) 资助出版

超宽带脉冲雷达接收技术

余慧敏 韩明华 王生水 吴锋涛 编著



机械工业出版社

本书系统地讲述了超宽带脉冲雷达接收机的基本理论和关键技术，主要内容包括超宽带脉冲雷达接收系统设计、穿墙雷达、生命探测雷达、探地雷达接收技术及接收信号处理方法。本书系统性强，论述深入浅出，可作为电子科学与技术、信息与通信工程、电子通信工程、计算机科学与技术、电气工程、控制科学与技术等专业高年级本科生和研究生的参考教材，也可作为电子信息领域科技工作者的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

超宽带脉冲雷达接收技术/余慧敏等编著. —北京: 机械工业出版社, 2017. 9

ISBN 978-7-111-58587-9

I. ①超… II. ①余… III. ①超宽带雷达 - 脉冲雷达 - 接收技术 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 295463 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张俊红 责任编辑: 朱林

责任校对: 张薇 封面设计: 路恩中

责任印制: 孙炜

保定市 中画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

145mm × 210mm · 6.125 印张 · 2 插页 · 175 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58587-9

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

现代雷达技术随着探测手段的演变和探测需求的提高不断发展,而且,现代社会军事及民用的环境越来越复杂,因此对雷达测量系统的分辨率和精度等性能要求越来越高。根据雷达信号基本理论,测量精度和距离分辨率主要取决于信号的带宽,为提高测距精度和距离分辨率,就要求信号具有更大的带宽。

超宽带脉冲雷达技术顺势而生具有如下优势:①测距分辨率可高达厘米量级,可以获得足够高的分辨率;②具有能够识别和区分各目标的重要能力;③超宽带生物雷达发射的脉冲包含许多频率,因此它能够突破窄带吸波材料的吸波效应;④具有对单个或多个目标的高分辨率成像能力;⑤具有较强的穿透植被、土壤和墙壁的能力;⑥能够通过距离选通技术抑制杂乱回波和减少多径干扰。且因其穿透性好、分辨率高、抗干扰能力强以及系统复杂度低等优越特性,超宽带脉冲雷达技术广泛应用于中短程高速无线通信、医学成像、防撞雷达、探地雷达、穿墙雷达等系统中。本书系统介绍了超宽带脉冲雷达接收原理与技术,介绍了超宽带脉冲雷达在生命检测、穿墙探测、对地探测应用中的系统设计及信号处理。

本书内容分为6章:

第1章介绍雷达接收机基本原理及理论,给出雷达接收机结构,分析接收机设计中主要的技术指标;

第2章介绍超宽带脉冲雷达接收系统主要技术指标关系及选值,给出系统设计实例并分析关键技术指标如何实现;

第3章介绍生命探测雷达接收机技术,包括系统结构设计、关键指标选取及具体系统案例分析;

第4章介绍超宽带穿墙雷达接收技术,包括穿墙雷达关键指标分

析、信号波形设计及选取、设计实例分析；

第5章介绍超宽带探地雷达接收机结构、回波信号特性及工程探地雷达设计实例分析；

第6章介绍现代超宽带脉冲雷达信号处理新技术，包括脉冲压缩处理方法、杂波抑制技术、检测技术及目标识别技术。

本书内容包括雷达接收机基础、超宽带脉冲雷达接收系统设计、生命探测雷达接收技术、穿墙雷达接收技术、探地雷达接收技术、超宽带信号处理，可以作为从事雷达系统相关领域研究、制造、维护、使用的工程技术人员，以及高等学校电子通信相关专业研究生和高年级本科生的教科书或参考书。

本书在编写过程中参考了大量国内外相关论著，吸收了较多国内外科研人员的先进思想和研究成果，在此，谨向各位致以诚挚的感谢。在本书的编写过程中，刘治平、邢先锋、高茜等分别参加了全书各章的资料收集、插图绘制等工作，机械工业出版社张俊红给予了大力支持和辛勤指导，在此表示衷心的感谢。

在编写本书的过程中，作者参考了大量的学术专著和论文，由于所参考的学术论文过多，无法一一标注和列出，对此特向这些文献的作者表示歉意，同时向从事超宽带脉冲雷达系统及信号处理的前辈专家、老师和同仁们表示由衷的敬意和感谢！

我们从事超宽带脉冲雷达的研究，先后得到国家科技支撑计划项目（项目编号：2014BAK12B03）和湖南省教育厅自然科学研究重点项目（项目编号：15A111）的资助，在此，一并表示谢意。

作者 2018 年 3 月于量子楼

目 录

前 言

第1章 雷达接收机基础	1
★ 1.1 雷达接收机的工作原理	1
★ 1.2 雷达接收机的基本理论	5
1.2.1 接收机噪声	5
1.2.2 匹配网络	10
1.2.3 采样	22
1.2.4 频率稳定度	30
★ 1.3 雷达接收机结构	36
1.3.1 射频前端	36
1.3.2 中频接收机	37
1.3.3 数字模块	38
1.3.4 雷达显示器	40
★ 1.4 雷达接收机的主要技术指标	41
第2章 超宽带脉冲雷达接收系统设计	46
★ 2.1 超宽带脉冲雷达基础	46
2.1.1 超宽带概念	46
2.1.2 超宽带脉冲类型分析	49
2.1.3 脉冲重复间隔设计	55
2.1.4 超宽带脉冲调制方式	57
2.1.5 超宽带脉冲雷达结构	61

2.1.6	超宽带脉冲雷达特点与应用	61
★ 2.2	超宽带脉冲雷达接收系统指标	65
★ 2.3	超宽带脉冲雷达接收系统设计	67
2.3.1	接收系统组成	67
2.3.2	低噪声设计	67
2.3.3	大动态设计	71
★ 2.4	超宽带脉冲雷达接收系统关键技术	74
2.4.1	关键技术	74
2.4.2	关键技术的一般说明	75
2.4.3	关键技术的实现方案	75
第3章	生命探测雷达接收技术	81
★ 3.1	接收机体制概述	81
★ 3.2	实时采样	83
★ 3.3	等效采样	85
3.3.1	采样门	87
3.3.2	采样门的比较与选择	92
3.3.3	采样脉冲发生器	100
★ 3.4	接收机性能评估	102
3.4.1	噪声	102
3.4.2	动态范围	103
★ 3.5	时序产生电路	106
3.5.1	斜坡比较	106
3.5.2	芯片延时	109
★ 3.6	典型的模拟等效采样接收电路	110
第4章	穿墙雷达接收技术	111
★ 4.1	穿墙雷达工作原理	111
★ 4.2	穿墙雷达典型产品	113

★ 4.3	穿墙雷达接收机技术	117
4.3.1	接收信号传播特性	117
4.3.2	接收信号特征与探测距离	120
★ 4.4	穿墙雷达接收机实例	130
4.4.1	原型设计	130
4.4.2	接收天线	131
4.4.3	显控设计	132
4.4.4	算法设计	133
第5章	探地雷达接收技术	135
★ 5.1	探地雷达工作原理	135
★ 5.2	探地雷达典型结构	136
★ 5.3	探地雷达接收机技术	137
5.3.1	接收信号的传播特性	138
5.3.2	接收信号特征与探测深度	143
5.3.3	接收信号采集技术	146
★ 5.4	探地雷达接收机实例	149
5.4.1	原型设计	149
5.4.2	电路制作	150
5.4.3	性能测试	157
第6章	超宽带接收信号处理	170
★ 6.1	数据预处理	170
★ 6.2	基于压缩感知的超宽带接收信号成像处理	171
6.2.1	后向投影算法	171
6.2.2	压缩感知理论	174
6.2.3	压缩感知成像算法	179
参考文献	187



雷达接收机基础

1.1 雷达接收机的工作原理

早期雷达系统接收机的功能是提取在天线输出端口出现的微弱回波信号，并且把它放大为可以显示的电平，使雷达操作员可以判断是否是目标回波信号。现代雷达接收机仍需提取微弱回波信号并且把它放大，此外还有更多的功能。雷达接收机可以运用匹配滤波器把峰值信号对平均噪声功率的比值最大化，去除不想要的信号，这些信号的波形与雷达发射信号不同。当杂波达到足以掩盖所要的目标回波时，接收机还必须想办法通过辨别运动目标的多普勒频移，把运动目标从固定杂波中分离出来。

现代雷达操作员很少仅仅通过观察显示器上未经处理的接收机输出，判断一个目标是否存在，检测判断已经更换为基于门限检测的自动方式。有关目标在距离和角度上的位置信息也可自动提取，而不是操作员的手动操作。在运转的空中监视雷达中，已经不再由操作员采用油性笔在显示器上标出目标扫描间的位置，计算目标的速度和估计目标的方向。目标被自动地截获和跟踪，只有处理过的轨迹才显示给操作员或送给某些自动装置做进一步处理。当雷达不能去除所有的杂波回波时，采用恒虚警率电路，防止跟踪计算机在用杂波回波建立轨迹时过载。接收机还具有抑制外部干扰及敌方电子干扰的功能，这些干扰妨碍目标的检测。除了检测和放大信号外，雷达接收机还完成其他许多功能，这些功能或直接是接收机的一部分，或与接收机有关。这些功能包括信号处理、信息提取、数据处理、电磁兼容及抗电子干扰。

雷达接收机大多采取超外差接收方式，超外差接收机的关键特征

是，它把射频输入信号转换成中频，在中频上要比在射频上更容易得到所需的滤波器形状、带宽、增益和稳定性。超外差接收机的优点之一是它的频率能够很容易地通过改变本地振荡器的频率而被改变。超外差雷达接收机第一级（或称前端）可以是一个射频低噪声放大器，如一个晶体管低噪声放大器。

在低噪声晶体管实用之前，如果混频器前面没有射频放大器，则接收机的前端就是混频器。在某些应用里，可能仍希望用混频器替代低噪声放大器作为前端。混频器作接收机的第一级，其动态范围要比用低噪声放大器作第一级的大。当消除杂波回波需要大的运动目标检测改善因子时，这一点可能会很重要。用混频器作前端可以得到额外的动态范围，有效减少大信号或干扰使接收机饱和的可能性。可以用较大的发射机功率和较大的天线增益来补偿由于混频器导致的较大接收机噪声系数。当军用雷达面对敌方噪声干扰时，较大的发射机功率和较大的天线增益都是有益的。尽管混频器前端比起低噪声晶体管放大器前端会有一些优点，但用低噪声放大器作第一级的超外差接收机仍是首选。

高性能空中监视雷达有时使用多种接收机，它们共用前端、混频器和中频级。第1个接收机可以是线性放大器和包络检波器，在没有杂波竞争的干净情况下检测目标。第2个接收机可像运动目标检测雷达那样用多普勒处理来消除杂波。它通过使用I和Q通道，以及数字信号处理对运动目标进行滤波。第3个接收机可以是对数-快时间常数特性或类似特性的接收机，用来协助检测在远处地面杂波范围之外的处于活动空气杂波里的目标。

通常，如果雷达工程师希望增加雷达的检测距离，可用的主要因素是发射机的平均功率和天线的面积。经典的雷达方程指出，通过减少接收机噪声系数可以增加距离，但实际上，雷达接收机的噪声系数已经相当低，任何进一步的减少只会产生不大的结果，有时是有害的结果，如果它明显地增加接收机成本，降低动态范围，使设备烧毁的危险大大增加，降低可靠性，那么进一步降低噪声系数可能就不合理。很灵敏的接收机也允许更多的干扰进入，有时干扰增加的代价促使提高接收机灵敏度，但这是有限度的。

雷达接收机必须具有足够的增益来提高微弱回波信号的电平，使它大到足够被处理或显示。在超外差接收机里，总增益被分配给中频和射频放大两部分。接收机应有足够的动态范围，这样，大的杂波回波不会引起接收机饱和，也不会降低运动目标检测改善因子。接收机要保证频率有一定的稳定度，不能引进不需要的相位或频率变化，因为它们会使回波信号畸变。接收机必须受到保护，以免过载、饱和且受强的干扰信号伤害。为了正确地提取目标信息，获取回波信号多普勒频移，需要定时信号和基准信号。

早期雷达接收机只能采用真空管技术，造成体积相对较大，现代雷达接收机的大小不再是个问题，目前的趋势是尽可能采用数字技术，把模拟器件限制在射频或中频段使用。

现代雷达信号的带宽一般很宽，其接收机设计有别于早期雷达，现代雷达接收机结构更加复杂，设计雷达接收系统时面临的首要问题是如何根据系统性能要求提出合理的方案，主要解决信号的瞬时带宽宽的问题，同时，接收机应是超宽带、高灵敏度、高信噪比和具有实时处理能力。而且，由于模-数转换器的发展和数字信号处理器速度的提高，数字接收机已成为实用的主流方向。在这种接收机中，输入被下变频成中频或基带信号，然后被高速 A-D 转换器数字化，再用 DSP 进行处理。在一般的实验系统中可采用采样示波器来接收数据，但随着信号带宽的增加，采样示波器的灵敏度和数据传输速率逐渐不能满足实时采样的要求，出现了频率通道接收机和时延通道接收机等通道式接收机。

进行雷达接收系统设计，首先要研究雷达方程。雷达方程集中反映了与雷达探测距离有关的指标及它们之间的相互关系，研究雷达方程可以用它来估算雷达的作用距离，可以深入理解雷达工作时各指标产生的影响，对于正确设计接收系统具有重要的指导作用。通常讨论在理想无损耗、自由空间传播时的雷达方程。设雷达发射功率为 P_t ，雷达发射天线的增益为 G_t ，则在自由空间工作时，距雷达天线 R 远处目标的功率密度 S_1 为

$$S_1 = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (1-1)$$

目标受到发射电磁波的照射，因其散射特性而将产生散射回波。散射功率的大小和目标所在点的发射功率密度 S_1 以及目标的特性有关。用目标的散射截面积 σ 来表征其散射特性。若假定目标可将接收到的功率无损耗地辐射出来，则可得到由目标散射的功率（二次辐射功率）为

$$P_2 = \sigma S_1 = \frac{P_1 G_1 \sigma}{4\pi R^2} \quad (1-2)$$

又假设 P_2 均匀地辐射，则在接收天线处收到的回波功率密度为

$$S_2 = \frac{P_2}{4\pi R^2} = \frac{P_1 G_1 \sigma}{(4\pi R^2)^2} \quad (1-3)$$

如果雷达接收天线的有效接收面积为 A_r ，则在雷达接收处接收回波功率为 P_r ，而

$$P_r = A_r S_2 = \frac{P_1 G_1 \sigma A_r}{(4\pi R^2)^2} \quad (1-4)$$

由天线理论知道，天线增益和有效面积之间有以下关系：

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (1-5)$$

式中， λ 为所用波长，则接收回波功率可写成如下形式：

$$P_r = \frac{P_1 G_1 G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1-6)$$

由此可以看出，接收的回波功率 P_r 反比于目标与雷达站间的距离 R 的四次方，这是因为一次雷达扫描中，反射功率经过往返双倍的距离路程，能量衰减很大。接收到的功率 P_r 必须超过最小可检测信号功率 S_{\min} ，雷达才能可靠地发现目标，当 P_r 正好等于 S_{\min} 时，就可得到雷达检测该目标的最大作用距离 R_{\max} 。因为超过这个距离，接收的信号功率 P_r 进一步减小，就不能可靠地检测到该目标。它们的关系可表达为

$$P_r = S_{\min} = \frac{P_1 G_1 G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R_{\max}^4} \quad (1-7)$$

或

$$R_{\max} = \left[\frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 S_{\min}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1-8)$$

由式(1-8)可见,要提高雷达作用距离,可以增大发射功率,提高天线增益,或者减小雷达的最小可检测信号。

1.2 雷达接收机的基本理论

★ 1.2.1 接收机噪声

1. 接收机中的噪声特性

雷达接收机的主要任务是微弱信号的提取。雷达接收机的工作频率范围包括毫米波、微波、超高频、高频、中频、视频,其信号形式有模拟信号和数字信号,因而雷达接收机设计所涉及的理论也相当广泛。对于雷达接收机而言,从理论上讲,不管输入信号多么微弱,接收机都可以把它放大到足够的程度而加以辨识,但在实际中是做不到这一点的。这是由于不但接收机内部会产生噪声,而且从外部也会输入噪声,接收机在放大信号的同时也放大了噪声。当信号太弱时,它将淹没在噪声之中不能辨别。尽管可用尽量降低接收机内部噪声、脉冲压缩、信号累积等方法来提高信噪比,但是信号输入功率必须达到所要求的最小值。

2. 接收机中噪声的概率特性

噪声是随机信号,下面将用频域的描述方法为这种随机信号建立一个简单的数学模型。

对任一噪声,都可以用傅里叶展开式表示为

$$f(t) = \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos \omega_m t + b_m \sin \omega_m t \quad (1-9)$$

当对该噪声观察时间足够长时, a_m 和 b_m 相互独立,且都服从正态分布,即

$$\overline{a_m} = \overline{b_m} = 0 \quad (1-10)$$

$$\overline{a_m^2} = \overline{b_m^2} = \sigma_m^2 \quad (1-11)$$

式(1-9)可以写成

$$f(t) = \sum_{m=1}^{\infty} c_m \cos(\omega_m t - \phi_m) \quad (1-12)$$

$$c_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2} \quad (1-13)$$

$$\phi_m = \arctan\left(\frac{b_m}{a_m}\right) \quad (1-14)$$

正态噪声 $f(t)$ 经过窄频带滤波电路以后, 输出电压 $e(t)$ 。 $e(t)$ 可以看作一调制以后的信号, 其载波频率是 ω_0 , 包络是缓慢变化的随机变量 $E(t)$, 相位也是一个缓慢变化的随机变量 $\phi(t)$ 。其表达式为

$$e(t) = a(t) \cos \omega_0 t + b(t) \sin \omega_0 t \quad (1-15)$$

式中, $a(t)$ 和 $b(t)$ 都为服从正态分布的随机变量。式 (1-15) 也可改写为

$$e(t) = [E(t) \cos(\omega_0 t - \phi(t))] \quad (1-16)$$

$a(t)$ 和 $b(t)$ 的联合概率密度为

$$p(a, b) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{a^2+b^2}{2\sigma^2}} \quad (1-17)$$

式中, σ^2 为 $a(t)$ 和 $b(t)$ 的方差。

幅度 $E(t)$ 的概率密度为瑞利分布, 相位 $\phi(t)$ 的分布为平均分布, 即

$$p(E) = \frac{E}{\sigma^2} e^{-E^2/2\sigma^2} \quad (1-18)$$

当接收机有信号 $s(t) = A \cos \omega_0 t$ 时, 其窄频带噪声加正弦信号的分布为广义瑞利分布, 其表达式可写为

$$e'(t) = [a(t) + A] \cos \omega_0 t + b(t) \sin \omega_0 t \quad (1-19)$$

或

$$e'(t) = R(t) \cos(\omega_0 t - \theta t) \quad (1-20)$$

$e'(t)$ 中 r 、 a 的概率密度分布为

$$p(r, a) = r e^{\left(\frac{r^2+a^2}{2}\right)} I_0(r, a) \quad (1-21)$$

式中, $r = R/\sigma$; $a = A/\sigma$; R 为噪声加信号合成信号包络; A 为信号电压包络; σ 为噪声的均方差; I_0 为零阶贝塞尔函数。

概率密度分布曲线 (广义的瑞利分布曲线) 如图 1-1 所示。

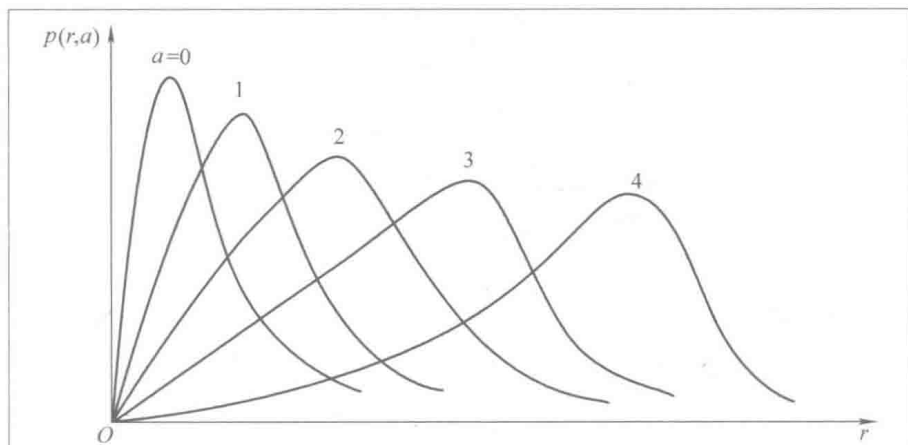


图 1-1 广义的瑞利分布曲线

当瑞利分布的噪声通过对数接收机后，其输出的方差为常量，与输入的干扰或噪声强度无关，这正是对数接收机具有恒虚警特性的原因。

3. 接收机中的噪声种类

噪声是限制接收机灵敏度的主要因素。接收机噪声的来源是多方面的：从接收机内部来说，电路中的电阻元件、放大器、混频器等都会产生噪声；从接收机外部来说，噪声是通过天线引入的，有天线热噪声、天电干扰、宇宙干扰、电源干扰和工业干扰等。这些干扰的频谱各不相同，它对雷达接收机的影响程度与雷达所采用的频率和工作体制有着密切的关系。由于雷达的工作频率很高，进入接收机的外部噪声除了敌方有意释放的干扰以外，主要是天线的热噪声。所以，一般情况下，接收机的噪声主要来源于电阻噪声、天线的热噪声和接收机的噪声。

(1) 电阻噪声

一个有一定电阻的导体，只要它的温度不是热力学温度零度，它内部的自由电子总是处于不规则运动的状态，在没有外加电压的情况下，这种不规则的电子运动也会在导体内形成电流，从而在导体两端产生电压。当然，这种电流和电压是随机的。一般有耗传输线就属于这种噪声。

电阻的热噪声所产生的电压的方均值是

$$\overline{e^2} = 4kRT\Delta f \quad (1-22)$$

式中, k 为玻耳兹曼常数, $k \approx 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; R 为热电阻的阻值; T 为电阻的热力学温度; Δf 为接收机的带宽。

当电阻与外负载匹配时, 其加至负载的有效噪声功率 $P_n = kT\Delta f$, 显然热噪声功率只与电阻的热力学温度和接收机的带宽有关。

(2) 天线的热噪声

这是从接收机外部进来的噪声, 它是由于天线周围的介质热运动产生的电磁波辐射被天线接收而进入接收机的, 其性质与电阻热噪声相似。

假设该天线周围的介质是均匀的, 温度为 T_A , 则天线的热噪声的电压方均值可表示为

$$\overline{e_A^2} = 4kR_A T_A \Delta f \quad (1-23)$$

式中, R_A 为天线辐射电阻。

同样, 当天线的辐射电阻和接收机的输入电阻相等时, 天线的有效噪声功率为

$$P_A = kT_A \Delta f \quad (1-24)$$

(3) 接收机的噪声

接收系统可以看成是多级传输网络, 噪声可以在任何一级中产生, 其系统的噪声功率同样可表示为

$$P_r = kT_e \Delta f \quad (1-25)$$

式中, P_r 为接收机内部噪声折合到输入端的等效值; T_e 为接收机内部噪声折合到输入端的等效噪声温度。

在一个雷达系统中, 其接收系统噪声温度可用式 (1-26) 计算

$$T_s = T_A + T_e + L_T T_r \quad (1-26)$$

式中各物理量的含义如图 1-2 所示。

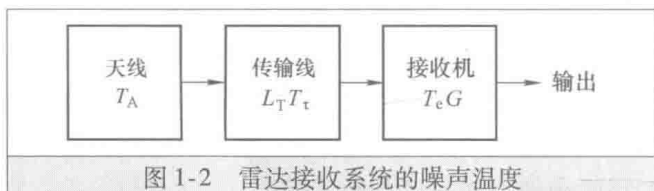


图 1-2 雷达接收系统的噪声温度

4. 接收机的噪声系数

噪声系数是表征接收机内部噪声大小的一个物理量。前已述及，噪声是限制接收机灵敏度的根本原因。因此，衡量接收机中信号功率和噪声功率的相对大小是接收机能否正常工作的一个重要标志。通常用 S 代表信号功率， N 代表噪声功率， S 和 N 的比值，叫作“信号噪声比”，简称“信噪比”。显然，信噪比越大，越容易发现目标；信噪比越小，越难发现目标。

一个理想的接收机，它本身只放大天线所输入的的信号和噪声，而不另引入其他噪声，但实际的接收机总是要产生内部噪声的，因此在输出的噪声中，除了天线的热噪声外，还有接收机本机的噪声。

用 S_i/N_i 表示接收机输入端的信噪比， S_o/N_o 表示输出端的信噪比，将它们的比值定义为接收机的噪声系数，用 F 表示，即

$$F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o} \quad (1-27)$$

在通常情况下， $F > 1$ ；当接收机内部不产生噪声时， $F = 1$ 。显然 F 表征了接收机内部噪声的大小， F 值越小越好。

式 (1-27) 又可写成

$$F = \frac{N_o/N_i}{S_o/S_i} = \frac{N_o}{GN_i} \quad (1-28)$$

式中， G 为接收机的功率增益。

由此可见，噪声系数的大小与信号功率的大小无关，仅仅取决于总的输出噪声功率与天线热噪声经过接收机后的输出功率的比值。显然，总的输出噪声功率 N_o 包括了天线的噪声功率 N_{ao} 与接收机的噪声功率 N_{ro} ，即

$$F = \frac{N_{ao} + N_{ro}}{GN_i} = \frac{GN_a + GN_r}{GN_i} = \frac{N_a + N_r}{N_i} \quad (1-29)$$

由于 $N_a = kT_a \Delta f$ ， $N_r = kT_r \Delta f$ ，所以

$$T_r = (F - 1) T_a \quad (1-30)$$

把式 (1-30) 作为接收机噪声系数与噪声温度的关系。通常天线温度取常温值，即 $T_a = 200\text{K}$ ，噪声系数的大小直接与噪声温度有关。

一般来说，接收机通常是由多级放大器、混频器和滤波器等连接