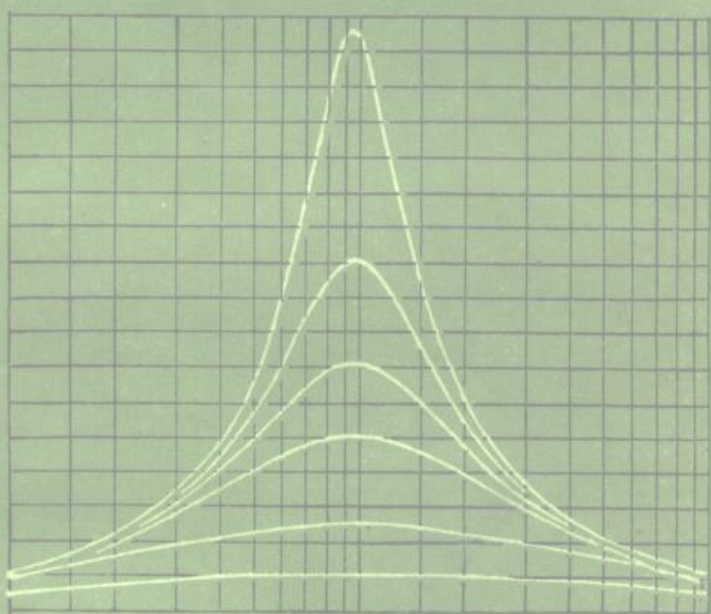




数字与模拟电子线路教学小丛书

调频解调技术

王恒山 编



高等教育出版社

73.75
1-3

数字与模拟电子线路教学小丛书

调频解调技术

王恒山 编

高等教育出版社

内 容 简 介

本书讲述模拟调频信号解调的理论和方法,引入了一些比较新的内容。全书共五章,包括:调频的基本概念、普通鉴频器、锁相鉴频器、调频负反馈鉴频器和调频立体声信号的解调,书中附录还引入了一些用于调频解调的集成电路的应用资料。

书中叙述深入浅出,既有理论分析,又注意介绍设计方法和实际应用。本书可供高等院校无线电技术及相关专业的师生和工程技术人员阅读,也可供从事自学的广大无线电爱好者参考。

数字与模拟电子线路教学小丛书

调频解调技术

王恒山 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京顺义县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 9.375 插页 2 字数 190 000

19 89 年 10 月第 1 版 19 89 年 10 月第 1 次印刷

印数 00 001— 1 800

ISBN 7-04-000020-2/TN·5

定价 2.45 元

前 言

调频制是现代传送信息所用的主要调制制式之一，它广泛用于通信、广播、遥测、遥控等方面。使用的频率范围很宽，包括中短波、超短波以及微波等波段。根据所调制的信号，调频又可分为模拟信号调频和数字信号调频。

本书讲述模拟调频的解调技术。在内容安排上，本书力求反映现代调频解调技术的新发展，力求理论联系实际。在讲述各种调频解调器时，既有理论分析，又注意介绍设计方法和实际应用(书中附录还引入了一些集成电路的应用资料)。为便于读者自学，在讲述时力求系统完整，注重讲清物理概念。因此，本书亦可供有关专业的科技人员及广大从事自学的无线电爱好者阅读。

全书共分五章。为叙述方便，第一章讲述调频的基本概念，第二章讲述普通鉴频器，第三、四章讲述环路鉴频器，第五章讲述调频立体声信号的解调。

本书由北京邮电学院梅邨副教授审稿。作者在编写过程中得到哈尔滨工业大学张乃通教授、贾世楼副教授等同志的指导和帮助，有关工厂提供了宝贵的应用资料，在此一并致谢。

限于作者的水平，书中难免有错误和不妥之处，衷心希望广大读者批评指正。

编 者

1986年8月于哈尔滨工业大学

目 录

第一章 调频的基本概念	1
1.1 引言.....	1
1.2 调频波的性质.....	5
1.2.1 调频波及调相波.....	5
1.2.2 调频波的频谱与频带宽度.....	10
1.3 调频方法概述 调频发射机.....	18
1.3.1 间接调频法.....	18
1.3.2 直接调频法.....	21
1.4 调频接收机.....	24
第二章 普通鉴频器	27
2.1 引言.....	27
2.2 时域微分鉴频器.....	32
2.3 脉冲计数式鉴频器.....	35
2.3.1 采用直接微分法的脉冲计数式鉴频器.....	35
2.3.2 采用延时电路的脉冲计数式鉴频器.....	36
2.4 斜率鉴频器.....	38
2.4.1 单失谐回路斜率鉴频器.....	38
2.4.2 双失谐回路斜率鉴频器.....	44
2.4.3 宽带双失谐回路斜率鉴频器.....	51
2.5 陶瓷与晶体鉴频器.....	54
2.5.1 串联差动式陶瓷鉴频器.....	55
2.5.2 不平衡式陶瓷鉴频器.....	63
2.5.3 陶瓷与晶体鉴频器的工作频带的展宽.....	66
2.6 电容耦合相位鉴频器.....	68
2.7 比例鉴频器.....	77
2.7.1 基本电路和鉴频原理.....	77
2.7.2 比例鉴频器的限幅原理.....	83

2.8 移相乘积鉴频器	87
2.8.1 移相乘积鉴频器的工作原理	88
2.8.2 移相乘积鉴频器应用举例	93
2.9 差动峰值鉴频器	97
2.9.1 差动峰值鉴频器的工作原理	97
2.9.2 差动峰值鉴频器应用电路	102
2.10 普通鉴频器的鉴频特性调整和指标测试	109
2.11 限幅器	114
2.11.1 三极管限幅器	115
2.11.2 二极管限幅器	119
2.12 调频制的抗干扰性	121
2.12.1 调频系统的信噪比	121
2.12.2 门限效应	129
2.12.3 预加重-去加重技术	135
附录 2.1 常用调频中频放大与鉴频集成电路	140
附录 2.2 部分调频中频放大与鉴频集成电路的应用电路	142
第三章 锁相鉴频器	146
3.1 锁相环原理	146
3.1.1 锁相环路的组成	146
3.1.2 锁相环路的工作过程	152
3.1.3 锁相环路的相位模型及环路的基本方程式	157
3.1.4 锁相环路的线性性能	158
3.2 锁相鉴频器的工作原理	171
3.2.1 锁相鉴频原理	171
3.2.2 锁相鉴频器的性能	172
3.2.3 低门限设计	176
3.3 锁相鉴频器设计的步骤和举例	189
3.3.1 设计的说明	189
3.3.2 设计举例	193
第四章 调频负反馈鉴频器	201
4.1 调频负反馈环的工作原理	201

4.1.1 调频负反馈环的组成	201
4.1.2 调频负反馈环的线性性能	207
4.1.3 鉴频原理	208
4.2 输入噪声对环路的影响	209
4.2.1 环路的相加噪声相位模型	209
4.2.2 鉴频门限	213
4.3 调频负反馈鉴频器的设计	216
4.3.1 采用调频负反馈鉴频器的调频解调系统	216
4.3.2 低门限设计	218
4.3.3 延迟对门限的影响	227
4.3.4 设计步骤和举例	230
4.4 复合环与多级环低门限解调	235
4.4.1 调频负反馈-锁相复合环鉴频器	236
4.4.2 正切锁相鉴频器	237
4.4.3 相位反馈锁相鉴频器	239
第五章 调频立体声信号的解调	240
5.1 立体声原理	240
5.1.1 什么是立体声	240
5.1.2 听觉定位原理	242
5.1.3 双扬声器实验	246
5.1.4 双声道立体声系统的拾声方式	250
5.2 双声道调频立体声广播	258
5.2.1 导频制调频立体声广播	259
5.2.2 极性调幅制调频立体声广播	262
5.2.3 双声道调频立体声接收机	264
5.3 导频制立体声解调器	268
5.3.1 矩阵式解调器	268
5.3.2 开关式解调器	269
5.3.3 集成电路立体声解调器	274
附录 5.1 常用立体声解调集成电路	285
附录 5.2 常用立体声解调集成电路的应用电路	286
参考文献	289

第一章 调频的基本概念

1.1 引言

通信是每个人生活中不可缺少的组成部分，人们用各种方式进行通信。电通信以其快速、便利、通信距离远而获得广泛应用。图 1-1-1 的框图可说明电通信的过程，该图就是通信系统的组成框图。

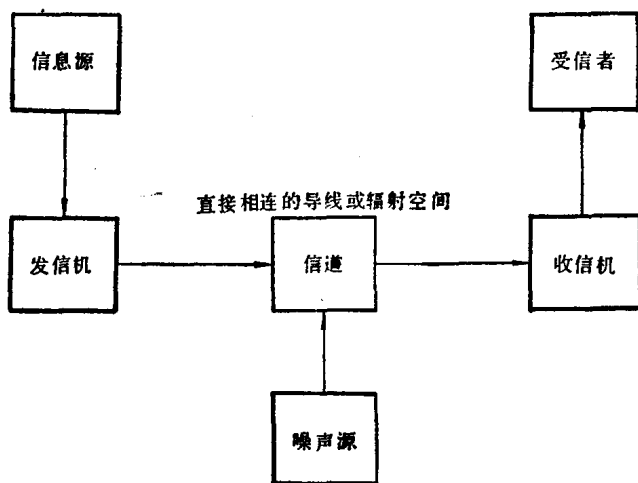


图 1-1-1 通信系统组成框图

信息源产生含有信息的电信号，它可以是从微音器输出的信号、磁带录音机磁头的感应电流、光电二极管输出的光电

流和表示数据的计算机的二进制电压等。为了有效地实现信息传输,要对这些待传送的信号进行处理,常用的处理方法是调制。图 1-1-1 中,待传送的信号由发信机进行调制,并放大成适于沿导线发送或通过空间辐射的形式;收信机解调出信号,并送给受信者,受信者可以是人,也可以是计算机。信息在传输过程中,要受到噪声的干扰。图 1-1-1 中,所有的噪声都被简化为是由信道引起的。

调制是使高频波的某个特性随着待传送信号而变化的一种过程。被调制的高频波叫做载波;用以调制高频波的待传信号叫做调制信号。业经调制的高频波叫做已调波。

载波的波形有许多种。由于正弦波易于产生,因此它是最常用的载波波形。例如采用下列波形

$$u(t) = A(t) \cos \theta(t) = A(t) \cos [\omega_0 t + \theta'(t)] \quad (1-1-1)$$

式中 $\theta(t) = \omega_0 t + \theta'(t)$, 该高频正弦波有三个参量可随调制信号而变化。当振幅 $A(t)$ 随调制信号的强弱而线性变化时,这种调制称为振幅调制,简称调幅。当 $\frac{d\theta(t)}{dt}$ (即载波的瞬时频率) 随调制信号的大小而线性改变时,这种调制称为频率调制,简称调频。当 $\theta'(t)$ 随调制信号的大小而线性变化时,这种调制称为相位调制,简称调相。这三种调制的已调波分别叫做调幅波、调频波和调相波;而这三种调制方式分别称为调幅制,调频制和调相制。

利用调制所以能有效地实现信息传输,是由于调制具有如下功能:

1. 频率变换

通过调制可以将调制信号的频谱搬移到我们希望得到的频率位置上去。例如，可以将待传送的信号频谱搬移到高频率位置上，以便于辐射。由“电磁理论”可知，一个有效的电能辐射器(天线)，其大小至少必须有波长的量级。1 kHz 语音电波的波长为 300 km。如果天线为 $\frac{1}{4}$ 波长的话，则为了辐射 1 kHz 的电波其天线长度将为 75 km，这是不切实际的。当用调制方法，将调制信号的频谱搬移到较高的频率上时，方可设计出切实有效的天线。

调制还具有更重要的实践意义，它可以将不同的调制信号频谱搬移到相互没有重叠的各自的频带上。这些已调信号同时在空间传播，也不会造成相互间的混叠和干扰。比如，在 550~1600 kHz 调幅无线电广播频段内，共有间隔为 10kHz 的 100 个信道。无线管理委员会严格地划分并监督各广播电台的发射频率，只允许其在规定的信道上工作。接收机则可以根据各广播电台使用的不同载波频率选择各自欲接收的信号。

2. 实现信道复用

各种不同的信道，其传输容量是不等的。如果传输信号的参数小于信道允许范围，那么就意味着存在信道复用的可能性。例如，把几个语音信号的频谱，用调制方法将它们各自搬移一个恰当的数值，使各个信号占据在相邻但不重叠的频带上，然后统一送入(或者再经过一次调制后送入)信道中去。由于它是在频率域内实现信道复用的，故称为频率复用。又如，把几个语音信号通过不同时间的取样，然后将它们的取样

值轮流送入信道内传输，也可达到复用的目的，称为时间复用。脉冲编码调制是实现时间复用的典型例子。

3. 提高抗干扰性能

采用不同的调制方式，已调波的带宽可以不同。通过后面的分析我们会看到，宽带调频的抗噪声性能优于基带系统及所有调幅系统。

如果按调制信号的不同来分，调制又可分为模拟调制与数字调制。前者所用的调制信号是连续变化的模拟量，通常可用单频正弦波为典型代表；后者的调制信号是离散的数字量，通常可用二进制数字脉冲为典型代表。

如果按载波信号的不同来分，调制还可以分为连续波调制和脉冲调制。前者的载波是连续波型，通常用正弦波；后者的载波是脉冲波形，常用矩形脉冲。

应该指出，调制方式对通信系统来说是至关重要的，它在很大程度上决定了系统的构成和可能达到的性能指标。与调幅制相比，调频制可以具有较高的传输质量、抗噪声性能和载波功率利用系数。因此，调频制广泛地应用在通信、广播、遥测和遥控等各个方面。不过，为了提高抗噪声性能就得采用宽带调频。宽带调频波所占的频带比调幅波宽，在同一频段中能容纳的调频电台较调幅电台为少，故调频制通常只用在超高频波段上。

本书讨论连续波模拟调频的解调技术。第一章介绍调频的基本概念，讲述调频、调相的意义，调频波的性质，调频方法及调频系统的组成。

1.2 调频波的性质

1.2.1 调频波及调相波

如前所述, 调频时载波的瞬时频率随调制信号的大小而线性变化。设调制信号为 $u_m(t)$, 则调频波的瞬时频率为

$$\omega(t) = \omega_0 + k_f u_m(t) \quad (1-2-1)$$

式中, ω_0 为未受调制时的载波角频率; $k_f u_m(t)$ 为调制后角频率的变化量, 称为频率偏移。它和调制电压成正比, k_f 为比例系数, 称作调频常数。这时调频波的相位可表示为

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \omega_0 t + k_f \int_0^t u_m(t) dt \quad (1-2-2)$$

上式中选取不同的时间轴可使积分常数为零。将式(1-2-2)代入式(1-1-1)中, 并令 $A(t) = U_m = \text{常数}$, 那么调频波的数学表达式为

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cdot \cos \left[\omega_0 t + k_f \int_0^t u_m(t) \cdot dt \right] \\ &= U_m \cdot \cos [\omega_0 t + \theta'(t)] \end{aligned} \quad (1-2-3)$$

式中 $\theta'(t) = k_f \int_0^t u_m(t) dt$ 是因调制引起的相位的变化量, 称为相位偏移。当调制信号为单音信号

$$u_m(t) = U'_m \cos \omega_m t \quad (1-2-4)$$

时, 调频波的瞬时频率为

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega_0 + k_f U'_m \cos \omega_m t \\ &= \omega_0 + \Delta \omega_p \cdot \cos \omega_m t \end{aligned} \quad (1-2-5)$$

式中 $\Delta \omega_p = k_f U'_m$ 是调频波角频率的最大偏移, 简称最大频

偏, 又称峰值频偏。

由式(1-2-4)及式(1-2-5)知, 在调频波中是以频率的变化反映调制信号波形的, 频率变化的快慢与调制信号的频率一致。

由式(1-2-5)可得调频波的相角

$$\begin{aligned}\theta(t) &= \int_0^t \omega(t) dt \\ &= \omega_0 t + \frac{\Delta\omega_p}{\omega_m} \sin \omega_m t\end{aligned}\quad (1-2-6)$$

式中略去了积分常数。由此得单音调制信号的调频波表达式为

$$u(t) = U_m \cdot \cos \left[\omega_0 t + \frac{\Delta\omega_p}{\omega_m} \sin \omega_m t \right] \quad (1-2-7)$$

式中 $\frac{\Delta\omega_p}{\omega_m}$ 是最大相位偏移, 称作调制指数或调频指数, 又

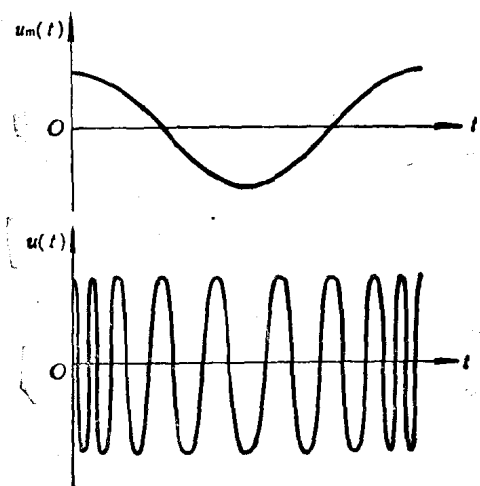


图 1-2-1 调频波的波形

称峰值调制指数,以符号 m 表示

$$m = \frac{\Delta\omega_p}{\omega_m} \quad (1-2-8)$$

或

$$m = \frac{\Delta f_p}{f_m} \quad (1-2-9)$$

式中 $\Delta f_p = \frac{\Delta\omega_p}{2\pi}$, $f_m = \frac{\omega_m}{2\pi}$ 。在调幅波中调制指数不能大于1;

在调频波中,调制指数不受这一限制。

调制信号与对应的调频波的波形如图 1-2-1 所示。瞬时频率 $\omega(t)$ 及相位偏移 $\theta'(t)$ 的波形如图 1-2-2 所示。

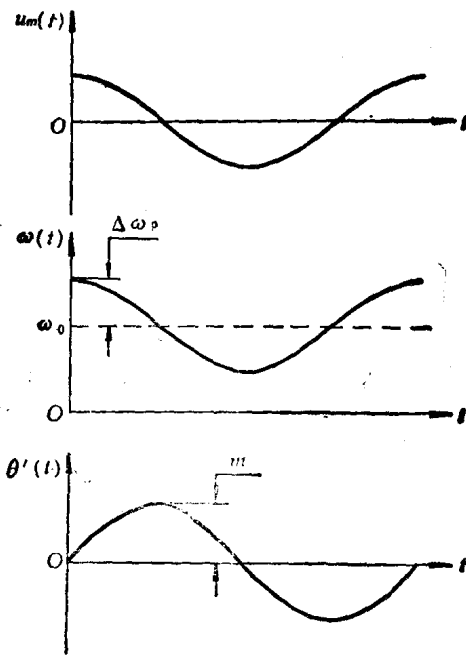


图 1-2-2 调频波的瞬时频率与相位偏移的波形

由于瞬时频率 $\omega(t)$ 和相角 $\theta(t)$ 具有确定的关系: $\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt$ 或 $\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}$, 因此调频和调相也必定有联系。

调相时, 载波的瞬时相位随调制信号 $u_m(t)$ 线性地变化, 即

$$\theta(t) = \omega_0 t + k_p u_m(t) = \omega_0 t + \theta'(t) \quad (1-2-10)$$

其中 $\theta'(t) = k_p u_m(t)$ 是因调制引起的相位变化量, 称相位偏移。它和调制电压成正比。 k_p 为比例系数, 称作调相常数。

将式(1-2-10)代入式(1-1-1)中, 并令 $A(t) = U_m =$ 常数, 得调相波的数学表达式为

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos[\omega_0 t + k_p u_m(t)] \\ &= U_m \cos[\omega_0 t + \theta'(t)] \end{aligned} \quad (1-2-11)$$

在调相过程中伴随有频率的变化, 由式(1-2-10)可得瞬时频率为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \omega_0 + k_p \frac{du_m(t)}{dt} \quad (1-2-12)$$

在调制信号 $u_m(t) = U'_m \cos \omega_m t$ 情况下, 调相波的相位为

$$\theta(t) = \omega_0 t + k_p U'_m \cos \omega_m t \quad (1-2-13)$$

式中 $k_p U'_m$ 是最大相位偏移, 称调制指数, 记作 $m = k_p U'_m$ 。调相波的数学表达式为

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos[\omega_0 t + k_p U'_m \cos \omega_m t] \\ &= U_m \cos[\omega_0 t + m \cos \omega_m t] \end{aligned} \quad (1-2-14)$$

瞬时频率为

$$\omega(t) = \omega_0 - m \omega_m \sin \omega_m t \quad (1-2-15)$$

式(1-2-13)或式(1-2-10)说明, 调相波中是用相位偏移反映调制信号波形的。

比较式(1-2-3)和式(1-2-11), 如果将式 (1-2-3) 中的 $\int_0^t u_m(t)dt$ 看成调制信号, 那么此式可看作信号 $\int_0^t u_m(t)dt$ 的调相波。因此, 某调制信号对载波进行调频时与该调制信号经过积分后对载波进行调相是一样的。这可以用调制信号经过积分电路后再对载波进行调相的方法来实现调频。

调频和调相的这种联系, 反映了两种调制的物理现象的相似: 调频波的瞬时角频率随调制信号变化时, 它的瞬时相位也有变化; 调相波的瞬时相位随调制信号变化时, 它的瞬时角频率也有变化。调频和调相的区别仅仅在于相位角和角频率是按怎样一个关系随调制信号变化。在调频波中, 频率偏移

表 1-2-1 调频波和调相波的比较

	调 频 波	调 相 波
数 学 表 达 式 ①	$U_m \cos[\omega_0 t + k_f \int_0^t u_m(t) dt]$	$U_m \cos[\omega_0 t + k_p u_m(t)]$
瞬 时 频 率	$\omega_0 + k_f u_m(t)$	$\omega_0 + k_p \frac{du_m(t)}{dt}$
频 率 偏 移	$k_f u_m(t)$	$k_p \frac{du_m(t)}{dt}$
最 大 频 偏	$k_f u_m(t) _{\max}$	$k_p \left \frac{du_m(t)}{dt} \right _{\max}$
瞬 时 相 位	$\omega_0 t + k_f \int_0^t u_m(t) dt$	$\omega_0 t + k_p u_m(t)$
相 位 偏 移	$k_f \int_0^t u_m(t) dt$	$k_p u_m(t)$
最大相位偏移	$k_f \left \int_0^t u_m(t) dt \right _{\max}$	$k_p u_m(t) _{\max}$

① $u_m(t)$ 为调制信号; $U_m \cos \omega_0 t$ 为载波。

与调制信号成正比，而相位偏移与调制信号对时间的积分成正比。在调相波中，相位偏移与调制信号成正比，而频率偏移与调制信号对时间的微分成正比。

调频波与调相波的比较列于表 1-2-1 中。

1.2.2 调频波的频谱与频带宽度

1. 单频调制时调频波的频谱表达式

利用三角展开式，单频调制信号的调频波表达式(1-2-7)可写成

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m \cos(\omega_0 t + m \sin \omega_m t) \\ &= U_m [\cos \omega_0 t \cdot \cos(m \sin \omega_m t) \\ &\quad - \sin \omega_0 t \cdot \sin(m \sin \omega_m t)] \end{aligned} \quad (1-2-16)$$

再据贝塞尔函数理论，得到下述关系式：

$$\begin{aligned} \cos(m \sin \omega_m t) &= J_0(m) + 2J_2(m) \cos 2\omega_m t \\ &\quad + 2J_4(m) \cos 4\omega_m t + \dots + \\ &\quad 2J_{2n}(m) \cos 2n\omega_m t + \dots \\ &= J_0(m) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m) \cos 2n\omega_m t \end{aligned} \quad (1-2-17)$$

$$\begin{aligned} \sin(m \sin \omega_m t) &= 2J_1(m) \sin \omega_m t + 2J_3(m) \sin 3\omega_m t \\ &\quad + \dots + 2J_{2n-1}(m) \sin (2n-1)\omega_m t + \dots \\ &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(m) \sin (2n-1)\omega_m t \end{aligned} \quad (1-2-18)$$

这里 $J_n(m)$ 是第一类 n 阶贝塞耳(Bessel)函数，它是调