

锁相技术基础

杨士中 黎孝纯 编 著
宋景光 张盛久

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书通俗介绍锁相这门新技术。全书共分十三章，讲锁相环组成、环路稳定性和跟踪性能、环路对噪声的过滤性能、维纳最佳环路和三阶锁相环、捕获与失锁的分析方法、捕获方法、环路部件、环路测量、相干乘积解调、各种环路及数字环等。对于要求掌握锁相技术的基础知识的读者，是一本简明的参考书。

锁 相 技 术 基 础

杨士中 黎孝纯 编著
宋景光 张盛久

人民邮电出版社出版
北京东长安街27号
北京邮票厂印刷
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经售
限国内发行

开本：787×1092 1/32 1978年8月第一版
印张：10 4/32 页数：162 1978年8月北京第一次印刷
字数：231千字 印数：1—20,500册
统一书号：15045 总2221—无646

定价：0.95元

目 录

前言

第一章 概述	1
1.1 什么叫做锁相	1
1.2 环路组成及工作原理	3
1.2.1 相检器	4
1.2.2 环路滤波器	5
1.2.3 压控振荡器	6
1.2.4 环路的捕获和跟踪	6
1.3 锁相环的特点	8
1.4 锁相环的应用	9
1.4.1 载波跟踪和滤波的一例——卫星多卜勒测速定轨	9
1.4.2 调相、调频、调幅信号的解调	11
1.4.3 倍频和分频	14
1.5 本书内容安排	15
第二章 环路的频率特性和传递函数	17
2.1 线性环路和非线性环路	17
2.2 线性系统分析的根据——叠加原理	19
2.2.1 把信号分解成若干谐波之和——频谱的基本概念	19
2.2.2 求信号通过线性系统的一般步骤	24
2.3 频率特性和传递函数的定义	25
2.3.1 频率特性的定义	25
2.3.2 传递函数的定义	27
2.4 环路的传递函数	29
2.4.1 相检器的传递函数	29
2.4.2 环路滤波器的传递函数	29

2.4.3	压控振荡器的传递函数	34
2.4.4	环路的传递函数	34
2.5	环路的阶	37
2.6	环路的根轨迹图	43
第三章	环路的稳定性和跟踪性能	49
3.1	环路的跟踪性能	49
3.1.1	跟踪相位误差	49
3.1.2	典型输入下高增益二阶环的跟踪相位误差	51
3.1.3	稳态相位误差	56
3.1.4	稳态相位误差与环路的阶和输入形式的关系	57
3.2	环路的稳定性	59
第四章	环路对噪声的过滤性能	62
4.1	环路对输入噪声的过滤性能	64
4.1.1	带噪声的环路模型	64
4.1.2	相位噪声谱密度	66
4.1.3	环路等效噪声带宽的定义和计算	67
4.1.4	环路的输入信噪比和环内信噪比	70
4.1.5	环路对调角信号等效于带通滤波器	71
4.2	环内噪声的影响	72
4.2.1	频率稳定度的定义和表征	73
4.2.2	VCO的短期稳定度与环路相位抖动的关系	78
第五章	维纳最佳环路和三阶锁相环	85
5.1	维纳最佳环路	85
5.1.1	维纳最佳环路和带通限幅器的应用	85
5.1.2	考虑输入噪声、环内噪声和跟踪相位误差的最佳环路带宽	87
5.2	三阶锁相环	89
5.2.1	采用三阶环的必要性	89
5.2.2	串联综合环路滤波器的三阶环	91

5.2.3	并联综合环路滤波器的三阶环	99
5.3	一阶环、二阶环和三阶环的线性分析结果汇总 和计算举例	108
第六章	环路的捕获与失锁	120
6.1	环路的非线性	120
6.2	频率牵引与相位牵引现象	127
6.3	频率牵引与相位牵引的分析方法	130
6.4	输入信号与 VCO 频率有固定频差的一阶环	140
6.5	输入信号与 VCO 频率有固定频差的高增益二 阶环	142
6.6	输入信号与 VCO 频率有固定频差的低增益二 阶环	145
6.7	环路的失锁现象	147
6.7.1	输入相位调制引起的失锁	148
6.7.2	输入噪声对失锁的影响	150
6.7.3	输入相位调制加噪声对失锁的影响	154
第七章	帮助环路捕获的方法及设备	156
7.1	扫描捕获	156
7.2	频率引导捕获	160
7.3	分段频率引导	165
7.4	用鉴频器帮助环路捕获	168
7.5	变带宽捕获	168
7.6	假锁与错锁	170
7.6.1	假锁	171
7.6.2	错锁	176
第八章	环路部件	179
8.1	相检器	179

8.2	环路滤波器	185
8.3	电压控制振荡器	190
8.4	限幅器	194
第九章	环路测量	197
9.1	环路部件的测量	197
9.1.1	环路相检器的测量	197
9.1.2	环路滤波器的测量	199
9.1.3	压控振荡器的测量	201
9.2	环路整体测量	205
9.2.1	开环增益测量	205
9.2.2	捕获带宽与捕获时间的测量	209
9.2.3	环路频率响应的测量	210
9.2.4	环路暂态性能测量	214
9.2.5	环路的噪声测量	215
第十章	相干乘积解调	218
10.1	概述	218
10.2	线性乘积解调器	221
10.3	有预限幅的乘积解调器	227
10.3.1	调相信号加白高斯噪声的表示	227
10.3.2	带通限幅器对调相信号加噪声混合物的作用	229
10.3.3	有预限幅的乘积解调器对调相信号加噪声的作用	231
第十一章	特殊环路简介	235
11.1	平方环	235
11.2	同相正交环(科斯塔斯环)	239
11.3	反调制环	240
11.4	位同步环	247
11.4.1	微分整流位同步环	247
11.4.2	同相、中相积分清除位同步环	249

11.4.3 早-迟积分清除位同步环	251
11.5 伪随机码测距信号跟踪双环	252
11.6 取样环	253
第十二章 数字环简介	258
12.1 例一	258
12.2 例二	262
12.3 例三 一种数字式位同步环	268
12.4 例四	270
第十三章 锁相接收机	278
13.1 为什么要采用锁相接收机	278
13.2 锁相接收机是怎样工作的	281
13.3 锁相接收机中锁相环路的设计	284
附录 A 拉氏变换表	290
附录 B 噪声的基本知识	293
附录 C 频率分析器	309
附录 D 主要符号	315

第一章 概 述

1.1 什么叫做锁相

锁相就是相位同步的自动控制。完成两个电信号相位同步的自动控制系统叫做锁相环（简称为环路）。

假设有两个振荡器。第一个振荡器输出电压为 $V_i(t)$ ：

$$V_i(t) = V_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (1-1)$$

$V_i(t)$ 的波形如图 1.1(b) 所示。这个波形可理解为图 1.1(a) 中矢量 \vec{P}_i 以角速度 ω_i 绕坐标原点旋转过程中、在纵轴上的投影。这里， V_i 是正弦信号 $V_i(t)$ 的振幅，就是旋转矢量 \vec{P}_i 的长度，或者是矢量在纵轴上投影的最大值； $(\omega_i t + \theta_i)$ 是正弦信号 $V_i(t)$ 的相位，包括两部分： $\omega_i t$ 表示时间从 0 到 t 时，矢量 \vec{P}_i 转过的角度； θ_i 叫做初始相位，表示时间 $t=0$ 时矢量 \vec{P}_i 与横轴的夹角。

第二个振荡器的输出电压为 $V_0(t)$ ：

$$V_0(t) = V_0 \sin\left(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \theta_0\right) \quad (1-2)$$

或

$$V_0(t) = V_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1-3)$$

$V_0(t)$ 的波形如图 1.1(d) 所示。这个波形可理解为图 1.1(c) 中矢量 \vec{P}_0 以角速度 ω_0 绕坐标原点旋转过程中在纵轴上的投影。同样， V_0 是正弦信号 $V_0(t)$ 的振幅； $(\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \theta_0)$ 是正弦信号 $V_0(t)$ 的相位， $\omega_0 t$ 表示时间从 0 到 t 时，矢量 \vec{P}_0 转过的角度； $\frac{\pi}{2} + \theta_0$ 是初始相位，即时间 $t=0$ 时矢量 \vec{P}_0 与横轴的夹

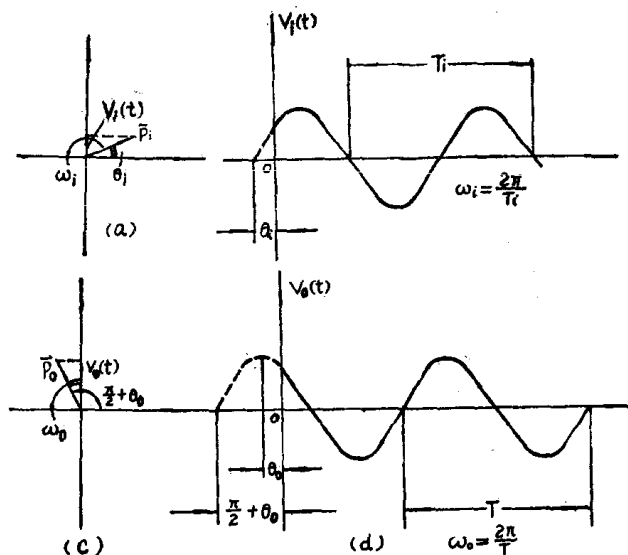


图 1.1 正弦及余弦波形的矢量表示法

角。 θ_0 是 $t=0$ 时矢量 \vec{P}_0 与纵座标的夹角。

用锁相环使 $V_0(t)$ 与 $V_i(t)$ 实现相位同步，就意味着理想情况下使 $V_0(t)$ 和 $V_i(t)$ 保持频率相等 ($\omega_0 = \omega_i$)、同时相位相差 $\frac{\pi}{2}$ ，即(1-1)和(1-2)式表示的信号相位差为 $\frac{\pi}{2}$ ，这时有：

$$|(\omega_i t + \theta_i) - (\omega_0 t + \frac{\pi}{2} + \theta_0)| = \frac{\pi}{2} \quad (1-4)$$

则

$$\left. \begin{aligned} \omega_i &= \omega_0 \\ \theta_i &= \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

所谓理想情况，是指 $V_i(t)$ 与 $V_0(t)$ 的相位同步，不存在误差。实际上有很多因素，例如噪声和 $V_i(t)$ 有相位调制等，都会使相位同步产生误差。我们可以控制这个相位误差在允许的范围

以内。令相位同步时存在的总的相位误差为 $\theta_{e\Sigma}$ ，则 $V_i(t)$ 和 $V_0(t)$ 同步以后， $\omega_i = \omega_0$ ，相位差为 $\frac{\pi}{2} \pm \theta_{e\Sigma}$ 。

这是十分有趣的。如果 ω_i 和 ω_0 相差不大，即使 ω_i 和 ω_0 的值高达百万以上（相当于矢量 \vec{P}_i 和 \vec{P}_0 每秒钟转百万圈以上），采用锁相环能使 $V_i(t)$ 和 $V_0(t)$ 保持角频率相等 ($\omega_0 = \omega_i$)，而且相位差保持为 $\frac{\pi}{2} \pm \theta_{e\Sigma}$ ，而 $\theta_{e\Sigma}$ 可以做得很小。能够做到这一点，在无线电技术中具有特别重要的实用价值。

1.2 环路组成及工作原理

上一节里说过，锁相环能使每秒振荡百万次以上的两个信号精确地、自动地相位同步。那末锁相环的结构是否非常复杂呢？基本锁相环路如图 1.2 所示。它只包括相检器、环路滤波器和电压控制振荡器（简称 VCO）三个部件。实际应用中有各

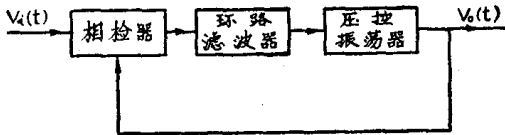


图 1.2 基本锁相环路的组成

种形式的环路，它们都是由基本环路变化而来，有的完全等效于基本环路，所以必须详细讲述基本环路。

图 1.2 中输入信号为：

$$V_i(t) = V_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (1-6)$$

输出信号为：

$$V_0(t) = V_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1-7)$$

而且把 $V_0(t)$ 反馈到输入端。环路工作的结果，使环路输出频

率与输入频率相等， $\omega_i = \omega_0$ ，输出、输入信号相位差为 $\frac{\pi}{2} \pm \theta_{e\pi}$ 。下面简单叙述这三个部件的工作原理。

1.2.1 相检器

相检器的作用相当于一个乘法器。它把两个信号 $V_i(t)$ 和 $V_0(t)$ 相乘，所得乘积 $V_d(t)$ 为

$$\begin{aligned} V_d(t) &= K_m [V_i(t) \cdot V_0(t)] \\ &= K_m [V_i \sin(\omega_i t + \theta_i)] [V_0 \cos(\omega_0 t + \theta_0)] \\ &= \frac{K_m V_i V_0}{2} \sin[(\omega_i + \omega_0)t + (\theta_i + \theta_0)] \\ &\quad + \frac{K_m V_i V_0}{2} \sin[(\omega_i - \omega_0)t + (\theta_i - \theta_0)] \end{aligned} \quad (1-8)$$

K_m 代表与乘法器有关的常数，

$$K_d = \frac{K_m V_i V_0}{2} \quad (1-9)$$

K_d 叫做相检器的灵敏度，单位为伏/弧度。(1-8) 式中右边第一项叫和频项，因其频率高，假设可以被相检器的输出低通滤波器滤掉。第二项叫差频项，差频 $\omega_i - \omega_0$ 比相检器的输出低通滤波器的截止频率低，没有被滤掉。于是相检器的实际输出为：

$$V_d(t) = K_d \sin[(\omega_i - \omega_0)t + (\theta_i - \theta_0)] \quad (1-10)$$

如果 $\omega_i = \omega_0$ ，则

$$V_d(t) = K_d \sin(\theta_i - \theta_0) \quad (1-11)$$

由(1-11)式得到相检器的输出、输入特性如图 1.3，这叫相检器的鉴相特性，它具有正弦的形式。常说正弦相检器就是指它的鉴相特性是正弦的。

当 $|\theta_i - \theta_0| \leq 30^\circ$ 时， $\sin(\theta_i - \theta_0) \approx \theta_i - \theta_0$ 的弧度值，于

是

$$V_d(t) = K_d(\theta_i - \theta_0) \quad (1-12)$$

从(1-12)式得出结论:

当 $\theta_i - \theta_0$ 较小时, 例如 $|\theta_i - \theta_0| \leq 30^\circ$, 相检器等效于一个

相位减法器。这个减法器输出电压的大小表示相位差 $\theta_i - \theta_0$ 的大小, 输出电压的极性代表 $V_i(t)$ 是超前 $V_0(t)$ 或是滞后于 $V_0(t)$ 。这里超前和滞后是指 θ_i 和 θ_0 比较, 不考虑正弦和余弦波相差的相位 $\frac{\pi}{2}$ 。

从(1-11)式可知: 当 $\theta_i - \theta_0$ 较大(如大于 30°) 时, 相检器具有正弦非线性特性。

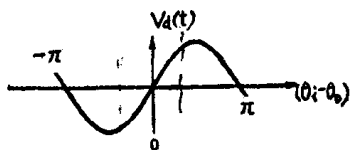


图 1.3 相检器的鉴相特性

1.2.2 环路滤波器

环路滤波器是一个比例积分器, 分有源与无源两种。无源滤波器简单, 它的线路如图 1.4。通常 C 较大, 如 $1\mu F \sim 10\mu F$, R_1 比 R_2 大得多, 例如大 $10 \sim 1000$ 倍。这样, 图 1.4 的线路

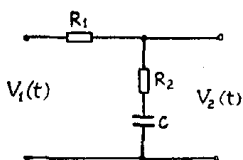


图 1.4 无源滤波器

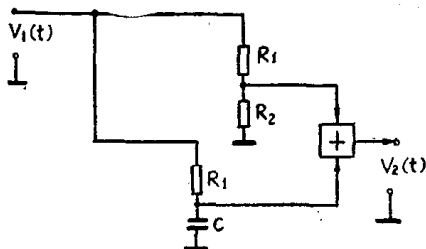


图 1.5 图 1.4 的等效线路

近似等效于图 1.5 所示线路。可见, $V_1(t)$ 经两路到加法器相加输出: 由 R_1 和 R_2 组成比例衰减支路, 将 $V_1(t)$ 以 $\frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 的比例衰减后得 $V_1(t) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 加到加法器; R_1 和 C 组成一个

积分器，将 $V_1(t)$ 进行积分后也加到加法器。对高频输入， C 可视为短路，总输出 $V_2(t)$ 显然由比例衰减器支路决定，即输出为 $V_1(t) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 。对甚低频输入， $V_2(t)$ 近似为 $V_1(t)$ 的积分。所以图 1.4 的线路叫比例积分器。

有源滤波器如图 1.6 所示。它是用直流放大器来改善无源滤波器的性能。 A 为直流放大器的放大倍数， A 前面的负号表示直流放大器的输出与输入反相。与无源滤波器比较，它对直流有放大作用，放大倍数为 A ，可使滤波器更接近图 1.5 的理想比例积分器的性能。

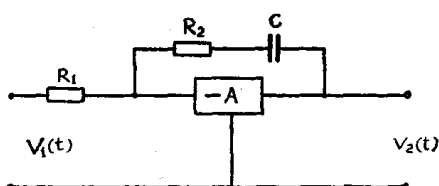


图 1.6 有源滤波器

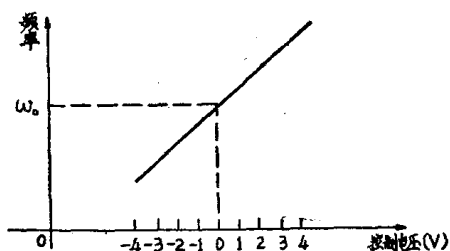


图 1.7 VCO 的控制特性

1.2.3 压控振荡器

它就是一个振荡器，例如晶体振荡器、LC 振荡器、RC 振荡器、多谐振荡器等，只不过振荡频率随输入控制电压的变化而变化。这个控制电压就是环路滤波器的输出电压。如果控制电压为 0，则振荡器以静态频率 ω_0 振荡。压控振荡器的输出频率随控制电压的变化特性如图 1.7 所示。

1.2.4 环路的捕获和跟踪

环路的工作分为捕获和跟踪两种状态。例如图 1.2 所示的

环路，当没有输入信号时，VCO以静态频率 ω_0 振荡。如果环路有一个输入信号 $V_i(t)$ ，开始时输入频率总是不等于VCO的静态振荡频率的，即 $\omega_i \neq \omega_0$ 。如果 ω_i 与 ω_0 相差不大，在适当范围内，相检器输出一误差电压，经环路滤波器变换后控制VCO的频率，使其输出频率变化到接近 ω_i ，这叫做频率牵引。经过一段时间的牵引过程，最后使VCO输出频率 ω_0 变得与 ω_i 完全相等，而且两信号的相位差为 $\frac{\pi}{2} \pm \theta_{e\Sigma}$ 。这叫环路锁定。从信号加入到环路锁定，叫环路的捕获过程。

什么叫做环路跟踪呢？环路锁定以后，如果输入相位 θ_i 有一变化，相检器检出 θ_i 和 θ_0 之差，产生一正比于这个相位差的电压，并反应相位差的极性，经过环路滤波器变换以后去控制VCO的频率，使 θ_0 改变，减小其与 θ_i 之差，直到保持 $\omega_i = \omega_0$ ，相差 $\frac{\pi}{2} \pm \theta_{e\Sigma}$ ，这一过程叫做环路的跟踪过程。

环路滤波器是怎样处理相检器输出电压呢？环路滤波器如果是图1.4或图1.6的比例积分器时，比例积分器把相检器输出的哪怕非常微小的电压积累起来，形成一个相当大的VCO控制电压，使输出相位 θ_0 接近输入相位 θ_i ，直到 $\theta_0 = \theta_i$ 。如不计 $\theta_{e\Sigma}$ ，在 $\theta_0 = \theta_i$ 之后，相检器输出为零，但比例积分器输出仍可能有相当大的电压，这个电压是由以前相检器输出电压积累、并保持到 $\theta_0 = \theta_i$ 时刻的。我们改变环路滤波器的 R_1 、 R_2 、 C ，就能改变环路滤波器的性能，也就方便地改变了锁相环的性能。

怎样知道环路已经锁定了呢？方法之一是把相检器的输入信号 $V_i(t)$ 加到示波器的垂直偏转板上，而把 $V_0(t)$ 加到水平偏转板上(或者相反)，并使两信号幅度相等。如果环路已经锁定，且在理想情况下，即 $\theta_{e\Sigma} = 0$ ，则因 $V_i(t)$ 和 $V_0(t)$ 等幅、

同频率，且相位差必定为 $\frac{\pi}{2}$ ，故李沙育图形是一个圆，如图1.8

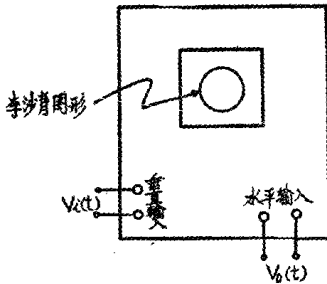


图 1.8 用李沙育图形鉴别
环路是否锁定

所示。实际上 $\theta_{e,2} \neq 0$ ，李沙育图形是一个椭圆。为什么锁定后，在理想情况下， $v_i(t)$ 与 $v_o(t)$ 的相位差必定为 $\frac{\pi}{2}$ 呢？这是因为环路维持锁定，必定处于跟踪状态，此时相检器的输出反映出 $\theta_i - \theta_0$ 的大小和极性（参看图1.3）。理想跟踪时 $\theta_0 = \theta_i$ ，检相器输出为

0，而此输出只有当 $v_i(t)$ 与 $v_o(t)$ 相互正交时才为零，故 $v_i(t)$ 与 $v_o(t)$ 的相位差此时必定为 $\frac{\pi}{2}$ 。

1.3 锁相环的特点

锁相环的主要特点是：对于输入相位量（不是信号的振幅量）而言，可以把锁相环视为一个以 VCO 输出振荡频率为中心频率的带通滤波器，即是(1)可以做到环路滤波器中心频率跟踪输入频率，(2)带通滤波器的带宽（即环路带宽）可以做得很窄，而且易于控制，例如在数百兆的中心频率上，其带宽可以做到几赫，这是用任何通常的 LC、RC 和晶体滤波器所办不到的。

这种跟踪和滤波性能的重要性，在锁相环的许多应用中是很值得注意的。

1.4 锁相环的应用

锁相技术起源于三十年代，五十年代初方开始应用。它能完成(1)载波的跟踪和滤波；(2)调相、调频、调幅信号的解调；(3)倍频和分频等主要功能。因此锁相在电视、雷达、通信、遥控遥测、测量仪表，特别是在人造卫星和宇宙飞船的无线电系统中，得到了广泛的应用。毫不夸张地说，许多现代通信系统离开了锁相技术是不行的。人们为了从事上述有关技术领域的工作，必须掌握这门技术、应用这门技术。下面说明锁相环主要的三种功能的原理。

1.4.1 载波跟踪和滤波的一例——卫星多卜勒测速定轨

人造卫星、宇宙飞船在军事、气象探测、地球资源勘测、船舶导航、通信等许多领域起着越来越重大的作用。如果把一颗卫星送上天后，不能精确地测量和预报它的轨道，那末，这颗卫星就失去了它的使用价值。

测量卫星轨道的一种方法叫做多卜勒测速定轨法。例如卫

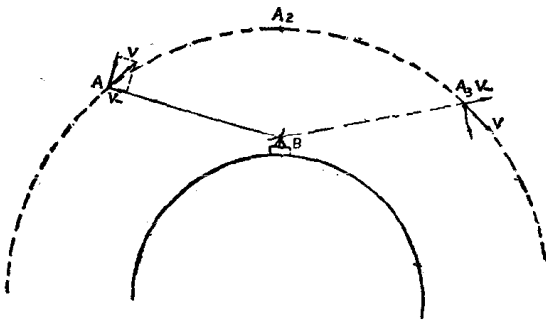


图 1.9 卫星多卜勒频率测速示图

1106848

星从地平面升起，经过天顶，然后又落到另一方向的地平面以下。运动曲线如图 1.9 所示。地球上 B 点有一锁相接收机*，卫星上装有一发射机，发射一个频率为 f_1 的、非常稳定的正弦信号。锁相接收机接收卫星发来的信号时，锁相环路跟踪这个信号频率。若卫星绕地球球心作圆周运动，在图 1.9 的 A_1 点，卫星的切线速度 V 可以分解成两个互相垂直的分量。沿 A_1B 方向的分量以 V_- 表示，叫做径向速度。由于 V_- 的存在，接收机收到的信号频率不等于发射频率 f_1 ，而变成了 f_2 ：

$$f_2 = f_1 + f_d \quad (1-12)$$

式中

$$f_d = \frac{V_-}{C} f_1 \quad (1-13)$$

叫做多卜勒频率。它表示由卫星以 V_- 的速度向地面站运动而引起的接收频率增量。在 A_3 点的径向速度 V_- 与 A_1 点的方向相反，故 f_d 前有负号，表示接收机收到的频率比发射时的频率低一个 f_d 。在 A_2 点 $V_- = 0$ ，所以 $f_d = 0$ ， $f_2 = f_1$ 。卫星飞

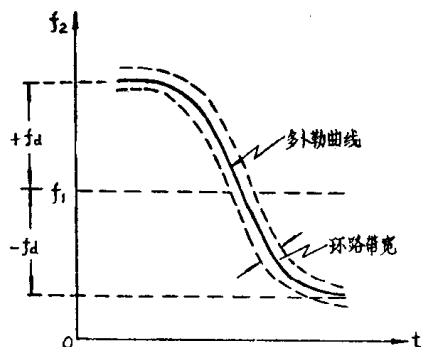


图 1.10 卫星多卜勒频率曲线

过一次，接收到的频率变化曲线如图 1.10 所示。这个曲线叫做多卜勒曲线。测得多卜勒曲线，就测得了卫星相对于地面某点的径向速度的变化。地面上多个站同时测量，就能精确算出卫星运行的轨道。这就叫做多卜勒测速定轨。

* 请参看第十三章