

# 惯导速度辅助下GPS接收机 码环的噪声响应和动态跟踪性能分析

西北工业大学 秦永元 俞济祥

## NOISE RESPONSE AND MANOEUVRE TRACKING PERFORMANCE ANALYSIS FOR THE GPS RECEIVER CODE LOOP AIDED BY THE INS VELOCITY

*Northwestern Polytechnical University*

Qin Yongyuan and Yu Jixiang

**摘要** 本文推导了C/A码信号相干和非相干接收的GPS接收机码环的动力学方程,分析了码环的噪声响应和动态跟踪性能对码环带宽的矛盾要求,并提出了解决矛盾的方法:惯导速度辅助。分析结果表明:窄带宽码环精度为1nmile/h的惯导系统速度辅助后,动态跟踪误差为无辅助时的1/1000,接收机将兼有抗强干扰和跟踪高动态的性能。

**关键词** 惯性导航, 卫星导航, 锁相环路, 信噪比, 跟踪, 误差。

**Abstract** This paper has deduced dynamic equations of the code loop of the GPS receiver which operates in coherent and noncoherent manner when C/A code signal is considered. The contradictory requirements imposed on the code loop bandwidth by the noise response and manoeuvre tracking are analysed in detail as well. It is proposed that the contradiction can be solved by the velocity aiding from the inertial navigation system. The results show that if a narrow bandwidth code loop is aided by the inertial navigation system of 1nm/h accuracy, the manoeuvre tracking error will be 1/1000 as large as that of without aiding, and thus both high anti-jamming and manoeuvre tracking performances can be achieved.

**Key words** inertial navigation, satellite navigation, phase-locked loop, signal-to-noise ratio, tracking, error.

### 一、前 言

GPS接收机用作导航系统时,码环必须同时满足两个要求:既能抗强干扰,又能跟踪高机动。然而这些要求对码环来说是矛盾的,抗强干扰要求环路带宽尽量窄,跟踪高机动则要求带宽尽量宽。对于二阶码环,跟踪加速度时即使不失锁也会产生稳态误差,影响导航精度。因此寻求解决这一矛盾的方法具有重要的现实意义。本文旨在揭示码环的噪声响应和动态跟踪性能对码环带宽的矛盾要求,并提出解决矛盾的方法:惯导速度辅助。

1989年6月12日收到,1990年4月2日收到修改稿

## 二、码环的数学模型

图 1 为码环的原理框图。设被接收信号为  $s = \sqrt{2P_s} D(t-T) C_A(t-T) \cos(\omega_c t - \varphi)$ ，其中  $\omega_c$  为载频； $\varphi$  为相移； $C_A(t)$  为 C/A 码；码宽  $\Delta = 10^{-6} \text{s}$ ； $D(t)$  为数据码； $P_s$  为信号功率。定义  $T - \hat{T} = \epsilon$  为码环的跟踪误差， $T$  和  $\hat{T}$  分别为传播延时的真实值和估计值。

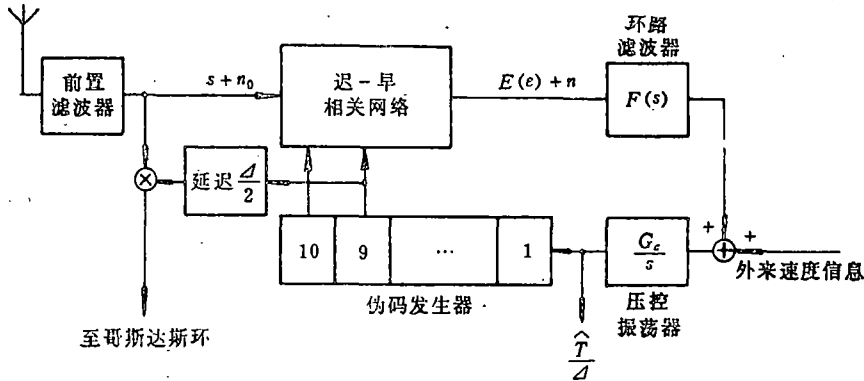


图 1 码环原理框图

若载波还未恢复出，则接收机只能工作在非相干接收状态，迟-早相关网络的有用信号需经包络检波提取，其值为

$$E_1(\epsilon) = P_s D_1(\epsilon) \tag{1}$$

若载波已恢复出，则接收机可工作在相干接收状态，迟-早相关网络的有用信号仅需经低通滤波提取，其值为

$$E_2(\epsilon) = \sqrt{P_s} D_2(\epsilon) \tag{2}$$

(1)式(2)式中  $D_1(\epsilon)$  和  $D_2(\epsilon)$  分别为非相干和相干接收时迟-早相关网络中相鉴器的输出特性， $D_1(\epsilon)$  如图2中虚线所示， $D_2(\epsilon)$  如实线所示。由图2知，相干接收时相鉴器的灵敏度比非相干接收时的高一倍。

暂不考虑外来速度辅助，由图1和(1)式、(2)式可得码环的动力学方程

$$\begin{aligned} \text{非相干接收时为 } \frac{\hat{T}}{\Delta} &= P_s \left[ D_1(\epsilon) + \frac{n}{P_s} \right] \\ &\times (F(s) \frac{G_c}{s} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \text{相干接收时为 } \frac{\hat{T}}{\Delta} &= \sqrt{P_s} \left[ D_2(\epsilon) \right. \\ &\left. + \frac{n}{\sqrt{P_s}} \right] F(s) \frac{G_c}{s} \end{aligned} \tag{4}$$

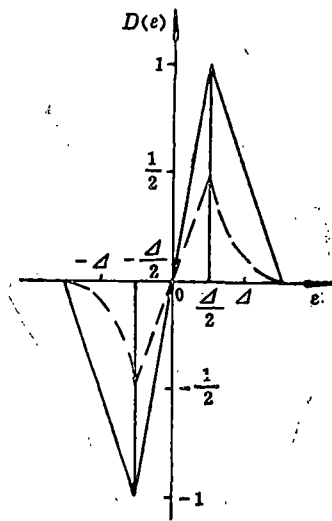


图 2 相鉴器输出特性

### 三、码环噪声响应性能分析

设接收噪声为白噪声，功率谱密度为  $N_0/2$ ，可以证明迟-早相关网络输出噪声的功率谱密度为

$$\text{非相干接收时} \quad S_n = (P_r N_0 + N_0^2 B_1) / 4 \quad (5)$$

$$\text{相干接收时} \quad S_n = N_0 \quad (6)$$

其中  $2B_1$  为非相干接收时迟-早相关网络中带通滤波器的带宽，由多卜勒频移范围确定，此处取  $B_1 = 50\text{Hz}$ 。

当码环工作在线性区域时，根据定义  $T - \hat{T} = \epsilon$ 、图2和(3)式、(4)式、码环的动力学方程成

$$\frac{\hat{T}}{\Delta} = \frac{G_0 \frac{F(s)}{s}}{1 + G_0 \frac{F(s)}{s}} \left( \frac{T}{\Delta} + \frac{n}{A} \right) \quad (7)$$

为单位反馈线性系统，其中，非相干接收时， $G_0 = G_c P_r$ ， $A = P_r$ ，噪声  $n$  的功率谱密度如(5)式所示；相干接收时， $G_0 = 2G_c \sqrt{P_r}$ ， $A = 2\sqrt{P_r}$ ，噪声  $n$  的功率谱密度如(6)式所示。

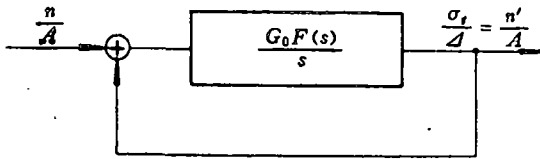


图3 码环噪声响应等效反馈回路

仅考虑噪声激励下码环的响应时，由(7)式可画出码环的等效反馈回路，如图3所示。

设  $\sigma_t/\Delta$  是对应于  $n/A$  输入时环路的输出抖动，将  $\sigma_t/\Delta$  写成  $n'/A$  并平方后再取平均值，得

$$\frac{\sigma_t^2}{\Delta^2} = \frac{E\{n'\}^2}{A^2} \quad (8)$$

其中  $E\{n'\}^2$  是  $n'$  的功率，由巴塞伐等式

$$E\{n'\}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_n(\omega) |H(j\omega)|^2 df \quad (9)$$

其中  $H(j\omega)$  是反馈系统的闭环频率特性。

分别将(5)式、(6)式代入(9)式，并记  $B_n = \int_0^{\infty} |H(j\omega)|^2 df$ ，则由(8)式得

$$\text{非相干接收时} \quad \frac{\sigma_t}{\Delta} = \sqrt{\frac{N_0 B_n}{2P_r} + \frac{1}{2} \left( \frac{N_0}{P_r} \right)^2 B_1 B_n} \quad (10)$$

$$\text{相干接收时} \quad \frac{\sigma_t}{\Delta} = \sqrt{\frac{N_0 B_n}{2P_r}} \quad (11)$$

$$\text{取} \quad F(s) = G_f \frac{s + h}{s} \quad (12)$$

则根据文献[3],  $B_n = (G + b)/4$  (13)

其中  $G = G_0 G_f$ 。根据文献[1], 码环锁定阈值为  $\sigma_s = 0.3\Delta$ , 因此由(10)式、(11)式, 对于给定的  $P_r/N_0$ , 码环维持锁定时反馈系统的最大允许带宽为

$$\text{非相干接收时} \quad B_n = \frac{0.18}{\frac{N_0}{P_r} \left( 1 + \frac{N_0}{P_r} B_1 \right)} \quad (14)$$

$$\text{相干接收时} \quad B_n = 0.18 \frac{P_r}{N_0} \quad (15)$$

若将  $P_r/N_0$  写成信噪比形式, 设前置滤波器带宽  $B_0 = 2 \times 10^6 \text{Hz}$ , 则码环的输入信噪比为

$$10 \lg \frac{P_r}{P_N} = -60 + 10 \lg \frac{P_r}{N_0} \quad (16)$$

由(14)式、(15)式、(16)式可求得不同信噪比下码环维持锁定的最大允许带宽, 如表1所列。

表 1

$10 \lg \frac{P_r}{N_0} (\text{dBHz})$	$10 \lg \frac{P_r}{P_N} (\text{dB})$	最大允许带宽 $B_n (\text{Hz})$	
		相干接收	非相干接收
-10	-70	0.018	$3.593 \times 10^{-5}$
-5	-65	0.057	$3.577 \times 10^{-4}$
0	-60	0.180	$3.529 \times 10^{-3}$
5	-55	0.569	0.034
9.44	-50.56	1.581	0.237
10	-50	1.800	0.300
15	-45	5.692	2.205
20	-40	18.000	12.000
25	-35	56.921	49.150
30	-30	180.000	171.429
35	-25	569.210	560.350
40	-20	1800.000	1791.045

从表1可看出: 在相同干扰条件下, 特别在强干扰下, 相干接收时码环维持锁定的最大允许带宽远比非相干时的大, 这说明相干接收比非相干接收具有强得多的抗干扰能力。

## 四、码环动态响应性能分析

### 1. 无辅助情况

分析码环的动态响应时应考虑非线性, 因载体的机动可使跟踪误差  $|\epsilon| > \Delta/2$ 。仅考虑动态响应时, (3)式、(4)式可写成

$$\hat{T}/\Delta = G_0 D(\epsilon) F(s)/s \quad (17)$$

其中, 相干和非相干接收时,  $G_0$  分别为  $2G_c \sqrt{P_r}$  和  $G_c P_r$ ,  $D(\epsilon)$  由图2确定。(17)式写成时域形式

$$\frac{d\dot{\epsilon}}{d\epsilon} = \frac{\ddot{T} - \Delta G h D(\epsilon)}{\dot{\epsilon}} - \Delta G \frac{dD(\epsilon)}{d\epsilon} \quad (18)$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 和 $\ddot{T}$ 均为对时间的导数。

码环锁定时 $\dot{\epsilon} = 0$ ，所以由(18)式得

$$D(\epsilon) = \ddot{T} / \Delta G h \quad (19)$$

设 $\ddot{T} = 10^{-6} \text{1/s}$  (相当于 $\rho \approx 33g$ )，取 $Gh = 10$ ，则 $D(\epsilon) = 0.1$ ，由图2可得：非相干接收时 $\epsilon = 10^{-7} \text{s}$ ，测距误差为 $\epsilon c = 30 \text{m}$  ( $c$ 为光速)；相干接收时 $\epsilon = 5 \times 10^{-8} \text{s}$ ，测距误差为 $\epsilon c = 15 \text{m}$ ，精度提高一倍。

但是即使采用相干接收也无法解决噪声对带宽的要求。若 $Gh = 10$ ，则由(13)式，使 $B_n$ 最小的唯一选择是 $G = h = \sqrt{10}$ ，此时 $B_n = \sqrt{10}/2$ ，由表1知当信噪比低于 $-50.56 \text{dB}$ 时，码环失锁，因此必须采用外来速度信息辅助。

## 2. 惯导速度辅助情况

根据文献[4]，惯导速度辅助信息为 $\frac{1-K}{\tau s+1} \frac{sT(s)}{\Delta}$ ，其中： $K$ 为与惯导精度有关的误差系数，对 $1 \text{ n mile/h}$ 的惯导， $K = 0.001$ ； $\tau$ 为惯导向码环提供速度信息的延时。由图1得

$$\epsilon(s) = \frac{\tau s + K}{\tau s + 1} T(s) - \frac{\Delta G(s+h)}{s^2} D(\epsilon)$$

若惯导速度信息已作过外推处理， $\tau$ 可略去其影响，则上式的时域形式为

$$\frac{d\dot{\epsilon}}{d\epsilon} = \frac{K\ddot{T} - \Delta G h D(\epsilon)}{\dot{\epsilon}} - \Delta G \frac{dD(\epsilon)}{d\epsilon}$$

所以码环锁定时有

$$D(\epsilon) = K\ddot{T} / \Delta G h \quad (20)$$

比较(19)式、(20)式可看出：码环经惯导速度辅助后，相鉴器的误差输出仅为无辅助时的 $1/1000$ ，所以动态测距误差为无辅助时的 $1/1000$ 。若相干接收时信噪比为 $-65 \text{dB}$ 时码环仍维持锁定，则环路的等效带宽应不大于 $0.057 \text{Hz}$ ，即 $(G+h)/4 = 0.057$ ，为使动态跟踪误差最小，应取 $G = h = 0.114$ 。当 $\rho = 50g$ 时，对应的测距误差为 $18.87 \text{m}$ ，而无辅助时误差为 $18870 \text{m}$ ，码环早已失锁。

## 五、总 结

1) 若GPS信号已经捕获，则可利用已恢复出的载波信息使码环工作在相干接收状态。由表1知，信噪比较高时，相干接收和非相干接收时的噪声性能接近，但信噪比很低时，若两者带宽相同，则相干接收容忍的信噪比远比非相干接收能容忍的信噪比低，这说明相干接收的抗干扰能力远比非相干接收强。

2) 相干接收时相鉴器的灵敏度比非相干接收时的高一倍，所以前者测距精度比后者高一倍。

3) 窄带宽码环经精度为 $1 \text{ n mile/h}$ 的惯导系统速度辅助后，动态跟踪误差为无辅助时的 $1/1000$ ，接收机将兼有抗强干扰和跟踪高动态的性能。因此采用惯导速度信息辅助

码环能圆满解决噪声响应和动态跟踪性能对接收机要求的矛盾。

### 参 考 文 献

- 1 Gill, W J. A Comparison of Binary Delay-lock Tracking-loop Implementations. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1966; AES-2; (2)415~424
- 2 Spilker J J Jr. Digital Communications by Satellite. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1977
- 2 郑继禹, 万心平, 张厥盛. 锁相环路原理与应用. 人民邮电出版社, 1984年第二版.
- 4 Hemesath N B. Performance Enhancements of GPS User Equipment. Navigation, Summer 1978; 25: 195~200

### 学术活动

## 北京航空航天大学召开第三届学术年会

北京航空航天大学于1990年9月3~7日在山西省繁峙县召开了第三届综合学术年会。会议代表来自航空航天部、总参、空军、院校、厂、所共43个单位142人。9月3日上午举行了开幕式, 由北京航空航天大学梁恩礼副理事长主持开幕式; 赵承庆副理事长致开幕词; 刘成功副秘书长宣布了四届三次理事会关于成立电子专业委员会“微波与天线学组”的决议; 陈光秘书长向大会报告了本届综合学术会议论文征集情况和会议的安排。

本届大会有四篇综合性学术报告: 航空航天部621所王峙南副所长的关于“宇航材料的发展现状”; 北京理工大学金振玉主任的“电子兼容与航空电子学的发展”; 空军指挥学院劳允超教授的“系统工程与经济发展战略”; 北京航空航天大学陈光教授的“90年代航空发动机的新发展”。大会报告后分成六个专业学组进行交流与讨论, 即: 电子与自控、材料与工艺、动力、结构强度、系统工程以及气动与飞行力学等。会议总计交流论文93篇, 其中大会报告四篇, 书面交流32篇。代表们普遍反映, 这届年会比上届有较大地进步, 集中反映在: (1) 论文质量和水平比较高, 讨论问题热情而比较深入, 理论联系实际, 许多文章都是目前我国一些技术攻关项目的研究成果, 基本上反映了本学科国内的先进水平; (2) 本届年会反映的各学科领域发展的新动态、新水平, 引起了与会代表的极大兴趣, 尤其是关于新材料研制及90年代航空发动机新发展, 引起了代表热烈而充分的讨论; (3) 参加会议的论文作者都做了认真的准备和报告, 与会代表自始至终参加会议, 发言热烈深入讨论。(4) 参加本届年会的代表非常踊跃, 专业面宽, 单位多, 人数已超过了预计规模。青年代表很多占1/3、最年轻者仅24岁、最年长者70岁, 老中青结合、欢聚一堂、学术空气浓厚。

会议期间还组织代表参观游览了当地的名胜古迹, 受到代表们欢迎。