

矢量跟踪在多频接收机中的应用

尹 晓 阳, 李 文 杰, 赵 元 富

(北京微电子技术研究所, 北京 100076)

摘 要: 在高速下矢量跟踪算法在多频点空间型接收机中应用的基础上, 推导出矢量跟踪算法中导航滤波器的系统转移方程和测量方程, 设计一种小型双模四频点矢量接收机, 对该双模四频点矢量接收机在模拟第一宇宙速度场景下的性能和定位精度进行了简要分析, 仿真结果表明矢量跟踪技术在复杂环境下有明显优势及应用前景。

关键词: 矢量跟踪; 接收机; 北斗

中图分类号: U666.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)01-0052-04

Application of Vector Tracking in Multi Frequency Receiver

YIN Xiao-yang, LI Wen-jie, ZHAO Yuan-fu

(Beijing Microelectronics Technology Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: This paper studies the application of vector tracking algorithm in multi frequency receiver with the high speed. Firstly, it expounds transfer and measurement equation of vector tracking navigation filter. Secondly, it proposes an architecture of GNSS receiver with four frequency. Then it briefly compares and analyzes performance and positioning accuracy of four frequency vector GNSS receiver with normal GPS receiver within a simulant scenarios of first cosmic velocity scenarios, and results show that the vector tracking technology has obvious advantages and applications for ground in this complex environment.

Key words: Vector tracking; Receiver; DBS

1 引言

传统接收机受芯片技术及常规跟踪环路限制, 在其应用中有很强的局限性. 随着北斗系统的稳定运营及芯片技术的快速发展, 矢量跟踪技术在多频 GNSS 接收机中的应用将在高集成度下有效提高接收机的灵敏度、动态性和定位精度. 本文以多频高精度空间型 GNSS 接收机设计为背景, 阐述了矢量跟踪技术的实现与应用.

2 矢量跟踪工作原理

传统跟踪环路以捕获载波频率和码相位作为输入量, 通过科斯塔斯环或延迟锁定环来稳定跟踪导航卫星信号, 各通道将载波及码鉴别误差作为闭环反馈, 相当于伪距率误差及伪距误差直接修正跟踪出伪距率与伪距. 而矢量跟踪环路则只用伪距误差

和伪距率误差作为中间变量来计算本地位置、速度等导航信息, 而通过扩展卡尔曼滤波(EKF)以本地位置、速度、钟差、钟漂及卫星星历信息来直接预测下一时刻的载波频率及伪码序列, 以此来跟踪卫星信号并得到下一时刻伪距及伪距率, 完成闭合跟踪环路, 矢量跟踪结构如图 1 所示^[1-3].

矢量跟踪的单个通道包括码 NCO 和载波 NCO, 同时还有伪码鉴相器和载波鉴频器, 一环路将这两个鉴别器的输出直接传递到定位滤波计算中, 用于 EKF 更新位置、速度、钟差、钟漂等本地接收机状态, 而其输入量则是由 EKF 根据参考本地状态直接估计出各通道本地载波频率及码相位来控制码 NCO 和载波 NCO.

对矢量接收机进行具体分析并建立系统模型. 可以将接收机的运动在足够短的时间间隔内看做匀速运动, 在某一时刻 k , 假设接收机的实际位置、速

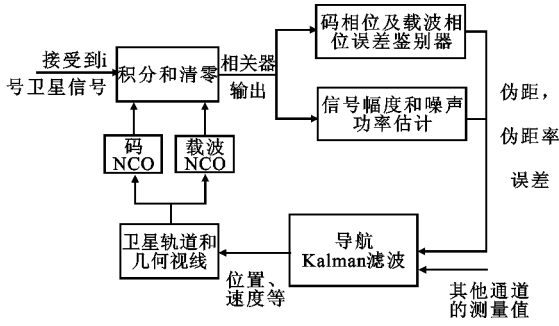


图 1 单通道矢量跟踪结构图

度分别为 X_k, V_k , 预测位置与速度分别为 $\hat{X}_k, \hat{V}_k$, 接收机钟差为 $t_{b,k}$ 和, 钟漂为 $t_{d,k}$. 由此利用上述 4 个接收机状态变量, 可以构成以下状态方程:

$$X_{k+1} = F_{k+1} X_k + W_k$$

$$X_{k+1} = [x_{k+1} \ t_{b,k+1} \ v_{k+1} \ t_{d,k+1}]^T$$

$$\text{状态转移矩阵 } F_{k+1} = \begin{bmatrix} I_4 & t_{k,k+1} I_4 \\ 0_4 & I_4 \end{bmatrix}, t_{k,k+1} \text{ 为某一时刻 } k \text{ 和下一时刻 } k+1 \text{ 之间的时间差; } W_k \text{ 为过程状态扰动噪声.}$$

鉴于卫星星历, 本地位置, 速度, 钟差, 钟漂等状态量, 各个卫星在 $k+1$ 时刻的码相位和载波频率都可以被预测得到. 将接收机产生的 k 到 $k+1$ 时刻本地载波及伪码序列与接收到的卫星信号中对应载波频率及伪码序列进行相关运算, 再通过鉴频器与鉴相器的工作, 即可以得出载波频率与码相位的修正值, 且二者均带有噪声^[4-6].

载波鉴频器输出的频率修正量含有热噪声等因素在内的噪声值. 在相对很多时间单元内, 可以用该段时间中点的频率修正量来代替整段时间内的频率修正量, 通过利用该中间点量值递拟合出时间段末点的频率修正量, 并将该值用作下一时刻初值.

码相位修正值和频率修正值与鉴相器输出端的关系如下:

$$E_{\text{code},k} = t_{b,k} + (X_k - \hat{X}_k)^T a_{j,k} + \eta_{j,k}$$

$$E_{\text{carrier},k} = \Delta t_{d,k} + (V_k - \hat{V}_k)^T a_{j,k} + w_{j,k}$$

式中, $\Delta t_{d,k}$ 为 $t_{d,k}$ 和 $t_{d,k-1}$ 之差. 如上文的方程和分析所述, 如果两个修正量可以被估计出来, 那么位置/速度的真实值可得.

选取扩展卡尔曼滤波器来实现迭代过程.

$$\text{一步预测方程: } \hat{X}_{k+1|k} = F_k X_{k|k};$$

$$\text{预测误差方程: } P_{k+1|k} = F_k P_{k|k} F_k^T + Q_k;$$

卡尔曼增益方程:

$$K_k = P_{k+1|k} H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1};$$

状态估计方程:

$$\hat{X}_{k+1|k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + K_{k+1} (Z(X_{k+1}) - E_{k+1});$$

估计误差方程:

$$P_{k+1|k+1} = (I - K_{k+1} H_{k+1}) P_{k+1|k}.$$

式中, Q_k 为 W_k 的协方差矩阵, 与运载体运动相关; R_{k+1} 为测量噪声协方差矩阵, 反映信号信噪比变化的情况.

采用矢量跟踪的方法比采用传统的标量跟踪方法具有更低的跟踪门限、更可靠的跟踪稳定性和更好地定位精度. 矢量跟踪方法的前提是, 系统已经初步获得了较为准确的接收机状态信息, 以此来估计下一时刻的接收机本地状态.

3 矢量跟踪模型建立

建立跟踪模型, 整个离散系统的状态变量为 $\delta X, \delta V, t_b$ 和 Δt_d . 系统的状态方程如下:

$$X_{k+1} = F_{k+1} X_k + W_k,$$

$$X_{k+1} = [\delta X_{k+1} \ \delta V_{k+1} \ t_{b,k+1} \ \Delta t_{d,k+1}]^T.$$

状态转移矩阵 $F_{k,k+1}$ 为

$$F_{k,k+1} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & t_{k,k+1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_{k,k+1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{k,k+1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & t_{k,k+1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

系统的量测就是码鉴相器和载波鉴相器的输出. 量测方程可以写为

$$Z_k = H X_k + V_k = [z_{\text{cod},1,k} \ z_{\text{carrier},1,k} \ \dots \ z_{\text{cod},n,k} \ z_{\text{carrier},n,k}]^T$$

其中:

$$z_{\text{cod},j,k} = \delta X_{k+1} a_{j,k} + t_{b,k} + \eta_{j,k}$$

$$z_{\text{carrier},j,k} = \delta V_{k+1} a_{j,k} + \Delta t_{d,k} + w_{j,k}$$

鉴相器输出作为测量量输入扩展卡尔曼滤波器, 得到接收机位置、速度修正量, 然后进行误差反馈, 校正预测值, 如下所.

$$\text{位置: } X_{k+1} = \hat{X}_{k+1} + \delta X_{k+1};$$

$$\text{速度: } V_{k+1} = \hat{V}_{k+1} + \delta V_{k+1};$$

码相位:

$$\varphi_{j,k+1} = \hat{\varphi}_{j,k+1} + \delta X_{k+1} a_{j,k+1} + t_{k,k+1} c + t_{b,k};$$

码频率:

$$f_{\text{code},j,k+1} = \hat{f}_{\text{code},j,k+1} + (t_{d,k+1} + \delta V_{k+1}^T a_{j,k+1}) f_{\text{code}}/c;$$

载波频率:

$$f_{j,k+1} = \hat{f}_{j,k+1} + (t_{d,k+1} + \delta V_{k+1}^T a_{j,k+1}) f_n/c.$$

这样就完成一次完整的定位滤波。

4 系统搭建与验证

4.1 接收机设计

该接收机设计如图 2,包括射频功分电路、四频点的射频处理电路、相关器、高性能 DSP 及时钟、电源、存储等电路. 由于设计天线采用无源天线,射频功分电路需要将四个频点信号经过多次放大及滤波后送入射频处理电路,经过下变频及数字采样,送入有 FPGA 搭建的相关器中,进行同步数字信号处理,同时采用一个高性能 DSP 作为矢量接收机大数据量运算的核心处理器。

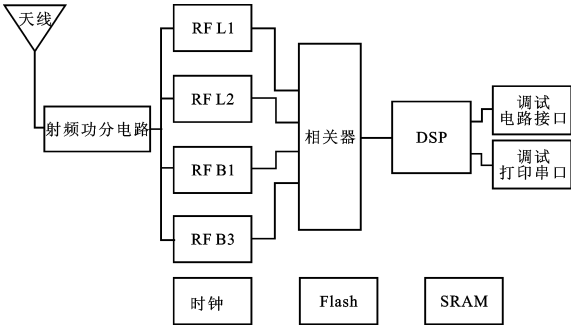


图 2 硬件结构图

接收机在初次启动后,首先进入传统标量模式,在正常定位后根据运行条件启动矢量模式,来进行矢量跟踪及定位. 矢量接收机通过接收机和卫星当前导航参数以及星历预测下一时刻的导航参数及各个通道的伪码相位和载波频率,这些预测值用于调整本地伪码和载波的生成. N 个通道的鉴相器输出作为测量量输入扩展卡尔曼滤波器即矢量模块,得到接收机位置、速度修正量,用来修正预测的接收机的位置、速度量,从而得到接收机当前更准确的导航参数. 矢量模式工作流程图如图 3 所示。

4.2 应用验证

搭建 PC104 标准结构接收机样机后,通过信号源标准信号进行实验来验证矢量接收机的跟踪及定位性能。

在信号源上进行静态实验,进行标准信号输出且接收机已经正常定位后,将部分卫星的信号屏蔽 1 分钟后再恢复,对比常规标量接收机与矢量接收机在这无信号的 1 分钟内码环鉴相误差值,如图 4 所示,矢量接收机能够完全避免标量接收机在信号丢失后的失锁而继续稳定跟踪。

矢量接收机的跟踪精度,采用信号源上标准空间卫星轨道载体模型进行仿真,载体运行最大速度

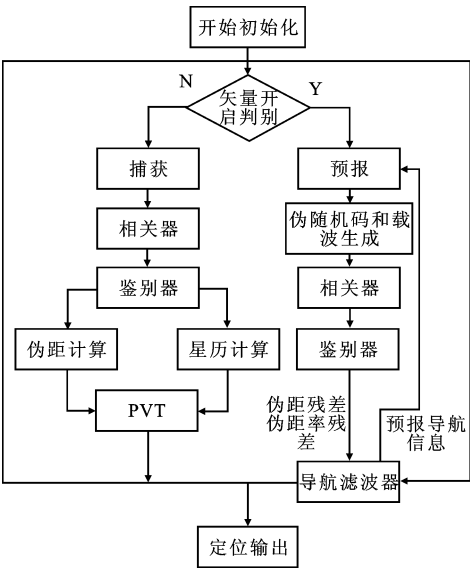


图 3 矢量模式工作流程图

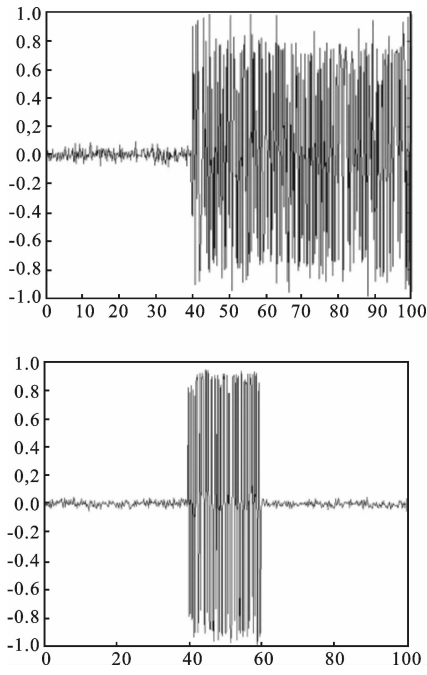


图 4 信号失锁下标量与矢量跟踪码相位误差对比

接近第一宇宙速度,分别使用标量模式和矢量模式对比定位精度,如图 5 和图 6 所示。

表 1 星载场景标量、矢量模式三轴误差

	标量模式 均值	标量模式 方差	矢量模式 均值	矢量模式 方差
X 轴	5.038	2.181	2.681	1.241
Y 轴	5.251	2.275	3.164	1.347
Z 轴	6.730	3.112	2.397	1.023

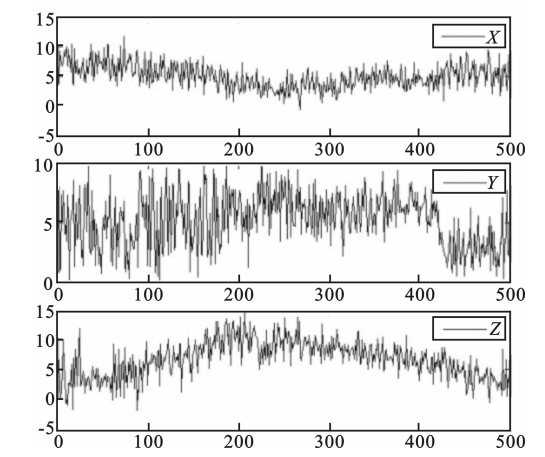


图 5 星载场景标量模式定位误差

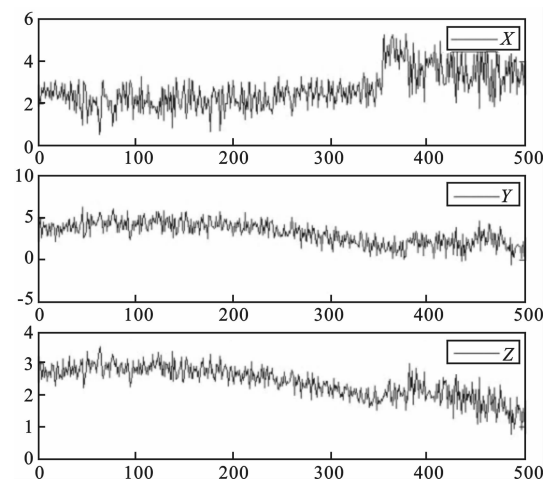


图 6 星载场景矢量模式定位误差

从图 5、图 6 和表 1 可以看出,在同等星载情况下,矢量模式的定位误差小于标量模式的定位误差.

5 结束语

矢量接收机跟踪环路算法将来自多颗卫星导航

信号的跟踪和定位解算结合起来,通过对多个通道的信号跟踪与运动模型共同进行融合滤波,更好地抑制了观测中噪声,同时更快地适应了载体运动的变化,提高了接收机的灵敏度、动态性、定位精度,已经成为了下一代 GNSS 接收机研究的一个重要方向.

参考文献:

[1] Parkinson B W, Spilker Jr J J, Chapter 7 fundamentals of signal tracking theory. Global positioning system: Theory and applications volume 1[M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996: 290-305.

[2] Lashley M, Bevy D M. What are vector tracking loops and what are their benefits and drawbacks[J]. GNSS Solution Column, 2006(4): 16-21.

[3] Lashley M, Bevy D M, Hung Y J. Performance analysis of vector tracking algorithms for weak GPS signals in high dynamics[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(4): 661-673.

[4] 朱珍珍, 汤广富. 基于矢量延迟锁定环的 GPS 跟踪算法[J]. 自然科学进展, 2009, 19(9): 1021-1028.

[5] 赵金峰, 常江, 尹冉冉. 基于矢量跟踪的导航接收机研究综述[J]. 数字通信世界, 2011, 8(8): 46-49.

[6] 胡小平, 于海亮, 唐康华. 基于软件 GPS 接收机的高动态跟踪环路设计[J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(6): 682-685.

作者简介:

尹骁阳 男, (1990-), 硕士. 研究方向为导航系统. E-mail: yxy yinxiaoyang@hotmail.com.

李文杰 男, (1984-), 硕士, 工程师. 研究方向为导航系统.

赵元富 男, (1962-), 博士, 研究员. 研究方向为计算机设备与半导体物理与器件.