

GNSS 接收机矢量跟踪算法研究综述

程俊仁, 刘光斌, 姚志成
(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘 要: GNSS 接收机信号跟踪的实质是对卫星信号的扩频码延迟和载波频率偏移进行连续估计的过程。从信号跟踪的基本原理出发, 综述了矢量跟踪算法的基本思想和研究历程, 分析了算法中系统建模、模型参数确定和滤波器设计等关键环节, 总结比较了算法的最新衍变形式, 包括极大似然估计矢量跟踪环和联合矢量位置跟踪环的模型、特点和优势, 通过仿真验证了矢量跟踪相比标量跟踪具有失锁重捕快、跟踪误差小和稳定性好的优点, 最后总结了矢量跟踪技术的应用并展望了其未来发展方向。

关键词: 卫星导航接收机; 信号跟踪; 矢量跟踪; 矢量延迟/频率锁定环; 极大似然矢量跟踪环

中图分类号: TP98 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2014)04-0380-08

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2014.04.002

Review on Vector Tracking Algorithm for GNSS Receiver

CHENG Jun-ren, LIU Guang-bin, YAO Zhi-cheng
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: The essential goal for GNSS signal tracking is to make a continued estimation for the PRN code delay and the Doppler offset of the carrier frequency. To begin with the principle of signal tracking, an in-depth survey of vector tracking (VT), including its history and basic ideals, key steps such as system modeling, the model parameter calculation and the filter design is presents in this paper. Noteworthy variants of VT including the Maximum Likelihood Vector Tracking Loop (MLVTL) and the Joint Vector Position Tracking Loop (JVPTL) are also covered, and models, characters and advantages of the two VT algorithms are summarized compared with Vector Delay/Frequency Lock Loop (VDFLL). Simulation results show that vector tracking loop performs well in reacquisition time and tracking residuals and it's more robust compared with scalar tracking loop especially under the weak signal environment. Lastly, it is concluded that a brief review of possible application areas for VT and its new research prospects in the future.

Key words: GNSS Receiver; Signal tracking; Vector tracking; Vector Delay/Frequency Lock Loop; Maximum Likelihood Vector Tracking Loop

0 引 言

随着卫星导航应用领域的不断拓展和应用环境的日趋复杂, 提高卫星导航接收机在复杂应用环境下的连续可用性, 成为了卫星导航领域研究的热点课题^[1]。信号跟踪作为接收机算法设计中最为关键的环节之一, 对接收机的性能起着决定性的作用, 其本质是对卫星信号的扩频码延迟和载波频率偏移

进行连续估计的过程。在传统接收机的结构中, 各跟踪环路对伪距和伪距率的测量是相互独立的, 每个通道均可视为一个典型的非线性负反馈系统, 各测量值分别送入导航解算器进行导航解算, 这种跟踪模式也称之为标量跟踪。与之相反, 矢量跟踪则是通过一定的方法将所有卫星跟踪通道耦合在一起, 直接对用户的位置和钟差状态进行估计, 估计的状态信息又转换为控制量对跟踪环路进行反馈控

制。由于充分挖掘了各卫星通道间共享的固有信息,矢量跟踪环可以在不增加任何外部辅助信息的情况下,提供更好的低信噪比和动态跟踪能力,还具有瞬时桥接被遮挡信号的能力,抗干扰能力强,鲁棒性更好,被认为下一代GNSS接收机最先进、最具发展前景的技术之一^[2-5]。本文从矢量跟踪的基本思想和研究历程出发,分析了矢量跟踪算法中的几个关键步骤,比较了其最新衍变形式,包括极大似然矢量跟踪环和联合矢量位置跟踪环的特点和优势,最后展望了矢量跟踪的应用前景和发展方向。

1 矢量跟踪

1.1 矢量跟踪的基本思想与研究历程

矢量跟踪的思想基于这样一个事实:用户观测到的伪距和伪距率是由用户的位置、速度以及卫星星座的几何结构所共同决定的,接收机的各个跟踪通道之间并非毫无联系,算法的本质就是要充分挖掘这种潜在的联系信息,并在通道之间进行共享,以提高接收机的跟踪性能。在接收机内部,跟踪环路主要有三种:延迟锁定环DLL、锁频环FLL和锁相环PLL。对应的矢量跟踪环则是VDLL(Vector Delay Lock Loop, VDLL)、VFLL(Vector Frequency Lock Loop, VFLL)和VPLL(Vector Phase Lock Loop, VPLL)。实际上,对矢量跟踪优势的认识可以追溯到卫星导航系统的应用初期。1980年Copps在文献[6]中指出用于导航解算和信号跟踪的最优估计器的差别,仅仅在于其坐标不同,即用于位置、速度和钟差的最优估计器应当与用于诸卫星码相位和多普勒频移的最优估计器等效。然而,起初这一概念并未得到人们的广泛认同,原因之一是没有多少研究人员既熟悉卡尔曼滤波技术,同时也熟悉接收机设计技术。

直到1996年,Spilker在著名的GPS蓝皮书中提出了VDLL的概念^[7],建立了系统模型和观测模型,给出了VDLL的基本结构,采用扩展卡尔曼滤波技术(Extend Kalman Filter, EKF)实现导航状态的估计,并对矢量跟踪的优势进行了分析,然而文章对VDLL的具体实现细节描述较少。进入二十一世纪以后,随着惯性器件以及计算机技术的不断发展,矢量跟踪技术开始得到了众多研究者的青睐,研究的学者也相对集中。具有代表性的有德国慕尼黑大

学的Pany和Eissfeller为代表的研究团队^[8-11]、美国奥本大学的Lashley博士^[10-20]、加拿大卡尔加里大学的PLAN小组^[21-29],韩国的Konkuk大学^[30-33],以及国内的清华大学和国防科大等高校^[34-40]。研究内容主要集中在矢量跟踪环的初始化、矢量跟踪环系统建模和模型参数确定方法、矢量跟踪环的稳定性问题、适用于矢量跟踪的载噪比估计技术、矢量跟踪环的通道信号质量监测技术以及矢量跟踪环在超紧耦合中的应用等方面,目前慕尼黑大学研究团队研制的ipexSR系列软件接收机^[9]和卡尔加里大学PLAN小组研制的GSNRx系列软件接收机^[24]中均已嵌入了矢量跟踪模块。

与传统跟踪环路相比,矢量跟踪环的突出优势在于:通过联合不同信号通道的观测信息和导航解的反馈信息提高信号跟踪的性能。因此,强信号可以辅助弱信号的跟踪,即使在信号阻塞的情况下,也能保持一定时间和一定精度的连续跟踪,并且在信号恢复时可以实现快速重捕。图1是典型的矢量跟踪环路的信号处理流程图。

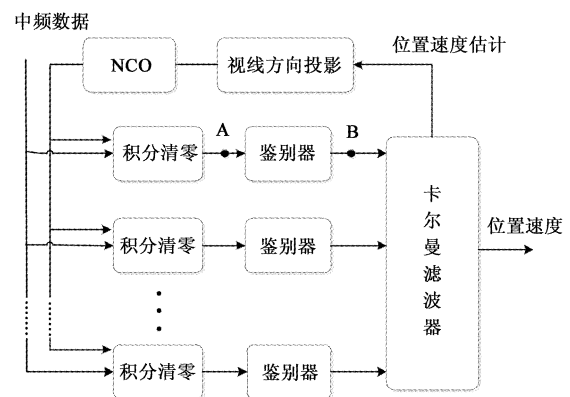


图1 矢量跟踪环路处理流程

Fig.1 Block diagram of vector tracking loop

通道的耦合和信息的反馈通常是通过卡尔曼滤波器来实现的,因此系统建模、模型参数的确定以及滤波器的结构设计是矢量跟踪算法的关键步骤。

1.2 系统建模与模型参数确定

矢量跟踪环的数学模型集中体现为导航滤波器的系统方程和观测方程的建模。依据选取的状态量,可以建立不同的系统模型,典型的量选取方法有两种。一种是选择“位置状态量”,即接收机的三维位置参数以及时钟偏移量,这种方法直接描述载体的运动状态。如采用位置、速度、钟差和钟漂的

状态变量可取为:

$$\mathbf{X} = [x, \dot{x}, y, \dot{y}, z, \dot{z}, b, \dot{b}]^T \quad (1)$$

另一种则是选择“伪距状态量”,即接收机与卫星之间的伪距信息,这种方法是通过伪距的形式间接描述载体的运动状态。如对于 N 颗可见卫星,采用伪距、伪距率的状态变量可取为:

$$\mathbf{X} = [\rho_1, \dot{\rho}_1, \rho_2, \dot{\rho}_2, \dots, \rho_N, \dot{\rho}_N]^T \quad (2)$$

Lashley 在其博士论文中用方差分析的方法证明了上述两种采用“位置状态量”和“伪距状态量”描述的系统方程本质上是等效的^[19]。

观测方程的建立主要取决于采取的观测量。图 1 中 A 点是相关器相干累加的结果, B 点是鉴别器的输出结果。如果直接取 A 点输出为观测量,则某一通道的观测量可表示为:

$$\mathbf{Z} = [I_E, Q_E, I_P, Q_P, I_L, Q_L]^T \quad (3)$$

其中 $I_E, Q_E, I_P, Q_P, I_L, Q_L$ 分别为超前、即时和滞后支路的 I, Q 积分累加值。

采用 A 点的信号可以直接处理最原始的观测量,但单通道的观测量维数就有六维,计算量较大,因此通常采用 B 点的信号作为观测量。实际上,码相位和载波多普勒经过单位换算,即可变为伪距和伪距率输出,其计算公式为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \Delta\rho \\ \Delta\dot{\rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\tau c/R_c \\ -\Delta f \cdot c/f_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 c 为光速, R_c 为 C/A 码速率, f_L 为载波频率, $\Delta\tau$ 和 Δf 分别为码相位和载波多普勒偏差。依据选取的状态量和观测量,即可建立相应的状态方程和观测方程,如果针对高动态应用环境,可以增加相应的高阶变化量。

对于矢量跟踪环而言,系统噪声主要来源于载体的动态响应误差和接收机的晶振引起的相位和频率抖动误差,载体动态响应误差一般通过马尔科夫过程建模,方差的大小取决于载体动态水平的期望值;而晶振误差一般依据晶振的类型进行建模,方差采用相应的经验值。观测噪声主要取决于建立的观测方程、采用的鉴别器函数和信号的载噪比,目前大部分的应用实例均采用蒙特卡洛仿真的方法,获取不同载噪比条件下的噪声方差值并进行存储,依据信号处理过程中实时估计的载噪比查表进行相应的调整。文献[37]中提出了一种基于新息的自适应卡尔曼滤波方法,通过对量测噪声协方差阵进行实

时调整,使其能够适应不同的载噪比环境,提高了载波频率和导航解的估计精度。文献[38]中以归一化超前减滞后功率型鉴别器为基础,推导了采用码相位误差作为观测量的量测噪声协方差阵的解析表达式,给出了 VDLL 的线性化模型,具有一定的实用性。采用类似的方法,可以推导不同的 DLL 鉴别器、FLL 鉴频器条件下量测噪声的统计特性。

1.3 滤波器设计

矢量跟踪算法的基础是卡尔曼滤波,然而,矢量跟踪环的非线性模型和典型的 50 Hz 以上的 I, Q 输出速率,给滤波器的设计带来了很大困难。处理非线性问题最常用的方法是采用 EKF,目前矢量跟踪算法中大都也是采用这种方法,对于第二个问题,可以考虑采用不同结构的卡尔曼滤波器。一种方式是采用集中式卡尔曼滤波,即用一个单独的滤波器对所有接收机通道的信息进行集中处理,集中滤波器以较高的速率(如 50 Hz)对伪距和伪距率进行预测,利用相关器输出的伪距和伪距率残差,以相同的速率对滤波器状态进行修正,更新后的状态再用来预测下一时刻的伪距和伪距率,集中式滤波矢量跟踪结构图如图 2 所示。

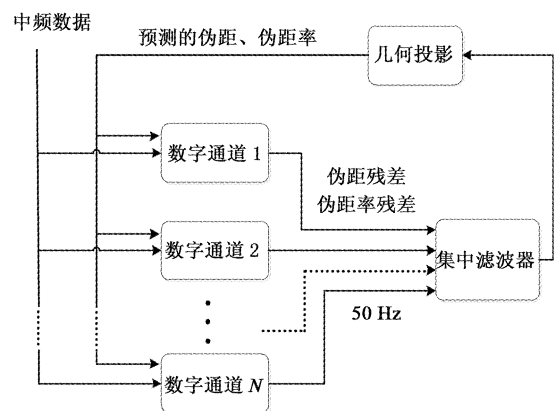


图 2 集中式滤波矢量跟踪结构图

Fig. 2 Block diagram of centralized filter based vector loop

集中式的优点是结构简单,滤波性能优越,但是由于更新速率高,计算负担较重。级联型的滤波结构可以缓解这一问题,其基本思想是利用一个主滤波器和一系列的残差滤波器进行组合滤波^[19]。主滤波器以较低的速率(如 1 Hz)预测接收到的伪距和伪距率,残差滤波器状态变量选择为状态偏差,利用相关器输出的伪距和伪距率残差,以较高的速

率(如 50 Hz)对主滤波器预测的伪距和伪距率的偏差进行估计并修正。残差滤波器经过一个周期的滤波后,其状态估计值将作为观测量送入主滤波器,而后残差滤波器状态重新置零,进入下一轮滤波,并以此循环。图 3 为采用一个主滤波器加一个残差滤波器的级联式滤波矢量跟踪结构图。

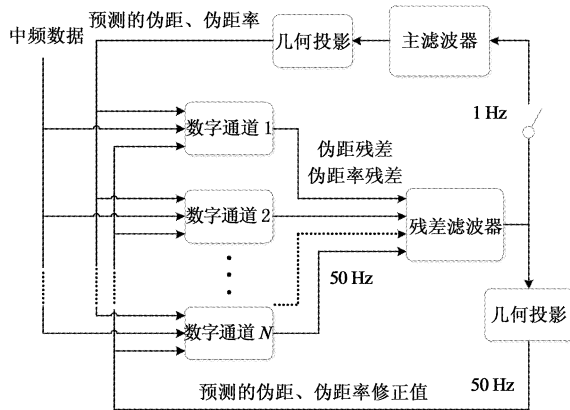


图 3 级联式滤波矢量跟踪结构图

Fig. 3 Block diagram of federated filter based vector loop

对于通用接收机而言,EKF 可以满足计算要求。然而,随着应用环境的日趋复杂,特别是在一些高动态应用场合,高度的非线性增加了用 EKF 进行状态估计的难度,因此需要采用非线性滤波算法,如无迹卡尔曼滤波、粒子滤波、以及容积卡尔曼滤波等。在 GPS/INS 组合导航算法中已广泛采用非线性滤波技术^[41-47]。

2 矢量跟踪技术研究的新进展

近年来,随着卫星导航应用领域的不断拓展和应用环境的日趋复杂,接收机矢量跟踪理论的发展备受关注,其理论创新主要集中在通过改进矢量跟踪算法提高接收机的灵敏度。

2.1 极大似然矢量跟踪环

2010 年,Weill 博士提出了极大似然矢量跟踪环(Maximum Likelihood Vector Tracking Loop, MLVTL)^[48]。Weill 认为,传统的矢量跟踪环中,虽然耦合了鉴别器的所有输出结果,但是每一个卫星通道的量测残差仍然是独立估计的,因此传统矢量跟踪环的性能仍然是次优的。MLVTL 正是基于这一思想,舍弃了传统接收机中经典的鉴别器环节,取而代之的是一个极大似然估计器,其构造的最大化代价函数为:

$$J = \sum_{k=1}^N \sum_{n=1}^D \left| \int_{I_{k,n}} r(t) m_k(t) \exp(-j\omega_k t) dt \right|^2 \quad (5)$$

其中, k 代表可见卫星的序号, n 代表数据比特内相干积分索引, $r(t)$ 表示输入的复信号, $m_k(t)$ 为 C/A 码, ω_k 为角频率, $I_{k,n}$ 为积分区间。

上述代价函数的主要特点在于外部的累加操作。即在各通道非相干累加的基础上,将所有卫星的相关结果再进行累加,构成各通道联合的量测残差,取代了各通道鉴别器输出的独立的量测残差。通过建立码相位、载波频率与用户位置、速度、钟差、钟漂等导航参数之间的转换关系,搜索导航参数,使 J 达到最大,本质上是一种基于导航解的跟踪环路(Navigation Domain Tacking Loop),其实现框图如图 4 所示。

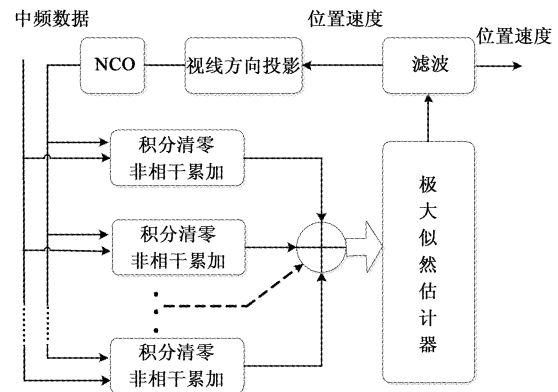


图 4 MLVTL 结构图

Fig. 4 Block diagram of new MLVTL

与 VDFLL 相比,MLVTL 将数据融合的操作向接收机信号处理的前端又推进了一步,可以处理更原始的信号,且综合了所有通道的相关结果,理论上可以取得更好的跟踪性能。同时,MLVTL 可以避免卡尔曼滤波可能出现的数值稳定性问题,且不受鉴别器线性范围的限制,如果加入环内地图辅助(In-the-loop map aiding)的方法,可以进一步降低跟踪门限,减少定位所需的最少卫星数目。

Lin 等在 Weill 的基础上进行了拓展研究,在 GSNRx 软件接收机上实现了 MLVTL 算法,给出了相关结果从信号域到空间域之间的转换关系^[27],利用实际数据测试了算法在室内定位中的性能表现。其结果表明,相比集中式矢量跟踪环路而言,当相干积分时间较长时(如 500 ms),由于鉴别器能够给出较好的输出结果,两者总体性能相似,但随着相干积

分时间的缩短(如 100 ms), MLVTL 的性能优势逐渐体现出来。

2.2 联合矢量位置跟踪环

清华大学的刘菁提出一种联合矢量位置跟踪环(Joint Vector Position Tracking Loop, JVPTL)^[34-36]。其基本思想基是将接收到的基带复信号在最优估计值处进行 Taylor 展开,直接建立基带信号与导航参数之间的线性化模型。

$$x(t) = \hat{x}(t) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial x(t)}{\partial a_i} (a_i - \hat{a}_i) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial x(t)}{\partial \varphi_i} (\varphi_i - \hat{\varphi}_i) + \frac{\partial x(t)}{\partial x_u} (x_u - \hat{x}_u) + \frac{\partial x(t)}{\partial y_u} (y_u - \hat{y}_u) + \frac{\partial x(t)}{\partial z_u} (z_u - \hat{z}_u) + \frac{\partial x(t)}{\partial b_u} (b_u - \hat{b}_u) + n(t) \quad (6)$$

其中 N 表示卫星数目, a_i 表示信号幅度, φ_i 表示载波相位, (x_u, y_u, z_u, b_u) 表示用户的位置和钟差, $n(t)$ 表示噪声。

利用极大似然估计器构造一个导航参数鉴别器,计算所有通道的信号幅度、载波相位、用户位置和钟差的偏差,然后利用卡尔曼滤波器进行更加精确的导航参数状态估计,以控制 NCO 生成精确的本地码和载波。其实现框图如图 5 所示。

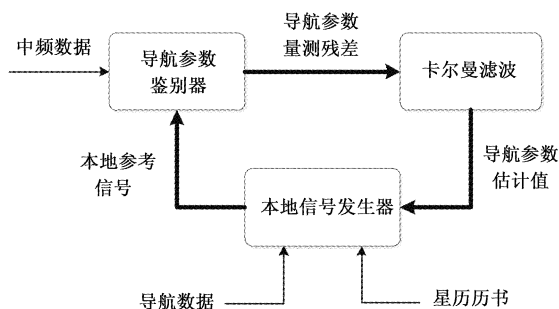


图 5 JVPTL 结构图

Fig. 5 Block diagram of JVPTL

由于导航参数鉴别器输出的是积分时间间隔内偏差量的平均值,是一种相干鉴别器,具有更低的跟踪门限,如相干积分时间较短,在一定程度上可以缓解热噪声水平和动态忍受力之间的矛盾。仿真结果表明,在城市车载等典型的动态弱信号环境下, JVPTL 比 VDFLL 具有更好的跟踪性能,在加速度大于 0.1 g 时, VDFLL 的跟踪门限要比 JVPTL 高 4 dB 左右,但由于维数高, JVPTL 计算量要大很多。

从本质上看, MLVTL 和 JVPTL 的根本出发点都是更大限度地利用观测信息进行信号估计,致力于直接建立卫星信号和导航参数之间的函数关系。其研究成果也进一步证实了在不同层次上的融合是可行的,由于是在空间域进行合并,因此不同调制方式下的信号相关结果经转换后可以直接合并,这为多系统的联合矢量跟踪提供了思路。

3 矢量跟踪技术的应用

矢量跟踪理论的发展与其应用的需求是紧密联系的,典型的应用领域是弱信号处理和组合导航。Pany 等人研究了弱信号条件下适合矢量跟踪的载噪比估计方法^[10],提出采用脉冲估计和微分估计的方法来计算信号的载噪比,给出了仰角和载噪比之间的关系,探讨了利用低仰角卫星进行辅助跟踪的可能性。Lashley 等人研究了 VDFLL 在信号衰减和遮挡严重的丛林和城市环境中的性能表现^[19],采用实际的跑车数据进行测试,结果表明:在信号衰减严重的时段, NovAtel ProPak-V3 接收机会出现定位的盲区和奇异点,而矢量接收机则可以保持稳定的跟踪,这样的优势在信号载噪比高而可见卫星数目少的情况下更加明显。

抗干扰和组合导航是矢量跟踪的另一重要应用领域。矢量跟踪环的稳定性和通道之间的联合提高了接收机抗主动干扰的能力,基于矢量结构的 GPS/INS 深组合方案,代表了 GNSS 接收机和 INS 信息的一种最优融合。Petovello 等人研究了矢量结构的 GPS/INS 组合导航算法^[21],其初衷就是要提高接收机的抗干扰能力。依据提取的观测量的不同,给出了三种 GPS/INS 深组合的滤波器结构设计,结果表明在载噪比达到 15 dB 的条件下均可以维持稳定的跟踪,提高 7 dB 左右。在采用矢量跟踪环的 GPS/INS 深组合方案中, INS 不再被看成一个独立的导航仪,而是 GNSS 接收机的组成部分^[45]。Lashley 研究了三种不同结构的矢量跟踪环结构,通过改变协方差矩阵的非对角元素进行通道间的耦合和解耦控制^[19],在此基础上分别引入了 INS,其研究表明采用矢量模式的深组合算法性能最优,在弱信号条件下优势更加明显。

4 VDFLL 应用实例

下面举一个 VDFLL 的例子说明矢量跟踪相对

标量跟踪的优势。状态变量和观测量的选取如1.2节式(1)和式(4)所示,建立偏差状态方程。EKF的观测余量由鉴别器输出的码相位偏差和载波频率偏差产生,选取归一化超前减滞后功率型DLL鉴别器和四象限叉积型FLL鉴别器生成 $\Delta\tau$ 和 Δf 。

仿真数据采用自行研制的GPS中频信号仿真器产生,仿真了卫星号为1、4、7、11、21的5颗卫星共100s静态数据,前60s均为正常状态,在第60s屏蔽掉4号、7号和11号星,第70s再恢复。采用矢量模式时,前50s的数据使用标量模式进行处理,50s以后转入矢量跟踪模式。图6和图7给出了4号星后50s码相位和载波频率的跟踪结果。

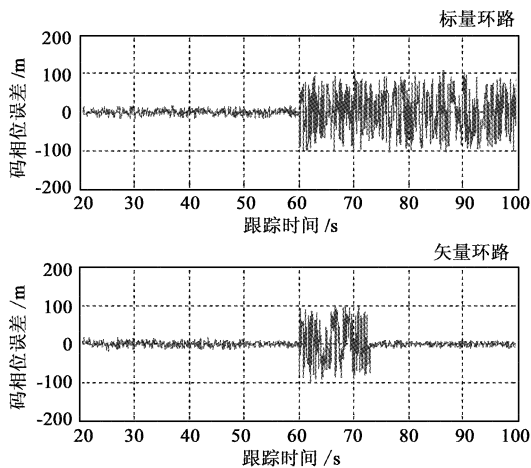


图6 4号星码相位跟踪误差

Fig. 6 Code phase error of tracking for SV4

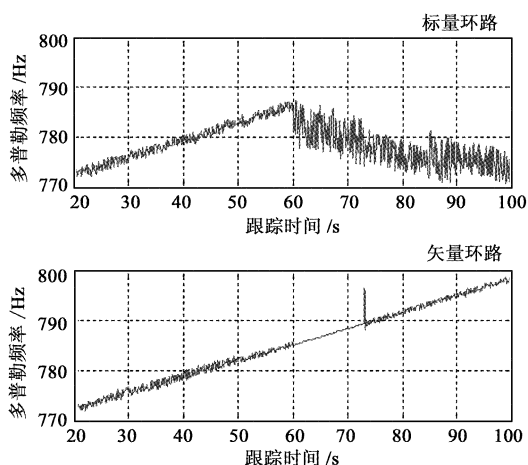


图7 4号星多普勒频移估计

Fig. 7 Doppler frequency estimate for SV4

从图6和图7中可以发现:第60s信号消失,标量环路码相位和多普勒频移跟踪出现偏差;第

70s信号恢复以后,标量环路继续失锁,而矢量环路可以迅速恢复跟踪。在信号消失期间,位置速度估计更多的是依赖EKF的状态方程,且整个跟踪过程中,矢量环路的跟踪偏差要小于标量环路。以上结果说明了矢量环路相对于标量环路的优越性。

5 结束语

矢量跟踪算法的优势非常明显,已经成为了下一代GNSS接收机研究的一个重要方向。但目前矢量跟踪算法的发展仍然不够成熟,在具体的实现过程中也面临着诸多困难。以下内容即是后续矢量跟踪算法研究中面临的课题及发展方向。

1) 计算量大是限制矢量跟踪应用的主要问题。因此,寻求更加高效的计算方法仍是研究的热点,一方面可以利用地图辅助以减少计算量,如城市车载导航中的地图辅助跟踪环技术;另一方面可以结合计算机硬件和并行处理技术,如利用图形处理器GPU辅助进行并行处理,提高计算效率。

2) 多体制、多星座联合矢量跟踪技术。新型信号体制(如BOC调制)的应用和各国卫星导航系统的建设和完善(如Compass系统),使得可用的卫星数目和信号类型不断增多。受MLVTL算法的启发,可以研究基于相关器层次融合的多星座、多体制导航信号联合矢量跟踪算法。

3) 随着惯性器件的不断发展(如低成本MEMS),采用矢量结构的GNSS/INS深组合算法仍将是研究热点。深组合算法的实现困难在于如何在接收机内部深度整合INS信息和GNSS信息,这涉及到接收机硬件结构的改变,但却可以显著提高接收机的动态性能和抗主动干扰能力。

4) 除了与INS的组合,卫星导航与其他无线定位方式的融合将是另一个重要的发展方向。由于用户位置的估计精度将直接影响矢量跟踪的性能表现,利用超宽带测距技术(UWB)和Wi-Fi无线定位技术等可以为矢量环路提供更加精确的用户状态估计值,以此提高矢量接收机的跟踪性能。

参 考 文 献

- [1] Kaplan E D, Hegarty C J. Understanding GPS: principles and applications [M]. Norwood, Massachusetts, USA: Artech House, Inc. 2006.

- [2] Won J H, Pany T, Hein G W. GNSS software defined radio: real receiver or just a tool for experts[J]. Inside GNSS, July/August 2006, 1(6): 48 -56.
- [3] Lashley M, Bevely D M. What are vector track loop and what their benefits and drawbacks[J]. Inside GNSS, May/June 2009, 4(3): 16 -21.
- [4] Won J H, Eissfeller B. Effectiveness analysis of vector tracking loop in signal fading environment[C]. NAVITEC, Noordwijk, the Netherlands, December 8 -10, 2010.
- [5] Lashley M, Bevely D M, Hung J Y. A valid comparison of vector and scalar tracking loops [C]. IEEE/ION PLANS, Indian Wells, USA, May 4 -6, 2010.
- [6] Copps E M, Geier G J, Fidler W C, et al. Optimal processing of GPS signals[J]. NAVIGATION, 1980, 27(3): 171 -182.
- [7] Parkinson B W, Spilker J J. Global positioning system: theory and applications, Volume I [M]. Washington, DC, USA: American Institute of Astronautics and Aeronautics, Inc. 1996.
- [8] Pany T, Kaniuth R, Eissfeller B. Deep integration of navigation solution and signal processing[C]. ION GNSS, Long Beach, USA, September 13 -16, 2005.
- [9] Pany T, Kaniuth R, Eissfeller B. Testing a vector delay/frequency lock loop implementation with the ipex software receiver [C]. ION GNSS, Long Beach, USA, September 13 -16, 2005.
- [10] Pany T, Eissfeller B. Use of a vector delay lock loop receiver for GNSS signal power analysis in bad signal conditions[C]. IEEE/ION PLANS, San Diego, USA, May 25 -27, 2006.
- [11] Anghiler M, Pany T, Sanroma D. Performance evaluation of a multi-frequency GPS/Galileo/SBAS software receiver[C]. ION GNSS, Fort Worth, USA, September 25 -28, 2007.
- [12] Lashley M. Kalman filter based tracking algorithms for software GPS receiver [D]. Auburn: Auburn University of the USA, 2006.
- [13] Lashley M, Bevely D M. Analysis of discriminator based vector tracking algorithm[C]. ION NTM, San Diego, USA, January 22 -24, 2007.
- [14] Lashley M, Bevely D M. Comparison of traditional tracking loops and vector based tracking loops for weak GPS signals[C]. ION GNSS, Fort Worth, USA, September 25 -28, 2007.
- [15] Lashley M, Bevely D M. Comparison of adaptive estimation techniques for vector delay/frequency tracking [C]. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, USA, 2008.
- [16] Lashley M, Bevely D M. A comparison of the performance of a non-coherent deeply integrated navigation algorithm and a tightly coupled navigation algorithm[C]. ION GNSS, Savannah, USA, 2008.
- [17] Lashley M, Bevely D M, Hung J Y. 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.
- [18] Lashley M, Bevely D M. Vector delay/frequency lock loop implementation and analysis[C]. ION ITM, Anaheim, USA, January 26 -28, 2009.
- [19] Lashley M. Modeling and performance analysis of GPS vector tracking algorithms [D]. Auburn: Auburn University of the USA, 2009.
- [20] Lashley M, Bevely D M. Performance comparison of deep integration and tight coupling[C]. ION GNSS, Portland, USA, September 19 -23, 2011.
- [21] Petovello M G, Lachapelle G. Comparison of vector-based software receiver implementations with application to ultra-tight GPS/INS integration [C]. ION GNSS, Fort Worth, USA, September 26 -29, 2006.
- [22] Petovello M G, O' Driscoll C, Lachapelle G. Weak signal carrier tracking using extended coherent integration with an ultra-tight GNSS/IMU receiver [C]. European Navigation Conference, Toulouse, France, April 23 -25, 2008.
- [23] Petovello M G, Chan B. Collaborative vector tracking of GNSS signals with ultra-wideband augmentation in degraded signal environments[C]. ION ITM, San Diego, USA, January 24 -26, 2011.
- [24] PLAN (Position, Location and Navigation) groups in university of calgary. GNSRXTM-GNSS navigation software receiver. [http://plan.geomatics.ucalgary.ca/project_info.php? pid = 27](http://plan.geomatics.ucalgary.ca/project_info.php?pid=27), 2011. 10.
- [25] Chan B. DGPS and UWB aided vector - based GNSS receivers for weak signal environments [D]. Calgary: University of Calgary, 2013.
- [26] Lin T, O' Driscoll C, Lachapelle G. Development of a context-aware vector based high-sensitivity GNSS software receiver[C]. ION ITM, San Diego, USA, January 24 -26, 2011.
- [27] Lin T, James T C, O' Driscoll C, et al. Implementation of a navigation domain GNSS signal tracking loop[C]. ION GNSS, Portland, USA, September 19 -23, 2011.
- [28] Lin T, Abdizadeh M, Broumandan A, et al. Interference suppression for high precision navigation using vector-based GNSS software receivers[C]. ION GNSS, Portland, USA, September 19 -23, 2011.
- [29] Jafarnia-Jahromi A, Lin T, Broumandan A, et al. Detection and mitigation of spoofing attacks on a vector-based tracking GPS receiver[C]. ION ITM, Newport Beach, USA, January 30-February 1, 2012.
- [30] Im S H, Song J H, Lee B H, et al. Anti-Jamming technique performance evaluation for GPS L1 CA software receiver[C]. ION GNSS, Fort Worth, USA, September 25 -28, 2007.

- [31] Kim K H, Jee G I, Song J H. The vector based tracking loop design using a combined receive tracking filter [C]. European Navigation Conference, Toulouse, France, April 23 - 25, 2008.
- [32] Kim K H, Song J H, Jee G I. The vector tracking loop design based on the extended kalman filter [C]. International Symposium on GPS/GNSS, Tokyo, Japan, November 11 - 15, 2008.
- [33] Kim K H, Song J H, Jee G I. The GPS vector tracking loop based on the iterated unscented kalman filter under the large initial error [C]. European Control Conference, Budapest, Hungary, August 23 - 26, 2009.
- [34] Liu J, Yin H, Cui X W, et al. A direct position tracking loop for GNSS receivers [C]. ION GNSS, Portland, USA, September 19 - 23, 2011.
- [35] Liu J, Cui X W, Chen Q, et al. Joint vector tracking loop in a GNSS receiver [C]. ION ITM, San Diego, USA January 24 - 26, 2011.
- [36] Liu J, Cui X W, Lu M Q, et al. A vector tracking loop based on ML estimation in dynamic weak signal environments [C]. The third China Satellite Navigation Conference, Guangzhou, May 18 - 22, 2012.
- [37] 赵思浩, 陆明泉, 冯振明. 基于自适应卡尔曼滤波的 GNSS 矢量锁定环路 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (7): 139 - 143. [Zhao Si-hao, Lu Ming-quan, Feng Zhen-ming. GNSS vector lock loop based on adaptive kalman filter [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44 (7): 139 - 143.]
- [38] 朱珍珍, 汤广富, 程翥, 等. 基于矢量延迟锁定环路的 GPS 信号跟踪算法 [J]. 自然科学进展, 2009, 19 (9): 1021 - 1028. [Zhu Zhen-zhen, Tang Guang-fu, Cheng Zhu, et al. GPS signal tracking algorithm based on vector delay lock loop [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19 (9): 1021 - 1028.]
- [39] 肖智斌, 唐小妹, 庞晶, 等. 矢量延迟锁定环码跟踪偏差产生机理研究 [J]. 中国科学: 物理学 · 力学 · 天文学, 2010, 40 (5): 568 - 574. [Xiao Zhi-bin, Tang Xiao-mei, Pang Jing, et al. The study of code tracking bias on vector delay lock loop [J]. Scientia Sinica Phy, Mech & Astron, 2010, 40 (5): 568 - 574.]
- [40] 唐康华. GPS/MIMU 嵌入式组合导航关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. [Tang Kang-hua. Research on the key technology of embedded GPS/MIMU integrated navigation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.]
- [41] Im S H, Song J H, Jee G I. Comparison of GPS tracking loop performance in high dynamic condition with nonlinear filtering techniques [C]. ION GNSS, Savannah, USA, September 16 - 19, 2008.
- [42] 程水英, 张剑云. 粒子滤波评述 [J]. 宇航学报, 2008, 29 (4): 1100 - 1111. [Cheng Shui-ying, Zhang Jian-yun. Review on particle filter [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29 (4): 1100 - 1111.]
- [43] 田宇, 刘亚欢, 杨根庆. 基于 Bayesian 准则的高灵敏度 GPS 信号跟踪 [J]. 宇航学报, 2009, 30 (4): 1472 - 1476. [Tian Yu, Liu Ya-huan, Yang Gen-qing. High sensitivity GPS signal tracking using a Bayesian approach [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30 (4): 1472 - 1476.]
- [44] 王康, 刘莉, 杜小菁, 等. 基于 UKF 的 GPS 定位算法 [J]. 宇航学报, 2011, 32 (4): 795 - 801. [Wang Kang, Liu Li, Du Xiao-jing, et al. GPS positioning algorithm based on UKF [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32 (4): 795 - 801.]
- [45] 沈锋, 贺瑞, 吕东泽, 等. 基于卡尔曼滤波器的高动态 GPS 载波跟踪环 [J]. 宇航学报, 2012, 33 (8): 1041 - 1047. [Shen Feng, He Rui, Lv Dong-ze, et al. High dynamic GPS carrier tracking loop based on kalman filter [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33 (8): 1041 - 1047.]
- [46] Arasaratnam I, Haykin S. Cubature kalman filters [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2009, 54 (6): 1254 - 1269.
- [47] Gleason S, Gebre-Egzbher D. GNSS 应用与方法 [M]. 杨东凯, 樊江滨, 张波, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [48] Weill L R. A high performance code and carrier tracking architecture for ground-based mobile GNSS receivers [J]. ION GNSS, Portland, USA, September 16 - 19, 2010.

作者简介:

程俊仁(1984 -),男,博士研究生,主要研究方向为卫星导航接收机弱信号处理。
通信地址:陕西西安第二炮兵工程大学 303 教研室(710025)
E-mail:jrcheng2009@163.com

(编辑:张宇平)