

一种多模 GNSS 接收机系统时间偏差求解方法

翟昆朋¹, 徐建华^{1,2}, 叶甜春¹

(1 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029; 2 杭州中科微电子有限公司, 浙江 杭州 310053)

摘 要: 系统时间偏差是在多模卫星导航接收机中兼容和互操作方面的一个重要问题. 传统的方法在多模接收机主 Kalman 滤波器中增加一个时间偏差状态量, 数据融合的同时解决系统时间偏差问题. 这种处理方法需要在主 Kalman 滤波器中对不同系统的测量值分别处理. 考虑到卫星系统时间差和信号硬件延迟相对缓变这一事实, 提出了一种新的系统时间互操作方法. 利用一个独立运作的 Kalman 滤波器实时估计系统时差, 这样接收机的主滤波器不需要增加新状态, 测量矩阵构建时可以对不同系统测量值同样对待. 经过 GPS/BD 多模接收机实际信号的对比测试验证, 新方法与传统方法相比性能相当.

关键词: GNSS 系统时差; 多系统兼容; DOP; GPS/BD; 卡尔曼滤波器

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)01-0072-04

One Method on Multi-System GNSS Receiver System Time Bias Solution

ZHAI Kun-peng¹, XU Jian-hua^{1,2}, YE Tian-chun²

(1 Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Hangzhou Zhongke Microelectronics Co. Ltd, Hangzhou 310053, China)

Abstract: Timing aspect of interoperability between GNSS systems is one of the key issues in multi-system GNSS applications. It is important to deal with the system time bias (STB) problem properly especially in unaided receivers. Traditional multi-system receivers solve this problem by adding an additional state in main KALMAN filter. Considering the STBs are relatively slow-varying variables, this paper proposes an innovative real time approach to estimate the system time bias between different satellite navigation systems. With the assistant of estimated system time bias, additional filter states is avoided and a simple and efficient measurement matrix can be constructed. Through several tests in a GPS/BD receiver, we can conclude that the new method has performance comparable with the traditional one.

Key words: GNSS System Time Bias; Multi-system interoperability; DOP; GPS/BD; KALMAN filter

1 引言

多系统兼容卫星导航接收机可用卫星信号数量显著增加, 能够完成定位、授时、频率校准和完好性等性能, 随着 Galileo 和北斗全球卫星导航系统星座的不断完善, 多系统兼容、多频成为接收机的发展趋势^[1-4]. 多系统兼容方法为接收机带来性能提升的同时, 也引入了互操作的问题. 本文将就多系统兼容定位中系统时间差的问题展开研究.

接收机本地时间相对于不同系统时存在差异,

那么处理不同系统卫星的伪距测量值时就需要区别对待, 即系统时间偏差问题. 为了互操作的考虑, GLONASS/Galileo/COMPASS(BD)系统会在历书中广播不同系统的时差, 但历书接收的延迟往往不能满足接收机实时性的要求. 不同接收机的硬件对卫星信号的硬件延迟有所不同, 这也是需要同时考虑的一个问题. 多模接收机中常用的方法是直接从伪距的定义出发, 引入多个本地时间与卫星系统时间偏差的未知量^[5-6]. 这种直接的方法能满足实时应用的需要, 却会导致 DOP 相对于单模接收机有所增

收稿日期: 2013-03-20; 修回日期: 2013-04-29

基金项目: 中国第二代卫星导航重大专项(GFZX03030204)

加^[7],另外不能充分利用卫星导航系统时间差高度稳定这一事实.文献[8]中介绍了 SHA 提供的系统时差以及相对硬件延迟产品的性能,不过对于没有其他通信手段而单独运行的民用接收机来说,这种解决方法行不通.

卫星导航系统时间都是由一系列的原子钟维护,系统间时差会是一个精确而相对缓变的数值.另外在外界温度不变的情况下,信号的硬件延迟也是一个相对缓变的参数.从这点出发,本文提出一种系统时差(包括硬件延迟)的实时估计方法,该方法在每个测量值更新历元时利用 LS 计算时间差的粗略估计值和精度评价因子,然后利用 KALMAN 滤波器对粗略估计值平滑.基于 KALMAN 输出的系统时差的估计值,不同系统的伪距测量值可以同样对待,那么多模接收机中主 KALMAN 滤波器的测量值融合方式可以得到简化.

2 伪距定位原理和传统数据融合方法

本节从卫星导航系统的伪距定位和定时原理出发,分析传统多模卫星数据融合方法,说明在多模接收机中的系统时间差问题.

2.1 伪距定位原理

伪距是卫星接收机中重要的测量值,因为伪距中包含了接收机本地时间相对卫星导航系统时间误差信号,多模接收机中需要对不同系统的伪距测量值分别处理.双模或多模接收机会得到的 GPS 和 BD 两个系统的卫星伪距测量值,其简化公式一般形式可以表示为

$$\rho_{\text{GPS}}^i = \sqrt{(x_{\text{GPS}}^i - x^r)^2 + (y_{\text{GPS}}^i - y^r)^2 + (z_{\text{GPS}}^i - z^r)^2} + dt_{\text{GPS}} c + \epsilon_{\text{GPS}}^i \quad (1)$$

$$\rho_{\text{BD}}^j = \sqrt{(x_{\text{BD}}^j - x^r)^2 + (y_{\text{BD}}^j - y^r)^2 + (z_{\text{BD}}^j - z^r)^2} + dt_{\text{BD}} c + \epsilon_{\text{BD}}^j \quad (2)$$

式中, (x, y, z) 表示接收机或卫星天线相位中心的 ECEF 坐标;上标 r 表示接收机;上标 i, j 表示卫星标号;下标 BD, GPS 表示导航卫星系统; dt 表示接收机本地时间相对系统时的偏差; c 为光速; ϵ 表示各个卫星的伪距误差,包括对流层延迟、电离层延迟、星历误差和测量噪声等.

对于 GPS 或 BD 的单模接收机来说,定位算法只需要处理 (x^r, y^r, z^r, dt) 四个未知量.有大于或等于四个伪距测量值可以利用,比如牛顿迭代的数值

方法得到接收机位置和时间的估计值^[9].接收机中最常用的处理方式 KALMAN 滤波器,其测量矩阵可以构造如下:

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} \frac{(x^r - x_{\text{SYS}}^1)}{R_{\text{SYS}}^1} & \frac{(y^r - y_{\text{SYS}}^1)}{R_{\text{SYS}}^1} & \frac{(z^r - z_{\text{SYS}}^1)}{R_{\text{SYS}}^1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{(x^r - x_{\text{SYS}}^m)}{R_{\text{SYS}}^m} & \frac{(y^r - y_{\text{SYS}}^m)}{R_{\text{SYS}}^m} & \frac{(z^r - z_{\text{SYS}}^m)}{R_{\text{SYS}}^m} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, m 分别表示 GPS 或 BD 系统的可用卫星数; R_{SYS}^i 表示接收机与某颗卫星的距离,下标为 SYS 系统标号 GPS 或 BD.

2.2 传统双模融合方式一

对于多模接收机来说,需要处理多个本地时间偏差未知量.直接按照式(1)、式(2)中卫星伪距的测量方程的形式,参考单模的模型,传统双模方法可以构造如下未知向量:

$$\mathbf{X} = [x^r, y^r, z^r, dt_{\text{GPS}}, dt_{\text{BD}}] \quad (4)$$

对非线性方程求未知数的偏导,得到伪距测量值对应的测量矩阵:

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} \frac{(x^r - x_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & \frac{(y^r - y_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & \frac{(z^r - z_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x^r - x_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & \frac{(y^r - y_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & \frac{(z^r - z_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & 1 & 0 \\ \frac{(x^r - x_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & \frac{(y^r - y_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & \frac{(z^r - z_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & 0 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x^r - x_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & \frac{(y^r - y_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & \frac{(z^r - z_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

与式(3)的单系统测量矩阵相比,矩阵由 4 列增加到 5 列,扩充方式直接利用两个系统测量值的简单组合, dt_{GPS} 和 dt_{BD} 同时按照单系统的方式估计,各自的估计误差都在同一量级.考虑到各个系统之间的时差是一个缓变的量,多系统组合还有另外一种形式.

2.3 传统双模融合方式二

第二种方式直接将两个系统的时间差作为待估计的状态:

$$\mathbf{X} = [x^r, y^r, z^r, dt_{\text{GPS}}, b_{\text{GPS, BD}}] \quad (6)$$

式中, $b_{\text{GPS, BD}} = dt_{\text{BD}} - dt_{\text{GPS}}$ 为两个系统的时间差.相应的伪距测量值对应的测量矩阵:

$$\mathbf{G}_3 = \begin{bmatrix} \frac{(x^r - x_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & \frac{(y^r - y_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & \frac{(z^r - z_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x^r - x_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & \frac{(y^r - y_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & \frac{(z^r - z_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & 1 & 0 \\ \frac{(x^r - x_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & \frac{(y^r - y_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & \frac{(z^r - z_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & 1 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x^r - x_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & \frac{(y^r - y_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & \frac{(z^r - z_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

基于这种测量矩阵构建方式,可以在滤波器处理时对状态 $dt_{\text{BD_GPS}}$ 的预测过程做相应的约束,根据其缓变特性,计算过程噪声矩阵的时候对其噪声功率谱密度取合适的数值,可以改善滤波结果。

3 实时系统时间差估计方法

为了估计两个系统时间系统偏差 $b_{\text{GPS_BD}}$,本文构造一个专用的 KALMAN 滤波器. KALMAN 滤波器的两个状态变量也设置为系统偏差和系统偏差变化率,即 $\mathbf{x} = [b_{\text{GPS_BD}}, \dot{b}_{\text{GPS_BD}}]^T$,而 S_t 和 S_f 分别为系统偏差和偏差变化率的噪声. 该模型的状态空间微分方程可以表示为:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{e} \quad (8)$$

$$\mathbf{e} = [S_t, S_f]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

滤波器的更新过程需要功能辅助模块. 在每个测量值更新的历元,综合两个系统的卫星伪距测量值,利用式(5)中提到测量的矩阵组合形式,通过加权最小二乘方法计算 $b_{\text{GPS_BD}}$ 的单历元估计值 $\bar{b}_{\text{GPS_BD}}$,与此同时输出各个伪距的后验残余向量 $resi_{pr}^{[9]}$;求 $resi_{pr}$ 绝对平均并乘以一个比例因子得到标量统计量 $R_{\Delta t}$ 作为 $\bar{b}_{\text{GPS_BD}}$ 的精度度量;然后将 $\bar{b}_{\text{GPS_BD}}$ 和 $R_{\Delta t}$ 作为 KALMAN 滤波器的输入,更新得到 $b_{\text{GPS_BD}}$ 的估计值 $\hat{b}_{\text{GPS_BD}}$. $\hat{b}_{\text{GPS_BD}}$ 的估计过程可以由图 1 简单表示。

以 $\bar{b}_{\text{GPS_BD}}$ 作为测量值,相应的滤波器的测量矩阵 $\mathbf{H}$ 、状态转移矩阵 $\mathbf{A}$ 、过程噪声矩阵 $\mathbf{Q}$ 分别为

$$\mathbf{H} = [1 \quad 0] \quad (12)$$

$$\mathbf{A} = L^{-1} \{ (s\mathbf{I} - \mathbf{F})^{-1} \} \Big|_{t=T_s}$$

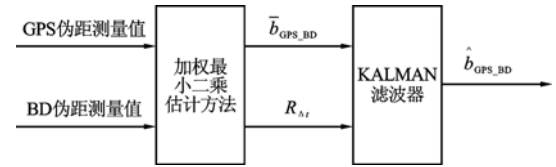


图 1 GPS/BD 双模接收机中系统时差估计示意图

$$= L^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} s & -1 \\ 0 & s \end{bmatrix}^{-1} \right\} \Big|_{t=T_s} \\ = \begin{bmatrix} 1 & T_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{Q} = \int_0^{T_s} \mathbf{A}(t) \begin{bmatrix} S_t & 0 \\ 0 & S_f \end{bmatrix} \mathbf{A}^T(t) dt \\ = \int_0^{T_s} \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_t & 0 \\ 0 & S_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T dt \\ = \begin{bmatrix} S_t T_s + S_f \frac{T_s^3}{3} & S_f \frac{T_s^2}{2} \\ S_f \frac{T_s^2}{2} & S_f T_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, T_s 为采样时间间隔。

接收机每一个历元利用伪距测量值进行滤波器更新前,可以用上一个历元估计的 $\hat{b}_{\text{GPS_BD}}$ 修正当前历元的 BD 系统伪距测量值的修正,即:

$$\rho_{\text{BD}}^i - \hat{b}_{\text{GPS_BD}} c = \sqrt{(x_{\text{BD}}^i - x^r)^2 + (y_{\text{BD}}^i - y^r)^2 + (z_{\text{BD}}^i - z^r)^2} + dt_{\text{GPS}}^r c + \epsilon_{\text{BD}}^i \quad (15)$$

这样多个系统的伪距测量值在实时估计的系统时间差的辅助下得到统一。

4 基于 STB 的数据融合方法

经过式(1)和式(15)的预处理,两个系统的卫星测量值可以同样看待,当然也可以对两个系统的测量值进行不同的加权处理. 这样接收机 KALMAN 滤波器的状态向量和测量矩阵可以分别构造为

$$\mathbf{X} = [x^r, y^r, z^r, dt_{\text{GPS}}] \quad (16)$$

$$\mathbf{G}_3 =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{(x^r - x_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & \frac{(y^r - y_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & \frac{(z^r - z_{\text{GPS}}^1)}{R_{\text{GPS}}^1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x^r - x_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & \frac{(y^r - y_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & \frac{(z^r - z_{\text{GPS}}^m)}{R_{\text{GPS}}^m} & 1 \\ \frac{(x^r - x_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & \frac{(y^r - y_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & \frac{(z^r - z_{\text{BD}}^1)}{R_{\text{BD}}^1} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{(x^r - x_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & \frac{(y^r - y_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & \frac{(z^r - z_{\text{BD}}^n)}{R_{\text{BD}}^n} & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

因为系统时间偏差更新在位置滤波器之前,在每一个历元的伪距测量值进行位置滤波时,滤波器结合了以前所有伪距测量值中的时间差信息,而传统方法只能利用当前历元测量值中的信息.另外多模和单模接收机中的滤波器可以采用相同的结构,这样显著降低兼容多种系统模式应用场合中主滤波器设计的复杂度.

5 测试结果

为了说明本文所提出方法的性能,在实际信号环境中进行了多项测试,测试结果与 2.3 节中的方法进行了对比.算法测试基于兼容 GPS/GLO-NASS/BD 的多模接收机模块,如图 2(a)所示, HZB11DB 为双通道多模可配置 RF 芯片, ATGB02 为多模基带芯片.实际信号测试为静态模式,采用安装于楼顶的多模天线,天线设置如图 2(b)所示.以下测试中传统方法二记为 5 参数法,本文提出方法记为 4 参数法.

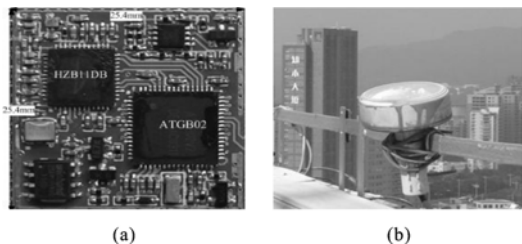


图2 多模导航模块和实际信号测试天线设置

静态测试截取从 2013 年 1 月 4 日 19 时开始持续 10 个小时的数据.

图 3 显示了实际信号估计的系统时差的变化情况.估计得到 GPS 和 BD 系统的系统时间差在 14.000 000 233 s 左右,为了显示了方便,将时差统一减去了整数 14,这里只显示时间差的小数秒部分.图中纵坐标为时间差减去 14 s 的结果,横坐标为采样时间.

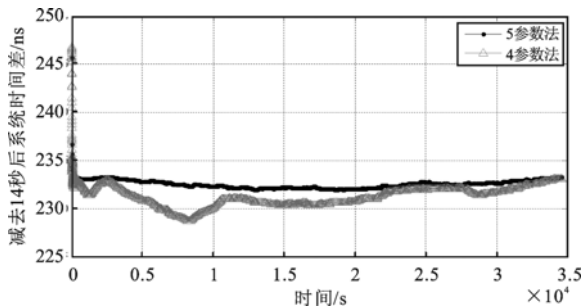


图3 实际信号两种方法系统时间差估计

由图 3 可以看出 5 参数方法估计的系统时间偏差更为平稳,收敛速度更快.不过 4 参数方法与之相

比吻合度很高,在滤波器收敛(100 s)后最大差距不超过 5 ns.

另外文章还对比了上述两种方法使用时, GPS/BD2 接收机的定位误差,如表 1 所示.与上面分析的对应,本文提出的双系统数据融合方法与传统方法得到的位置估计精度相当.

表1 定位误差对比

	5 参数方法	4 参数方法
CEP50%位置误差/m	0.92	0.78
CEP65%位置误差/m	1.18	1.01
CEP99%位置误差/m	2.29	2.04

6 结束语

本文提出了一种基于分布 KALMAN 滤波器的多模接收机中系统时间差实时估计方法,改进了多模接收机中不同系统伪距数据融合方式.与传统的多模卫星数据融合方法相比,新方法中主导航滤波器的测量矩阵得到简化,不同卫星导航系统的伪距测量值可用相同方式处理.不过基于这种方法,在单模、多模和不同多模组合可以采用样的测量矩阵形式,多模接收机程序设计可以相应简化.通过 GPS/BD2 多模接收机在模拟信号和实际信号的多方面对比测试,另外接收机定位精度与传统方法相当.

参考文献:

- [1] Hegarty C J. GNSS signals — an overview[C]// Frequency Control Symposium (FCS), 2012 IEEE International. Bedford, 2012:1-7.
- [2] Blanch J, Walter T. Satellite navigation for aviation in 2025[C]//Proceedings of the IEEE. 100(Special Centennial Issue). Stanford, 2012:1821-1830.
- [3] Fernandez-Prades C, Presti L L. Satellite radiolocalization from GPS to GNSS and beyond: novel technologies and applications for civil mass market[C]// Proceedings of the IEEE. Barcelona, 2011, 99(11): 1882-1904.
- [4] Hegarty C J, Chatre E. Evolution of the global navigation satellite system (GNSS)[C]//Proceedings of the IEEE. Bedford, 2008, 96(12): 1902-1917.
- [5] Mo Jun, Liu Liang, Liao Bing-yu, et al. Application of KALMAN filter in UM220 as a dual system satellite positioning and navigation unit[C]//The 3rd CHINA Satellite Navigation Conference-S07 BD/GNSS User terminal Technology. Guangzhou, 2012.

(下转第 82 页)

- (KDD). USA: San Diego, 1999: 287-291.
- [4] 李也白, 唐辉, 张淳, 等. 基于改进的 FP-tree 的频繁模式挖掘算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 101-103.
- [5] 陈治平, 谭义红, 李学勇, 等. 基于 FP-tree 的快速构建算法[J]. 计算机应用, 2011, 31(2): 438-440.
- [6] 马丽生, 邓辉文, 齐逸. 基于 FP-tree 的最大频繁项目集挖掘算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(2): 385-388.
- [7] 姜哈, 范建淑, 贾洞. 基于 FP-Tree 快速挖掘频繁项集[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(10): 128-130.
- [8] Leung Carson Kai-Sang, Khan Quamrul I, Li Zhan, et al. CanTree: a canonical-order tree for incremental pattern mining [J]. Knowledge Information System, 2007, 11(3): 287-311.
- [9] 冯洁, 陶宏才. 快速挖掘最大频繁项集[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(5): 123-126.

- [10] Frequent itemset mining implementations repository [EB/OL]. [2010-01-25]. <http://fimi.cs.helsinki.fi>

作者简介:



陈刚 男, (1977-), 硕士, 讲师. 研究方向为数据挖掘、人工智能.

闫英战 男, (1972-), 硕士, 副教授. 研究方向为智能网络、数据挖掘.

刘秉权 男, (1970-), 博士, 副教授. 研究方向为自然语言处理、人工智能.

(上接第 75 页)

- [6] 吴玲, 孙永荣, 俞晓磊, 等. GPS/GLONASS/GALILEO 多星座组合导航系统研究[J]. 中国空间科学技术, 2009(3): 23-28.
- [7] 蔡昌盛, 戴吾蛟, 匡翠林. GPS/GLONASS 组合系统的 PDOP 计算和分析[J]. 测绘通报, 2011(11): 5-7.
- [8] 陈俊平, 吴斌, 胡小工, 等. GPS/GLONASS 时差监测及其在多模定位中的应用[C]//第三届中国卫星导航学术年会-S02 卫星导航信号体制及兼容与互操作. 广州, 2012.
- [9] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.

作者简介:

翟昆朋 男, (1986-), 博士. 研究方向为 GNSS 接收机导航算法和信号处理算法.

徐建华 男, (1963-), 研究员, 博士生导师. 研究方向为嵌入式软件、无线通讯系统、定位系统及算法研究.

叶甜春 男, (1965-), 研究员, 博士生导师. 研究方向为集成电路设计与应用、纳米加工与制造技术、新型器件.