

卫星定位软件接收机研究综述

张鹏娜¹, 曾庆喜¹, 祝雪芬², 裴 凌³

(1. 南京航空航天大学车辆电子研究中心, 江苏南京 210016; 2. 东南大学仪器科学与工程学院, 江苏南京 210096; 3. 上海交通大学北斗导航与位置服务上海市重点实验室, 上海 200240)

摘 要:软件接收机凭借其良好的通用性、灵活性及较好的定位性能已成为卫星定位接收机领域的一个研究热点。系统阐述了软件接收机的结构特点及国内外研究现状, 对比分析了基于 PC, DSP (digital signal processor), FPGA (field programmable gate array) 以及 FPGA+DSP 平台的软件接收机的结构和性能, 指出基于 FPGA+DSP, DSP 的实现方式更利于发挥软件接收机的优点, 可使软件接收机真正走向实用化, 最后给出了软件接收机技术未来的发展方向和其在无人驾驶技术中的应用前景, 为软件接收机的研究和应用提供理论参考。

关键词:无线通信技术; 卫星定位; 软件接收机; DSP/FPGA; 研究现状

中图分类号:TH161 **文献标志码:**A

Research progress of satellite positioning software receiver

ZHANG Pengna¹, ZENG Qingxi¹, ZHU Xuefen², PEI Ling³

(1. Research Center of Vehicle Electronic, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China; 2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 3. Shanghai Key Laboratory of Navigation and Location Based Service, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Software receiver has become a research hotspot in the satellite positioning receiver field because of its good universality, flexibility, and positioning performance. The structural features of software receiver and the current research status at home and abroad are formulated, and the structures and performance of PC-based, DSP (digital signal processor)-based, FPGA (field programmable gate array)-based and FPGA+DSP-based software receivers are compared and analyzed. It is pointed out that the FPGA+DSP- and DSP-based implementation can better demonstrate the advantages of software receiver, and realize its real application. Finally, the development directions of software receiver in the future and its application prospect in unmanned driving technology are put forward. The paper can provide theoretical references for software receiver's research and application.

Keywords: wireless communication technology; satellite positioning; software receiver; DSP/FPGA; research progress

收稿日期:2015-12-25; 修回日期:2016-03-02; 责任编辑:冯 民

基金项目:国家自然科学基金(51505221)

作者简介:张鹏娜(1992—), 女, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事智能车辆导航方法方面的研究。

通讯作者:曾庆喜博士。E-mail:jslyzqx@163.com

张鹏娜, 曾庆喜, 祝雪芬, 等. 卫星定位软件接收机研究综述[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(3): 220-229.

ZHANG Pengna, ZENG Qingxi, ZHU Xuefen, et al. Research progress of satellite positioning software receiver[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(3): 220-229.

GNSS 系统主要由 GPS(global position system)、Glonass, Galileo 和北斗卫星导航系统以及相关增强系统组成,具有全天候、高精度、实时连续等特点,现已广泛应用于交通运输、航空航海、紧急救援等领域。卫星定位接收机可接收视界内的卫星播发的卫星信号并通过解调解算为用户提供位置及导航信息。由于新的卫星导航信号陆续出现,并且接收机信号处理算法也在不断地改进,现有的卫星定位接收机需要不断地更新换代,更改硬件结构以适应和更好地接收各种类型的卫星信号,这给接收机的设计者和用户都带来了很大的不便。因此,一种在不改变硬件的条件下,通过更换内部的软件就可以实现性能升级的新型接收机即软件接收机,成为接收机设计方面的研究热点。软件接收机基于通用嵌入式平台,可深入到接收机信号通道内部控制卫星信号的处理过程^[1],具有良好的开放性,现已成为未来定位接收机的一个发展方向,国内外对软件接收机研究的热度也一直有增无减。

1 软件接收机结构及特点

卫星定位软件接收机将“软件无线电”的概念引入到了卫星定位接收机中,在接收机中使 ADC(analog to digital converter)在尽量接近天线的地方把信号数字化,然后使用软件来处理数字信号实现定位^[2]。软件接收机与硬件接收机结构的区别见图 1。

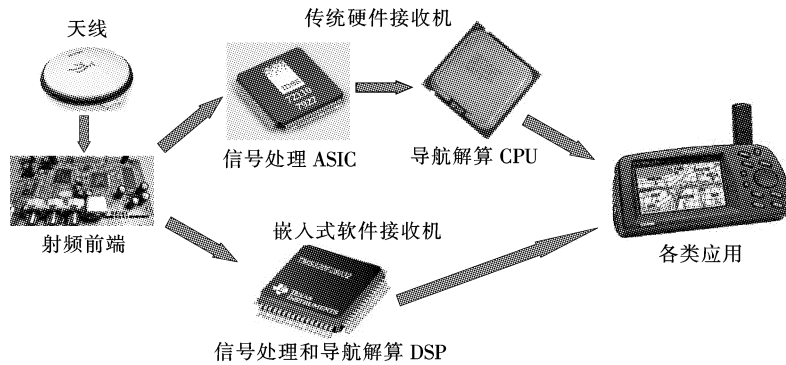


图 1 硬件接收机和软件接收机结构的区别

Fig. 1 Structure difference of hardware receiver and software receiver

卫星定位软件接收机主要是由天线、射频前端以及基带信号处理 3 部分组成,其结构如图 2 所示。

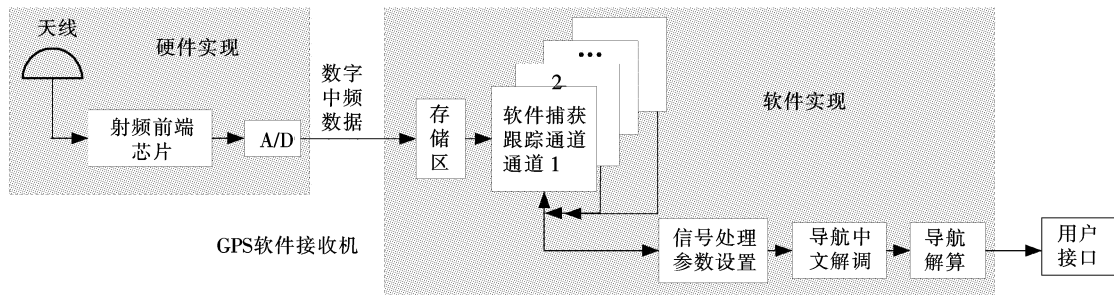


图 2 卫星定位软件接收机结构

Fig. 2 Structure of GNSS software receiver

利用天线接收卫星发射的射频信号,即将卫星发射的 L 波段的电磁波转换成便于后续处理的电信号。射频前端通过对天线接收到的微弱射频信号进行放大、下变频,输出频率较低的中频模拟信号,然后经过 A/D 转换模块获得数字化的中频信号,并将该信号传给后续的基带数字信号处理部分。基带数字信号处理是接收机的核心,通过依次完成对中频信号的捕获、跟踪、解调解算获得卫星的导航电文,然后利用导航电文计算出用户位置信息。基于 PC 通用 CPU 的软件接收机,由电脑的主处理器完成信号的解调解扩及定位解算;基于嵌入式平台的软件接收机,由主芯片(如 DSP, FPGA)完成对基带信号的处理。

软件接收机具有如下特点^[3-5]。

1) 更好的通用性 软件接收机除射频前端部分是用硬件来实现之外,其他所有的功能都是由软件来实现的。由于使用了很少的硬件,使得其相对于传统的接收机具有更高的通用性,可以兼容多星座、多频段和多体制的信号。同时由于减少了所使用的硬件,这种接收机在制造成本、性能、尺寸、质量和功耗等方面具有很大的优势。

2) 更好的定位性能 目前传统接收机的信号处理功能都是通过使用特定的硬件 ASIC(application specific integrated circuit)来实现的,由于硬件资源的限制,无法实现过于复杂的算法,而软件接收机利用软件来实现基带部分的算法,即可以通过开发更复杂的优化算法来提高其在多信号融合、高灵敏度、高精度、抗干扰和多路径抑制等方面的性能,这使得软件接收机在定位性能方面比传统的接收机具有更大的优势。

3) 更容易实现性能升级 由于传统的硬件接收机采用 ASIC 芯片进行信号处理,如果要对这种接收机进行性能升级,只能重新设计 ASIC 芯片,在设计成本和设计周期方面的代价都很高。而软件接收机适合各种采样频率的数据,不需要做任何硬件的改动,通过加载不同的软件即可实现不同的功能,只需要更换接收机中的软件便可以实现接收机的性能升级。

2 软件接收机发展现状

软件接收机可以利用各种算法来提高接收机的定位性能,但是由于需要对大量的数据进行实时运算,需要 CPU 具有很强的处理能力和很大的数据存储空间。这使得目前的 GPS 软件接收机多是利用 PC 机的通用 CPU^[6-8]甚至 GPU(graphic processing unit)进行处理,可以在不考虑硬件资源的情况下研究软件接收机高性能算法,可为软件接收机嵌入式实现提供理论研究基础。嵌入式系统与 PC 机相比,数据存储容量和处理速度都非常有限,其对算法复杂性和计算量要求较高。但其具有较好的灵活性,成本较低,便于安装,有利于卫星定位软件接收机真正走向实用化。本文按照空间上从国外到国内、时间上由远及近的顺序分析基于 PC 和基于嵌入式平台的软件接收机的研究现状。

2.1 基于 PC 的卫星定位接收机研究现状

国外对于软件接收机的研究起步较早,1995 年 Clifford Kelley 博士设计了第 1 款真正意义上的 GPS 软件接收机,并且在 2001 年将该软件接收机作为开源项目对外公开;2000 年美国 TSUIJ^[2]出版了第 1 本基于软件无线电思想的 GPS 软件接收机著作。在这本书中,TSUIJ 系统介绍了 GPS 系统的星座组成及卫星信号结构,详细阐述了软件接收机的硬件设计和基带信号处理算法,可为初学者提供入门参考资料;美国 Stanford 大学和瑞典 Luleake 科技大学于 2000 年合作设计并实现了基于高级语言的 GPS L1 四通道实时软件接收机 gpSrx,该软件接收机从计算量较大的相关器到信号的跟踪及解算均由运行在 X-86 芯片上的软件完成^[9];2001 年该实验室又对基于 X-86 的 GPS 软件接收机算法进行了改进,使用了基于 FFT 的循环卷积方法达到了次秒级的捕获速度,同时改进导航解算算法,使定位误差减小到了 30 m 以内^[10]。由此可见,软件接收机可通过修改内部程序改进基带信号处理算法,无需对硬件结构进行更改即可实现性能和速度的升级,具有较强的灵活性;2003 年美国 Cornell 大学 LEDVINA 等^[11]设计开发了一款单频实时 GPS 软件接收机并对其性能进行了测试。该软件接收机基于主频为 1.73 GHz 的通用 PC CPU,实现了 12 通道实时处理,其结构框图如图 3 所示。

与硬件接收机不同,该软件接收机使用了纯软件相关器,并引入了新的算法使处理器按照整个“字”操作对每个数据“位”进行计算,实现了数据的并行处理,加快了信号处理速度;2004 年,该项目组又设计开发了一款 GPS L1/L2 C 双频民用 10 通道实时软件接收机,这个双频的接收机运行在 Linux 实时操作系统上,处理器是主频为 3.2 GHz 的 INTEL Pentium 4,接收机全速运行时大约占用 CPU 80% 的处理能力,能同时对 10 个通道进行实时跟踪^[7];2009 年丹麦 Aalborg 大学的丹麦 GPS 中心研制出了基于 E5000 软件的 GPS 接收机,由于使用软件代替了传统的 GPS 基带硬件集成电路,故该 GPS 软件接收机只需在 PC 或 DSP 上运行软件就可以实现定位^[12];2013 年 JAVIER 等^[13]也基于 PC 对 GPS+Galileo 双星座软件接收机进行了研究;JUANG 等^[14]在 PC 上使用 C/C++ 语言实现了北斗软件接收机,可接收北斗卫星信号并进行实时处理,最终定位误差在 30 m 左右,距离真正实用还存在一定差距;芬兰的 ZAHIDUL 等^[15]在 PC 上实现了北斗软件接

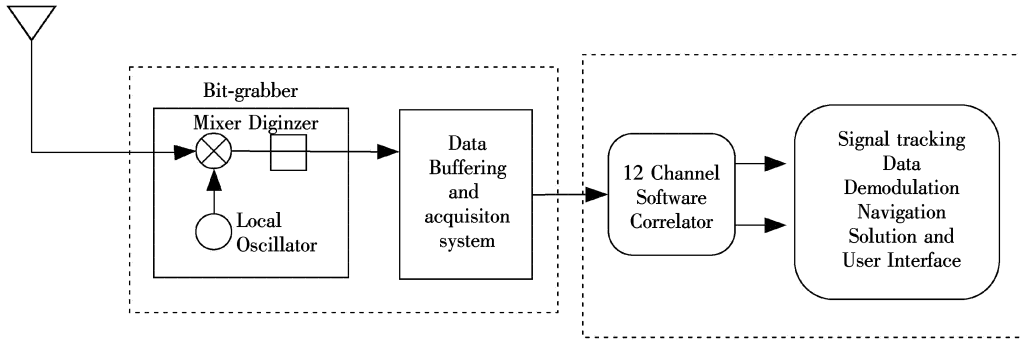


图 3 软件接收机结构框图

Fig. 3 Structure diagram of software receiver

收机,其通过天线采集到 2 组北斗 B1 信号并存储到 PC 中,然后由运行在 PC 上的软件接收机对信号进行处理得到最终定位结果,其水平和垂直定位误差分别为 4.66,4.88 m 和 5.94,9.74 m;Loctronix 公司的 MATHEWS 等^[16]研究了一款高性能的 GNSS 软件接收机,该接收机可在多平台上运行,能接收处理多种 GNSS 信号进行定位解算,方便与其他传感器信息进行融合定位。以上这些研究都在不考虑嵌入式实现的前提下,基于 PC 机研制了各种高性能的卫星定位软件接收机。为了避免研究人员各自为战及加速 GNSS 软件接收机的发展及应用,美国俄亥俄大学的 GUNAWARDENA^[17]于 2013 年 9 月撰文发布了一个用于大数据量快速处理的 Matlab 工具包,旨在为研究 GNSS 软件接收机的用户提供一个开放式的软件平台。该工具包使用高效率的低级计算机语言编写,其结构如图 4 所示。

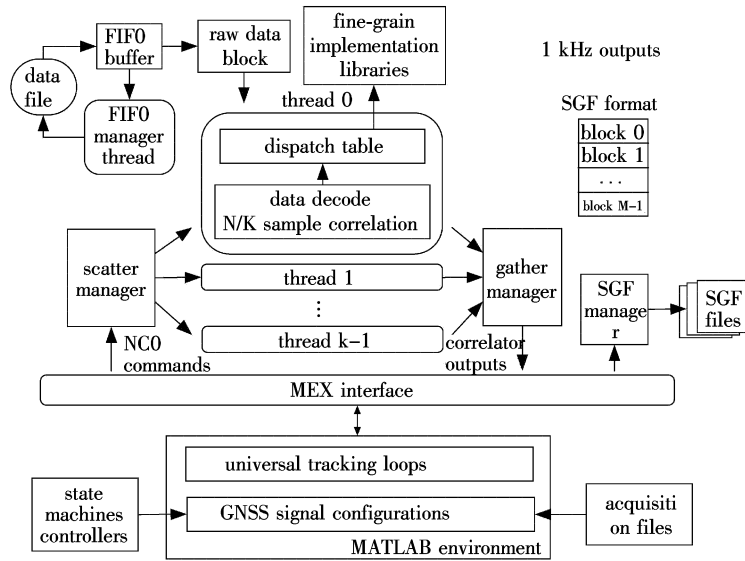


图 4 开源的 Matlab 工具包结构图

Fig. 4 Chart of open-source Matlab toolbox

该工具包支持各种 RF 前端或二进制数据文件,能够模拟产生多种 GNSS 信号。同时,其优化了相关器功能,最大程度地利用了主处理器的计算能力,能明显减少程序运行的时间。工具包可被 Matlab 调用,具有良好的人机交互界面,方便针对不同研究进行不同配置,为世界各地的研究者们提供了一个完善的 GNSS 接收机基带信号处理研究仿真平台。该工具包深入到平台底层,通过并行处理任务加快了信号处理速度,因此通过软件合理利用硬件资源,调度各个任务处理进程,能很大程度地加快软件接收机运行速度;2013 年 NAVSYS 公司的 BROWN 等^[18]将 GNSS 信号产生软件与开源的软件接收机相融合,通过运行 GRC(GNU radio companion,一个用来产生信号流程图及流程图源代码的图形化工具)软件和可兼容的软件接收机,用户能够产生可用来记录和回放的直观的 GNSS 信号流。开源的 GRC 工具允许用户根据需要抓取和回放信

号;2014年日本的SUZUKI等^[19]开发了一种新型的开源的GNSS软件接收机——GNSS-SDRLIB,其运行在PC上,由C语言编写而成,能够对GNSS信号进行捕获、跟踪、导航信息解算、频谱分析等工作,可处理各种RF前端接收到的导航信号,并输出伪距、载波相位、多普勒频移等信息。最终实验结果表明,其定位误差可保持在2m内;2015年PARK等^[20]基于多GPU(general purpose GPU)平台开发了一款具有抗干扰性能的软件接收机,并通过建立跟踪性能评估模型合理分配每个GPU的跟踪处理任务,减少了近60%的跟踪处理时间。通过算法实现计算机资源的最优利用,能大大加速软件接收机的处理速度,因此在软件接收机中算法的优劣将直接决定接收机的性能;ARRIBAS等^[21]设计完成了一个GNSS软件接收机实验平台,该平台由通用的硬件平台和开源的软件构成,能够接收多种GNSS信号,便于开发人员进行算法研究。经过十多年的发展,基于PC的卫星定位软件接收机已经从单频GPS软件接收机发展为当下的多星座多信号的GNSS软件接收机,可为开发者提供良好的算法研究环境,便于高性能算法的仿真模拟。

中国对软件接收机的研究相对国外的研究来说开始较晚。1998年北京航空航天大学张其善教授领导的课题组率先研制出了一台在PC平台上运行的单频GPS软件接收机样机^[22];2004年在美国留学的GPS高级工程师鲁郁^[23]博士采用高级语言编写了一套完整的GPS软件接收机程序,并将其作为开源项目对外公布;2009年北京航空航天大学通信导航与测试实验室的JIN等^[24]开发了基于软件相关器的GPS软件接收机,该软件接收机能够在奔腾41.7GHz的CPU上实现超过12通道的实时运算;清华大学研制了一种基于高性能CPU和GPU处理器的多频率实时软件接收机,可以在5MHz的采样率下同时对150个通道进行实时跟踪,使用的CPU是Intel的Xeon 5150,主频为2.66GHz,使用的GPU是Geforce的GTX285,速度为648MHz^[25];2010年复旦大学的赵晋^[26]研究了基于“硬件模拟前端+FPGA+PC”架构的北斗二代卫星导航接收机,由于当时北斗B2信号标准尚未公布,文章只是利用假设信号对接收机捕获、跟踪算法做出了相应改进,通过GPS信号验证了平台的定位性能,最后实验结果表明该软件接收机可满足实时定位要求;2012年电子科技大学的罗正平^[27]基于模块化的思想用C语言实现了通用的卫星信号处理模型。该模型可以根据用户的配置完成BD2系统中各种卫星信号的处理流程。测试结果表明,该模型可以实现用户位置的计算,在特定的仿真条件下可以获得较好的定位精度;2014年ZHANG等^[28]在PC上设计实现了一个开源的L1/L2C双频软件接收机,与已有的大部分接收机不同,该软件接收机可接收GPS卫星双频信号。使用外部时钟作为RF前端的时钟输入提高了接收机的频率稳定性,且软件设计程序完全开源,可为研究者提供技术参考;2015年XU等^[29]设计了一款基于NVIDIA GeForce GTX 750 Ti GPU的软件接收机,其将一种基于GPU的捕获和跟踪结构应用到软件接收机中,加速了信号的跟踪处理过程。应注意的是,这些基于PC的研究虽均能实现软件接收机功能,但均在不考虑硬件资源的情况下实现了复杂算法和大点数信号处理。当在资源有限的嵌入式上实现时,较低的时钟频率、有限的内存空间和外部存储将制约软件接收机的处理速度和算法性能。因此,如何降低算法的空间复杂度和通过算法合理利用硬件资源成为软件接收机真正走向实用化的关键问题。

2.2 基于嵌入式硬件结构的软件接收机研究现状

为了验证GPS软件接收机也可在低功耗、资源有限的数字信号处理器上实现,2001年AKOS等^[10]选用Texas Instruments公司的TMS320C6201 DSP芯片为核心处理器,将软件接收机代码移植到该平台上进行定位解算。与X-86芯片相比,6201芯片时钟频率较低,数据存储空间有限,仅有2片32KB的数据存储空间和一个64KB的程序存储空间。32KB的存储空间容量较小,将限制GPS信号的处理速度。64KB的程序内存无法全部存储捕获跟踪和定位解算程序,因此与基于X-86的软件接收机不同,其需要对4个通道数据分阶段进行处理,如在捕获阶段结束时将跟踪程序由片外存储器加载到程序存储空间中对信号进行解调解扩。由此可见,通用数字信号处理器资源有限,当软件接收机在该平台上实现时需考虑内存空间的合理分配;2006年美国Cornell大学HUMPHREYS等^[30]设计了一款基于DSP平台的软件接收机,相比于AKOS等设计的基于DSP的软件接收机,其跟踪精度及通道数都有所提高,可同时跟踪43通道数据,定位误差在5m以内。其选用的芯片为Texas Instruments公司的TMS320C6416 DSP芯片,软件接收机整体示意图如图5所示。

RF前端接收到卫星信号后将其混频到4.309MHz,并以5.714MHz对其进行采样,采样得到的数据

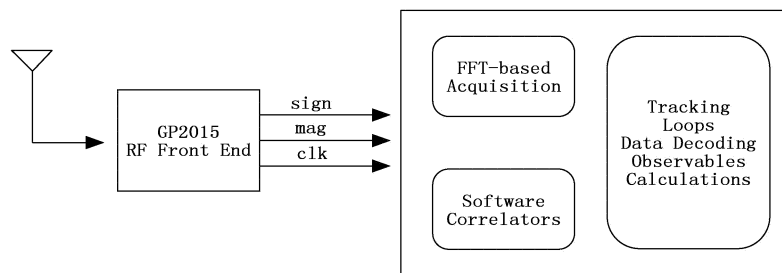


图 5 基于 DSP 的软件接收机结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of DSP-based software receiver

分为符号数据和数值数据,分别送往 DSP 进行处理,由软件完成信号的捕获、跟踪和解算工作。实物原型如图 6 所示,其中标出了 DSP 芯片。实验结果表明,对于信噪比强度为 42 dB-Hz 的 L1 信号(L1 信号由运行在 PC 上的软件模拟产生),该软件接收机能在 2.3 s 内完成 32 颗卫星伪随机码相位捕获的工作,可同时跟踪 43 个通道的数据。在模拟的高动态情况下,当径向加速度达到 12.3g 时,仍能稳定跟踪到卫星信号。在静态环境下,其定位误差保持在 5 m 以内,定位结果如图 7 所示。其中圆环中心为测试点实际位置。

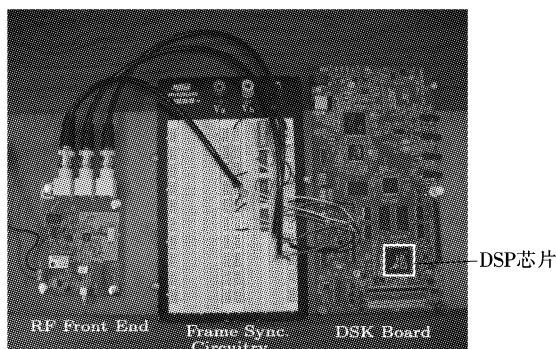


图 6 基于 DSP 的软件接收机结构图

Fig. 6 Structure of DSP-based software receiver

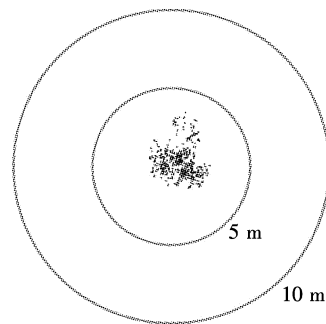


图 7 基于 DSP 的软件接收机定位精度

Fig. 7 Positioning accuracy of DSP-based software receiver

随着数字信号处理芯片的更新换代以及软件接收机基带信号处理算法的不断改进,基于 DSP 的软件接收机的性能将会越来越好,可真正走向实用化。2004 年澳大利亚新南威尔士大学的卫星导航与定位研究小组研制了一款基于 GP2015 射频前端和 FPGA 的信号处理平台,并在该平台上实现了 GPS L1/L2 双频软件接收机^[31];2005 年德国的 LUCK 等^[32]对比分析了基于 PC 和基于 FPGA 的接收机的定位性能。其采用 Sprient 4760 信号发生器模拟产生 GPS L1 信号,并分别使用基于 FPGA 的卫星定位接收机和基于 PC 的纯软件接收机对该信号进行捕获、跟踪及定位。两软件接收机卫星搜索及定位成功率如图 8 所示。纯软件接收机启动 8 s 内便可搜索到 8 颗可视卫星,定位成功率超过门限值;基于 FPGA 的卫星接收机启动 19 s 后可搜索到 8 颗可视卫星,定位成功率在最后 3 s 内极剧上升。其定位结果精度对比如图 9 所示。当接收机进入稳定定位状态时,高度方向偏差保持在 1 mm 内,可稳定定位。

经过对比分析发现,纯软件接收机在捕获速度上略优于基于 FPGA 的接收机,基于 FFT 的快速捕获算法比传统捕获算法性能更优,两者的定位性能几乎相同。同年意大利都灵理工大学 DOVIS 等^[33]在 DSP+FPGA 平台上实现了 Galileo/GPS 软件接收机,其软件接收机平台结构示意图如图 10 所示。

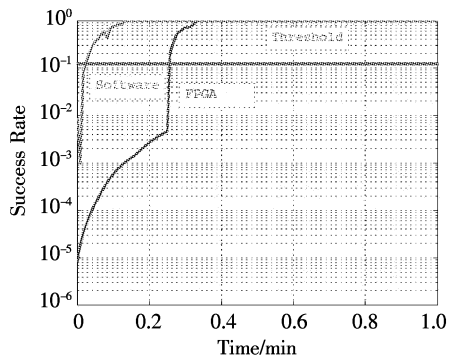


图8 接收机卫星搜索速度及无偏差定位成功率

Fig. 8 Receiver search satellites speed and no deviation location success rate

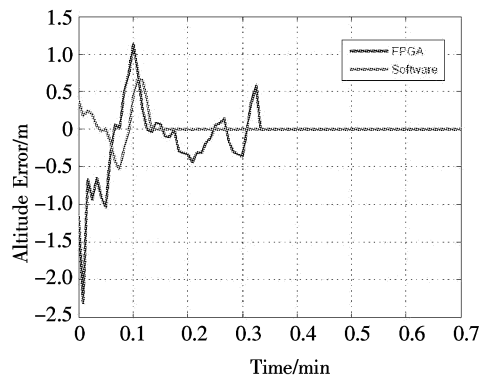


图9 垂直高度定位误差图

Fig. 9 Vertical positioning error

通过对比实验表明,基于FPGA+DSP的软件接收机的信号跟踪情况与软件模拟情况基本拟合,验证了该软件接收机的可用性。2011年意大利博洛尼亚DIEM大学的AVANZI等^[34]也设计了一种基于FPGA的多星座双频接收机;同年阿根廷LaPlata国立大学的LOPEZ等^[35]也成功研制出了一款基于FPGA的高精度GPS L1/L2民用信号软件接收机;Stanford大学RAMAKRISHNAN等^[36]在通用的FPGA平台上完成了特殊设计的快速捕获模块和弱信号捕获模块。通过使用的DSP片数和RAM区域来分析资源的使用率,分析了进一步增强软件接收机信号处理能力的可行性;2015年FORTIN等^[37]提出了一种通用的基于2048点FFT的捕获结构,其可利用较少的FPGA资源在5ms

内捕获到L1信号。以上这些研究大多基于FPGA实现了卫星定位软件接收机,由FPGA的硬件逻辑电路完成计算量较大的相关运算,虽速度较快却无法发挥软件接收机的优势,不利于加入用于提高接收机性能的灵活的复杂算法。基于DSP的软件接收机从信号捕获到定位解算均由运行在处理器上的软件完成,通过修改程序即可实现性能升级,具有较高的灵活性。但类似于AKOS等基于DSP进行的研究,其有限的资源需要进行合理的分配并且可能会制约软件接收机运行的速度。因此,在不损失软件接收机性能的前提下,如何有效地减少算法的执行时间和降低算法的空间复杂度成为关键问题。

2005年中国科学院在FPGA和DSP平台上实现了基于硬件数字相关器的GPS信号多通道实时处理接收机^[38];2010年上海宇志通信公司开发了基于DSP/FPGA平台的GNSS卫星导航接收机,集扩频通信与解扩、导航、信号处理及相关软件算法为一体,且所有代码全面开源,可以同时接收GPS和Glonass信号,定位精度在10m以内^[39];中国上海交通大学的TAO等^[40]改进了LEDVINA等提出的相关器算法,并在奔腾-M 1.1G嵌入式测试平台上实现了该相关器算法,能够在0.358ms内跟踪到12个通道的数据,比LEDVINA等提出的软件相关器算法快了近1.5倍;2014年上海宇志通信公司在原GNSS软件接收机基础上开发了GPS L1+BD2B1双频卫星定位接收机,其能够跟踪12通道卫星数据,GPS定位误差在10m以内,BD定位误差在15m内^[41];2015年南京航空航天大学薛涛等^[42]基于DSP+FPGA设计实现了北斗软件接收机,并分别在静态、低动态和高动态环境下对接收机性能进行了验证,实验结果表明该软件接收机能满足实时性、高精度等性能指标。

根据近年来卫星定位软件接收机的发展现状可知,国外对于软件接收机的研究工作已基本成熟,正朝着研制和开发应用于不同领域的多类型多星座多频率的卫星定位软件接收机方向迈进。中国对软件接收机的研制和开发仍然主要集中在GPS L1单频软件接收机上,关于北斗软件接收机的研究也多侧重于算法模拟

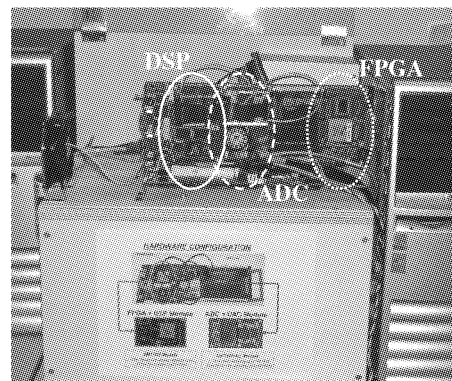


图10 Galileo/GPS软件接收机实现平台示意图

Fig. 10 Implementation platform of Galileo/GPS software receiver

仿真和硬件芯片设计,嵌入式实现方面的研究较少,因此和国外还存在一定的差距。在软件接收机实现方式方面,基于PC通用CPU,FPGA+DSP,FPGA,DSP的软件接收机均能很好地完成接收机定位导航工作。基于通用CPU的软件接收机虽可利用其高速数据处理能力和巨大的数据存储空间实现复杂优化算法,提高接收机性能,但多处于实验室研究阶段,还不能使软件接收机真正走向实用化;基于FPGA的软件接收机主要依赖于FPGA内部的硬件逻辑来实现相关功能模块,虽处理速度较快但不利于加入用于提高接收机性能的复杂算法;而基于FPGA+DSP,DSP的软件接收机,既能发挥软件接收机的灵活性,又能实现较复杂的算法,有利于接收机性能的提高,是软件接收机较理想的实现方式。

3 研究展望及应用前景

3.1 研究展望

目前国内外很多研究团队基于PC平台研究GPS软件接收机,很多算法研究也多基于PC上Matlab仿真软件实现,由于Matlab良好的开发环境和PC强大的数据处理能力,软件接收机高性能算法的研究有了很大的发展。但基于Matlab软件仿真实现的算法执行效率较低,可移植性较差,不利于软件接收机的实用化。因此,未来要研究适合在资源有限的嵌入式平台上实现的高性能接收机算法,将提出的高性能算法用较为通用的C/C++语言在通用软件接收机硬件平台DSP,DSP+FPGA上实现,真正实现高性能实时软件接收机。

随着GNSS系统的不断发展和完善,新的卫星导航信号陆续出现,因此研究开发能够处理这些新型信号并可应对未来信号格式变化的接收机尤其重要。例如在GNSS的L1频带,未来的导航信号包括GPS的L1,Galileo的E1,GlONASS的L1OF和L1OC以及北斗的B1信号^[43]。这些信号的组合能大大提高导航系统的可靠性、连续性和精度。GNSS系统在可用性、完好性、定位精度方面也要优于单一系统。因此,兼容多星座、多频率的软件接收机将会是未来接收机的一个发展方向。

3.2 应用前景

2015年,在GPS国际协会已统计出GPS的117种不同类型的应用中,汽车应用和蜂窝通信的集成仍是当前最大的两个市场,而在无人驾驶技术方面的应用也已得到了广泛的关注。卫星导航定位技术作为无人驾驶汽车技术的关键技术之一,对汽车的路径规划和安全行驶起着重要作用。现有的卫星接收机多为硬件接收机,虽定位性能良好,但数据更新率较低,结构固定,不利于无人驾驶汽车传感器的集成。当前的无人驾驶定位技术一般采用多种定位方式融合的方法,以卫星定位作为主要定位来源,辅以自主定位方式如惯性导航系统(inertial navigation system,INS)与航位推算定位技术(dead reckoning,DR)实现组合定位^[44]。硬件接收机可拓展性较差,不利于各导航信息的深度耦合。软件接收机作为各大研究机构及高校研究新型卫星接收机技术的实用平台,可深入到接收机(特别是信号通道)内部触及底层核心技术^[45],有利于卫星导航信号与各传感器信号进行深度融合来提高接收机各过程的性能和速度。因此,可拓展性好、定位精度高的软件接收机技术在无人驾驶车辆中将有广泛的应用。

参考文献/References:

- [1] 董绪荣,唐斌,蒋德. 卫星导航软件接收机原理与设计[M]. 北京:国防出版社,2008.
- [2] TSUIJ B Y. Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach[M]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000.
- [3] KRUMVIEDA K, MADHANI P, CLOMAN C. A complete IF software GPS receiver: A tutorial about the details[C]// Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Salt Lake City: [s. n.], 2011:809-811.
- [4] MA C, LACHAPELLE G, CANNON M E. Implementation of a software GPS receiver[C]// ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach:[s. n.], 2004: 956-970.
- [5] NordNav. NordNav-R30 Package: The Complete GNSS Software Receiver Package[EB/OL]. <http://www.navtechgps.com>, 2009.
- [6] PANY T, FRSTER F, EISSFELLER B. Real-time processing and multipath mitigation of high bandwidth L1/L2 GPS signals with a PC-based software receiver[C]//ION GNSS 17th International Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach: [s. n.], 2004: 971-985.
- [7] LEDVINA B M, PSIANKI M L, SHEINFELD D J A. Real time GPS civilian L1/L2 software receiver[C]// ION GNSS 17th International

- Technical Meeting of the Satellite Division. Long Beach:[s. n.], 2004: 986-1005.
- [8] CHARKHANDEH S, PETOVELLO M G, LACHAPPELLE G. Performance testing of a real-time software-based GPS receiver for x86 processors[C]//ION 19th ITM of the satellite Division. Fort Worth:[s. n.], 2006: 2313-2320.
- [9] AKOS D M, NORMARK P L, ENGE P, et al. Real-time GPS software radio receiver[C]//The Institute of Navigation National Technical Meeting. Long Beach:[s. n.], 2001: 809-816.
- [10] AKOS D M, NORMARK P L, HANSSON A, et al. Global positioning system software receiver (gpSrx) implementation in low cost power programmable processor[C]// ION GPS 2001. Salt Lake City:[s. n.], 2001: 2851-2858.
- [11] LEDVINA B M, CERRUTI A P, PSIAKI M L, et al. Performance tests of a 12-channel real-time GPS L1 software receiver[C]// ION NTM 2003. Anaheim:[s. n.], 2003: 679-688.
- [12] 赵丽. 基于FPGA平台的GPS信号捕获算法研究与实现[D]. 南京:南京邮电大学, 2012.
ZHAO Li. Research and Implementation of Acquisition Algorithm for GPS Signal based on FPGA Platform[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [13] JAVIER A, CARLES F P. Fastening GPS and Galileo tight with a software receiver[C]//26th International Meeting of the Satellite Division of ION. Nashville:[s. n.], 2013: 1383-1385.
- [14] JUANG J C, TSAI C T, CHEN Y H. Development of a PC-based software receiver for the reception of Beidou navigation satellite signals [J]. The Journal of Navigation, 2013, 66: 701-718.
- [15] BHUIYAN M Z H, SÖDERHOLM S, THOMBRE S, et al. Implementation of a software-defined Beidou receiver[J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2013, 303: 751-762.
- [16] MATHEWS M B, MACDORAN P F. A software defined radio solution for hybrid GPS/signals of opportunity navigation[C]//Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville:[s. n.], 2013: 1527-1538.
- [17] GUNAWARDENA S. A universal GNSS software receiver MATLAB toolbox for education and research[C]//26th International Meeting of the Satellite Division of ION. Nashville:[s. n.], 2013: 1560-1576.
- [18] BROWN A, REDD J, DIX M. Open source software defined radio platform for GNSS recording and simulation[C]//Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville:[s. n.], 2013: 1508-1516.
- [19] SUZUKI T, KUBO N. GNSS-SDRLIB: An open-source and real-time GNSS software defined radio library[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa:[s. n.], 2014: 1364-1375.
- [20] PARK K P, YANG J S, PARK C, et al. Multi-GPGPU based GNSS real-time software receiver for anti-jamming application[C]// Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation. Florida:[s. n.], 2015: 3165-3170.
- [21] ARRIBAS J, PRADES C F, CLOSAS P. Gestalt: A testbed for experimentation and validation of GNSS software receivers[C]// Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Florida:[s. n.], 2015: 3222-3234.
- [22] 孙礼. GPS接收机系统的研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 1998.
SUN Li. Research of GPS Receiver System[D]. Beijing: Beihang University, 1998.
- [23] 鲁郁. GPS全球定位接收机——原理与软件实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [24] JIN Tian, LIU Yang. A novel GNSS weak signal acquisition using wavelet denoising method[C]// ION NIM 2008. San Diego:[s. n.], 2008: 303-309.
- [25] WU Cailun, QIAN Yi, CUI Xiaowei, et al. The optimized method and algorithms in the CPU&GPU-based GNSS software receiver[C]// 22nd International Meeting of the Satellite Division of ION. Savannah:[s. n.], 2009: 339-343.
- [26] 赵晋. 北斗二代卫星导航接收机关键共性技术研究[D]. 上海:复旦大学, 2010.
ZHAO Jin. The Key Technology Research of Beidou Second Generation Satellite Navigation Receiver[D]. Shanghai: Fudan University, 2010.
- [27] 罗正平. 北斗二号民用软件接收机的算法研究与仿真[D]. 成都:电子科技大学, 2012.
LUO Zhengping. Research and Simulation of Beidou2 Civil Software Receiver Algorithms[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- [28] ZHANG Xin, ZHAN Xingqun, FENG Shaojun, et al. An open-source real-time L1/L2 dual frequency software receiver with an open source GPS-disciplined clock-design, implementation and test[C]// Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Tampa:[s. n.], 2014: 1376-1382.
- [29] XU Liangchun, ZIEDAN N I, GUO Wenfei, et al. NAVSDR: A GPU-based modular GPS software receiver[C]//Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Florida:[s. n.], 2015: 3198-3205.
- [30] HUMPHREYS T E, PSIAKI M L, KINTNER P M. GNSS receiver implementation on a DSP: Status, challenges, and prospects[C]// ION GNSS 19th International Technical Meeting of the Satellite Division. Fort Worth:[s. n.], 2006: 2370-2382.

- [31] ENGEL F, HEISER G, MUMFORD P, et al. An open GNSS receiver platform architecture[J]. *Journal of Global Positioning System*, 2004, 3(2): 63-69.
- [32] LUCK T, BODENBACH M, WINKEL J, et al. Trade-off between pure software based and FPGA based base band processing for a real time kinematics GNSS receiver[C]// ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. [S. l.]:[s. n.], 2005: 1589-1597.
- [33] DOVIS F, SPELAT M, MULASSANO P, et al. On the tracking performance of a Galileo/GPS receiver based on hybrid FPGA/DSP board[C]// ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division. [S. l.]:[s. n.], 2005: 1611-1620.
- [34] AVANZI A, TORTORA P, GARCIA-RODRIGUEZ A. Design and implementation of a novel multi-constellation FPGA-based dual frequency GNSS receiver for space applications[C]// 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland:[s. n.], 2011: 746-752.
- [35] LOPEZ L V R, GARCIA J G, RONCAGLIOLO P A, et al. An experimental L1/L2 GNSS receiver for high precision applications[J]. *IEEE Latin America Transactons*, 2013, 11(1): 48-53.
- [36] RAMAKRISHNAN S, ENGE P. Feasibility study on the use of Xilinx COTS Rad-Hardened FPGAs for GNSS signal acquisition in space applications[C]// Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville:[s. n.], 2013: 1527-1538.
- [37] FORTIN M A, BOURDEAU F, LANDRY R J. Implementation strategies for a software-compensated FFT-based generic acquisition architecture with minimal FPGA resources[J]. *Journal of the Institute of Navigation*, 2015, 63(3): 171-188.
- [38] 武建锋. 基于 DSP 技术的 GPS 接收机设计[D]. 北京:中国科学院, 2006.
WU Jianfeng. Design of DSP-based GPS Receiver[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [39] 上海宇志通信技术有限公司. GNSS 卫星导航开发验证平台[Z]. [S. l.]:[s. n.], 2010: 1-16.
- [40] TAO Jianwei, YU Wenxian. A real-time GPS software receiver correlator design for embedded platform [C]//24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland:[s. n.], 2011: 808-812.
- [41] 上海宇志通信技术有限公司. GPS L1+BD2B1 双模卫星导航接收机——系统方案设计说明[Z]. [S. l.]:[s. n.], 2014: 1-36.
- [42] 薛涛,赵伟,李荣冰,等. 北斗导航接收机的硬件设计与实现[J]. *航天控制*, 2015, 33(1): 94-98.
XUE Tao, ZHAO Wei, LI Rongbing, et al. The hardware design and implementation of BD navigation receiver[J]. *Aerospace Control*, 2015, 33(1): 94-98.
- [43] 杨蓝,朱越华. 多星座 GNSS 接收机设计与实现[J]. *火控雷达技术*, 2014, 43(3): 75-78.
YANG Lan, ZHU Yuehua. Design and implementation of a multi-constellation GNSS receiver[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2014, 43(3): 75-78.
- [44] 李陆浩. 面向无人驾驶汽车的车道级导航研究[D]. 长春:吉林大学, 2014.
LI Luhao. Research on Lane Level Navigation for Autonomous Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [45] 唐斌,刘富,张益清. GNSS 接收机发展趋势与研究思路分析[J]. *导航天地*, 2011(4): 82-84.
TANG Bin, LIU Fu, ZHANG Yiqing. The development tendency and research analysis of GNSS receiver[J]. *GNSS World*, 2011 (4): 82-84.