

SAR在飞行器组合导航系统中的应用

邹维宝^①,任思聪^②,李志林^①, 晓利^①,陈永奇^①

① 香港理工大学土地测量及地理资讯学系;② 西北工业大学自动控制系,西安 710072)

摘要: SAR是雷达理论和技术发展到一定阶段的基础上诞生的一种具有很高分辨率的成像雷达。它在众多领域得到了广泛的应用。在飞行器组合导航系统中,利用 SAR图像进行图像匹配,可以极大地提高系统的导航精度。本文介绍了 SAR组合导航系统的发展及研究现状。重点介绍了 SAR在飞行器组合导航系统中的应用,并给出了具有较高精度、容错性和自主性的INS/GNSS/SAR组合导航系统的原理、结构及仿真结果。

关键词: SAR;组合导航系统;图像匹配;INS/GNSS/SAR

中图分类号: P237 P228 文献标识码: A 文章编号: 1000-3177(2001)63-0011-08

1 前言

合成孔径雷达(SAR)是一种主动式微波成像雷达,它具有分辨率高、作用距离远、测绘带宽和全天候工作等优点,在国际雷达、遥感及众多学科领域已受到广泛关注,是目前研究的热点之一。SAR是在雷达理论和技术发展到一定阶段的基础上诞生的。20世纪30年代,雷达作为一种军用装备开始服务于人类。这时许多国家都开始进行用来探测飞机和舰船的脉冲雷达的研究工作。1939年,英国在一架飞机上装了一部200MHz的雷达,用来监视入侵的飞机,并首先制造出了能产生3000MHz 1KW功率的磁控管。高功率厘米波器件的出现,大大促进了雷达技术的发展。

二战中,雷达得到了广泛的应用,雷达技术得到了飞跃的发展,它不仅能各种复杂情况下发现数百公里外的入侵飞机,并且还能精确测出它们的位置。1943年,在高功率磁控管研制成功并投入生产之后,微波雷达正式问世。

战后的冷战时期,军备竞赛刺激和推动着雷达系统技术及相应技术的迅速发展,每个时期都有标志性的产品问世。40年代雷达的工作频段由高频(HF)甚高频(VHF)发展到微波波段,直至K波段(波长约1cm)。40年代发展起来的单脉冲雷达原理到50年代已成功地应用于AN/FPS-16跟踪雷达,这种供测量用的单脉冲精密跟踪雷达,其角跟踪精度达0.1mrad,即使在今天来看,这样的精度亦是相当高的。50年代出现了合成孔径雷达。60年代的雷达技术是以第一部电扫相控阵天线和后期开始的数字处理技术为标志的。60年代后期,数字技术的发展使雷达信号处理开始了一场革命,并一直延续到现在。合成孔径雷达的计算机成像是70年代中期突破的,高分辨率合成孔径雷达已经移植到民用,并进入空间飞行器。装在海洋卫星上的合成孔径雷达已经获得分辨率为 $25\text{m} \times 25\text{m}$ 的雷达图像,用计算机处理后能提供大量地理、地质和海洋状态信息。在1cm波段上,机载合成孔径雷达的分辨率已达到约 0.09m^2 。80年代相控阵雷达技术大量用于战术雷达。进入90年代后,尽管冷战已结束,但局部战争仍然不断,特别是海湾战争的刺激,雷达又进入了一个

新的发展时期:对雷达观察隐身目标的能力、在反辐射导弹与电子战条件下的生存能力和工作有效性提出了很高的要求,对雷达测量目标特征参数和进行目标分类、目标识别有了更强烈的需求。这时,雷达成像技术进展也很快。双/多基地雷达与雷达组网技术的应用,与无源雷达及其它传感器综合,实现多传感器资料融合等技术,在当今雷达发展过程中均占有重要地位^[1]。

目前,信息融合理论与人工智能理论的飞速发展,为雷达目标检测与识别技术提供了一个全新而有效的途径^[2-11]。人工神经网络技术应用于雷达目标检测与识别领域极具潜力。由于神经网络具有网络的信息存贮能力和并行处理运算能力,能够满足雷达目标检测与识别系统的较小资料存贮空间和并行计算的要求。神经网络技术可以渗透到雷达目标检测与识别的预处理、特征提取和选择、模式分类的整个过程,这是其它模式分类技术所不及的。

2 SAR的发展与特点

二战以来,雷达无论在理论上还是在技术上都得到了飞速发展,新理论、新技术纷纷出现。尤其是随着信息论在雷达领域的应用、雷达信号分析和设计的发展、全息摄影技术的完善,诞生了分辨率很高的新型雷达——合成孔径雷达。

1951年6月,美国Goodyear航空公司的Carl Wiley^[12]首次将多普勒频率分析用于相干运动雷达,发现通过频率分析可以改善雷达的角分辨率,即“多普勒波束锐化”,这一概念便是SAR最初的思想。与此同时,美国Illinois大学也独立开展了相干雷达实验,不仅通过实验验证了“多普勒波束锐化”概念,而且从理论上证明了合成孔径雷达的原理,并于1953年7月研制成功第一部相干X波段雷达系统,首次获得了非聚焦SAR图像^[13]。

1953年,美国Michigan大学提出了利用载体运动可将雷达的真实天线综合成大尺寸的线性天线数组的概念,并派生出了聚焦和非聚焦SAR的工作方式^[14]。在军方的资助下,于1957年8月研制出第一个聚焦式光学处理机载合成孔径雷达系统^[15],并获得第一幅全聚焦的SAR图像。至此,SAR

得到了广泛的认可,并进入实用阶段。

60年代,SAR的光学处理技术得到了全面发展,并开展了多频多极化SAR研究。60年代末,Michigan环境研究院研制成功第一个民用的双频双极化机载SAR系统,主要用于北极海洋冰成像。

70年代,随着电子技术的发展,SAR的数字成像处理成为可能。由于数字成像处理系统具有数据处理灵活、便于各种误差校正、可实时处理等优点,因而它已成为SAR处理器的主流。在此基础上,美国在80年代研制成功一系列的多频、多极化、多入射角机载SAR系统,如JPL实验室的机载AIRSAR及P3SAR等。此外,其它一些国家也先后开展了机载SAR系统的研究。

随着太空时代的到来,SAR的发展也进入了太空。1978年7月美国宇航局(NASA)发射了海洋卫星(Seasat-A),在卫星上首次装载了合成孔径雷达,对地球表面1亿平方公里的面积进行了测绘。此后,一系列星载SAR先后升空。除Seasat-A外,NASA还利用航天飞机分别于1981年11月、1984年10月和1994年4月将SIR-A、SIR-B和SIR-C/X-SAR三部成像雷达加载太空。值得一提的是美国于1988年发射的军用雷达卫星“长曲棍球”(Lacrosse),它可以全天候、全天时地监视地面目标的活动情况,其分辨率为0.3~1米左右,这是目前为止分辨率最高的星载合成孔径雷达。

与此同时其它各国也加紧了星载SAR的研制工作。1987年7月和1991年3月,前苏联分别发射了钻石I号(ALMAZ-I)和钻石II号(ALMAZ-II)。1991年7月和1995年4月,欧洲空间局(ESA)分别发射了欧洲遥感卫星ERS-1和ERS-2。1992年2月,日本发射地球资源卫星JERS-1。1995年11月,加拿大发射了雷达卫星Radarsat,并成为目前为止最成功的商业雷达卫星。

中国是于70年代中期开始研制合成孔径雷达的。二十多年来,连续突破了一系列关键技术,不仅研制成单测绘信道、单极化成像合成孔径雷达,而且还研制成功多测绘信道、多极化成像合成孔径雷达^[6]。1979年,中国研制出了第一台合成孔径成像雷达,所获得的雷达图像已开始应用于地质勘查、工程地质、海洋研究、农业产量评估、灾情实时估计以及其它领域^[16]。1987年完成国家“六五”攻关项目“机载多条带多极化SAR”并装备在中国科学院遥感飞机上。1990年研制成功SAR机地实时传输系统。1994年完成“机载实时成像器”863项目,从而使机载雷达系统成为中国民用遥感的有效工具。自80年代末以来,国家863计划部署了发展星载SAR及相关技术的一系列课题,“星载SAR应用研究”课题探索和开拓了星载SAR的应用前景,为中国星载SAR系统参数的选择提供了理论科学依据。“星载SAR模拟样机研制”是863计划重大项目,并已于1998年顺利通过验收。

几十年来,合成孔径雷达无论在理论上、技术上都在不断发展,它从开始的单波段、单极化、固定入射角、单模式逐渐向多波段、多极化、变入射角、多模式方向发展,天线也经历了固定、机械扫描、电扫及相控阵的发展过程^[17-19]。现在

SAR已经成为军事侦察和微波遥感的有力工具,获得了越来越广泛的应用。

合成孔径雷达之所以受到国内外雷达界的极大重视,其原因就是它的分辨率在相同条件下是普通图像雷达望尘莫及的。SAR的分辨率与可见光照相差不了多少,但它比可见光照有许多重要的优点。首先是SAR的信号可以实时传输和应用(如用于图像匹配制导),又不受黑夜或云层的限制,是一种全天候的遥感技术;SAR还能发现微波能透过而可见光不能透过的遮挡物遮挡着的景物,如森林中的坦克大炮等。

SAR在军事侦察和图像匹配制导方面的应用是令我们非常感兴趣的。当用于图像匹配制导时^[20-31],导弹上除了存贮有目标的图像信息外,还有一个小的SAR摄取图像,并与存贮的目标图像对比藉以达到制导目的。

3 SAR的研究现状

在地形测量、军事侦察、飞行器导航与制导等方面,SAR所起的重要作用愈来愈受到人们的关注^[22,23,32]。自SAR问世以来,它在国民经济各领域获得了广泛的应用。在地质和矿物质资源勘探方面,SAR用来普查地质结构,研究地质、岩石及矿物分布;在地形测绘和制图学方面,SAR可用来测绘大面积地形图,研究城市变迁、道路变迁、湖泊分布及变迁,了解道路运输状况等;在海洋应用方面,它可用来研究大面积海浪特性、研究海洋冰分布、测绘海洋图、研究海洋污染、监视海藻生长等;在水资源方面,它可用来测定土壤湿度及其分布、估测降水量、研究湖泊冰覆盖、地面雪覆盖、研究水源污染情况;在农业和林业方面,它可用于鉴别农作物、研究农作物生长状况、估计农业产量、研究森林覆盖和森林生长状态、估计森林灾情等;在天文学方面,SAR已获取近70%的金星表面图像,相信它将会成为研究金星这样常年被云层覆盖星体的最有效工具^[33-36]。

在GPS定位中,使用SAR目标成像,定位精度可小于5m^[37]。使用文献[38]中介绍的系统,将多个SAR图像数据、机载GPS/INS输出资料和地面观测站记录的GPS输出资料进行处理,可获得小于1m(1 σ)的导航定位精度。

干涉合成孔径雷达(InSAR)也是目前国际上一个主要的研究方向^[17,21,39-41]。普通的合成孔径雷达虽然能够全天候、全天时工作,但是只能实现二维成像,而不能获得高度信息。如果采用InSAR技术,则能实现三维地形图测绘。

机载InSAR在NASA的地形测量计划中扮演着非常重要的角色^[21]。机载SAR所用的单路径和双路径干涉测量法的精度在0.1m~1m之间。采用不同的干涉测量法,已经获得了厘米级的精度^[41]。DGPS/SINS与InSAR构成的系统可用于地形测量,文献[22]中采用了该组合系统的美国STAR-3i系统获得了5cm(1 σ)的精度。

自1991年以来,国外已向空中发射了5部空载合成孔径雷达系统。目前最为先进的当算SIR-C/X-SAR雷达,它已于1994年4月和10月在航天飞机上进行过两次飞行。

代表了目前此类系统的发展水平,甚至在 21 世纪也不会落后。

SAR 在军事领域也有着广泛的应用和发展^[42]。首先,它的全天候、高分辨率及侧视或前视工作等方面的优点使它成为战场和战术侦察方面的有力工具。其次,它可以作为引导设备的显示装置,引导高速投掷武器轰击敌方目标^[43]。例如在 1999 年北约轰炸南联盟战争中,美国联合监视和目标攻击雷达系统 (Joint-stars) 中的高分辨率机载 SAR 与“长曲棍球”(Lacrosse) 星载 SAR 系统相配合,在夜间和各种气候条件下,对目标进行侦察和轰炸效果评估。即使目标隐藏在森林中,SAR 图像仍能确认南联盟的装甲部队和机动式 SA-6 地空导弹系统^[44]。

到 70 年代末,用于空中侦察的机载合成孔径雷达已达 11 个型号; SAR 易于小型模块化,成本低廉。因此,无人机载合成孔径雷达也成为目前各国竞相投资研制的项目。世界各国研制的无人机载合成孔径雷达主要有以下几种:

- 美国休斯公司的“海萨”(HISAR)雷达,它是高空长航“环球鹰”(Global Hawk)无人机的核心装置,其工作频段为 X 波段。

- 以色列 Elta 电子有限公司的系列无人机载合成孔径雷达,采用模块化设计。

- 法国 Dassault 电子公司研制的 SWIFT 无人机载小型合成孔径雷达,工作在 G/H 波段。

- 德国的 DO-SAR ARMS 雷达,工作频段 X 波段。

- 加拿大 EH 公司的 Cormorant 合成孔径雷达,装在直升机上。

- 美国通用原子公司研制的 Lynx 系列无人机载合成孔径雷达,工作频段 Ku 波段,可装在“捕食者”(Predator)、I-GNAT 及 Prowler 无人机上。Lynx 无人机载合成孔径雷达是一种轻型雷达,重量为 50kg 多一点;它具有远距离分辨能力,分辨力可达 10cm; Lynx 中还安装有惯性测量单元及 GPS 接受机;该雷达可载在小型平台上,象无人机系列、侦察机或战斗机,并能提供高质量图像。

近期比较著名的合成孔径雷达系统有美国的“长曲棍球”成像雷达、E-8A(C) (JSTAR 系统)、U-2S 以及英国的 ASTOR 等^[17, 27, 45-47], 目前印度正在考虑为其米格-27“鞭挞者”装备 SAR 吊舱^[48]。

雷达在飞行器组合导航系统中的应用一直是人们关注的研究方向之一^[22, 49, 50]。雷达图像目标的匹配定位是雷达自动导航飞行器中的一个主要问题。在成像未制导中,用数字军事地图作为参考图,雷达图像作为实时图进行匹配定位是一种实用有效的方法。美国和俄罗斯一直在研究有关雷达成像制导技术,1992 年,美国洛勒尔和雷锡恩公司制造出两个小型合成孔径雷达巡航导弹导引头。法国则在研究采用多种成像传感器和目标特性资料进行匹配未制导,塞尔日·达索公司和汤姆逊-CFS 公司分别研制了 35GHz 和 94GHz 的成像雷达传感器的地图匹配制导系统。

先进的中程地地导弹雷达地图匹配未制导导引头必须

解决智能信息处理这一关键技术,以提高地图匹配制导系统的可靠性、适应性和实时性。过去基于成像雷达传感器的地图匹配未制导的研究与目标特性的研究结合不紧,使得地图匹配制导技术应用的可靠性、适应性和实时性都受到严格限制。可喜的是,目前人们已经认识到精确制导技术与目标特性研究相结合的必要性、重要性和紧迫性。

而合成孔径雷达在飞行器组合导航系统中的应用则是当前国际上一个重要的研究领域,INS/GPS/SAR 组合导航系统有可能成为下一代军用飞行器最为合适而优选的导航系统^[23, 25, 51, 52]。

4 组合导航系统的发展

目前,我们所研究的组合导航系统基本上是在以惯性导航系统为主的基础上发展起来的^[20-24, 33, 54-59]。惯性导航系统由于它工作的完全自主性,在航空、航天、航海和许多民用领域都得到了广泛的应用,成为目前各种航行体上应用的一种主要导航设备^[60]。它在导航事业的发展中占有极其重要的地位^[61]。

到了七、八十年代,随着航空、航天及航海事业的发展,现代化的航行体对导航系统的精度、实时性和可靠性提出了越来越高的要求,单一的导航系统已无法满足要求,组合导航技术便逐渐成为导航技术研究和发展的主要方向^[57, 60-65]。早在 70 年代初,美国的全球定位系统 (GPS) 计划刚刚开始,专家们便开始了 INS/GPS 组合导航系统的先期研究工作。同时各国的导航设备公司也非常重视 INS/GPS 组合导航系统。已研制成功的或正在发展中的 INS/GPS 组合导航系统正广泛应用于航空、航天等各个领域。从 80 年代开始,出现了多种导航系统的组合,即多传感器惯性组合导航系统。目前应用较多的有地形辅助惯性导航系统、多普勒惯性导航系统、INS/GPS 导航系统、GPS 数字地图、INS/天文导航系统等^[59, 64, 65]。

组合导航系统的种类繁多,但对不同的使用对象有不尽相同的性能和技术要求。对于民用对象,导航系统的造价有可能是最主要的决定因素;但对军事用途来说,更重要的是自主性、导航精度和可靠性等因素。

从自主性来讲,首先当属惯性导航系统,但其定位精度主要取决于陀螺漂移,其定位误差是随时间增长的;高精度的惯导系统其造价又十分昂贵。另一方面,各种无线电导航,尤其是天文、卫星导航系统,它们的定位精度虽与时间关系不大,但易受干扰和存在非灵敏区等,它们的短期定位精度有可能比较低。这样,把不同特点的系统或装置组合起来,取长补短就有可能构成既精确又廉价的,并且自主性和可靠性都比较好的导航系统。这也就是实现组合导航系统的基本目的。组合导航系统,从先前比较简单和以当时已有设备为基础而精度有限的惯性/多普勒、惯性/天文资料、惯性/塔康、惯性/伏尔测距仪,以及惯性/天文等组合方式,发展到惯性/地形匹配、惯性/图像匹配和惯性/GPS,以及多种传感器和多种系统组合的惯性/GPS/地形轮廓和景像匹配,甚至有什

么可利用的信息源就利用这些信息的多传感器组合系统^[57]。

自从美国建成 GPS系统后,便引起了专家、学者对该系统的广泛关注和研究。2000年5月份,美国政府去掉了 GPS信号中的 SA效应,为用户进行高精度定位提供了可能。GPS具有全天候、实时性好、覆盖范围广等优点,可以提供三维速度、三维位置和时间七维信息,它的这一特点优于其它的导航系统,从而使它获得了广泛的应用。随着人们对 GPS系统研究的深入,GPS技术已经发展成为多领域、多模式、多用途、多机型的高新技术。目前,美国已将 GPS及 INS/GPS装备到小型战术武器内^[66]。据报道,英特斯特特电子公司已研制了一种炮弹制导用 INS/GPS这种系统制造在一块电路板上,安装在美国海军和陆军的火箭助推的5英寸炮弹的尖头部,它能承受炮弹发射时的32500g以上的过载,并能迅速捕获 GPS卫星信号^[67,68]。GPS精密定位技术已广泛渗透到了经济建设和科学技术的许多领域。

但是,对于某些军事用途和特殊使用的对象来说,则不能完全依赖 GPS。因为,首先 GPS是一种非自主导航系统,它要依靠地面控制站才能工作。其次,它易受干扰,可靠性低。以已知频率广播的低功率 GPS卫星信号很易受干扰的影响。一个10千瓦的干扰发射机在理论上可阻止 GPS接收机在干扰机视线范围1850千米以内捕获卫星信号。对此,美国已经开始了 GPS抗干扰技术的研究^[66,67]。美国空军研究实验室同雷神公司共同研制了一种高性能抗干扰系统。该系统能在相当近距离内有强干扰机的情况下捕获 GPS信号,还可抑制1毫秒内的窄带与宽带干扰机的干扰,消耗不到30瓦的功率。

GLONASS(Global Navigation Satellite System全球导航卫星系统)是前苏联独立发展并为俄罗斯继承的全球导航卫星系统,其组成和功能与美国的 GPS异曲同工,在定位、测速及定时精度上则优于施加 SA之后的 GPS。由于俄政府向国际民航和海事组织承诺将向全球客户提供民用导航服务,并于1990年5月和1991年4月两次公布 GLONASS的 ICD,为 GLONASS的广泛应用提供了方便。

GLONASS的公开化,打破了美国对卫星导航独家经营的局面,即可为民间用户提供独立的导航服务,又可与 GPS结合,提供更好的 GDO P;同时降低美国政府利用 GPS施以主权威慑给用户带来的后顾之忧,因此,引起了国际社会的广泛关注,各国纷纷开展 GLONASS接收机或 GLONASS/GPS双星接收机的研制^[50]。

目前,全球导航星系统(GNSS)所采用的导航星座主要包括俄罗斯的 GLONASS和美国的 GPS双星星座^[70-74]。

近些年来,随着控制理论、微电子技术、计算机技术和智能化信息处理技术的发展,国外在80年代末开展了以惯性导航系统为主的多种导航系统的组合研究,把适用范围、实时性、所提供的信息、可靠性、导航精度各不相同的各种导航系统的导航信息用信息融合技术相融合,从而提高系统的整体精度、可靠性、抗损性、反电子干扰及反欺骗能力。美国已确定把这种具有多模式、多用途、高性能、高可靠性、适用于

海陆空天各个领域的多传感器惯性组合导航系统作为下一代飞行器的标准导航模式。这种多传感器惯性组合导航系统的主要优点是:

- (1) 仍然以惯性导航为主导航系统;
- (2) 利用分散估计理论或联邦滤波器、多模态滤波器进行组合^[75,76];
- (3) 可以应用信息融合理论进行多传感器的信息融合;
- (4) 实现各子系统间的互补;
- (5) 具有容错能力^[77-79];
- (6) 可以设计成多模态、多功能的系统;
- (7) 对多个子系统可以实现智能化管理。

模糊逻辑、神经网络和专家系统等人工智能领域的新技术的兴起和发展为组合导航系统中的信息融合技术和故障检测隔离技术开辟了一个全新的途径,使其进入了一个新的发展阶段——智能化阶段^[80-94]。但是,如何应用这些新理论、新技术来改善组合导航系统的性能,还有不少有待于进一步研究和探索的问题。

5 SAR对飞行器组合导航系统性能的改进

从当前组合导航系统的发展现状来看,人们最感兴趣而实际应用较多的主要有惯性/GPS惯性/地形匹配、惯性/GPS地形匹配或景像匹配系统等。

惯性/地形匹配、惯性/景像匹配组合导航系统是70~80年代为保证巡航导弹等较长距离的导航精度和增强自主性而发展起来的一类组合导航系统,并已成功应用于“战斧”等一些巡航导弹和 F-16等战术飞机。它除了高精度导航外,对地形跟踪、地形回避和威胁回避等也具有重要意义。但它也存在一些不足之处:首先,难以连续获得高精度的地形信息。其次,在高度变化较小的平坦地区难以确定地标的准确位置;另外,高度信息只有在飞行器处于地标上空时方能获得,因而只能是验后处理导航信息,限制了目标位置的预测和确定精度。这样,随着科技的不断发展和国防现代化的要求,研制一种精度更高、可靠性更好和自主性更强的组合导航系统就成了导航技术发展的客观要求。合成孔径雷达的诞生和 GNSS系统的建成为实现上述要求提供了可能。

SAR具有典型的雷达特征,它可以在能见度极差的气象条件下获得类似于光学照相的极高分辨率的地面目标图像。该高分辨率的图像可用于目标识别。方法是将匹配模板放在对应的图像点阵上,一旦识别了目标,也就提供出目标相对于载体的位置以及载体的即时位置。将识别的即时位置信息与 INS定位信息相比较,就可对 INS进行误差校正,其水平误差可达 GPS的 P码精度。另一方面,载体速度的变化会影响 SAR的成像质量。这时,INS可为其提供速度变化信息,对 SAR进行补偿。

但是,SAR雷达天线的尺寸和重量较大,快速稳定和跟踪能力有限,并且 SAR连续工作时易暴露自己。另外,在地形特征不明显的平原、水面和沙漠地带,SAR的作用就受到了限制。这时,GNSS可提供定位信息对 INS定位误差进行

修正,并对 SAR平台进行补偿校正。据有关文献报道,利用 GPS干涉仪测姿系统可提供精度优于 0.057° 的实时 SAR平台姿态角测量信息,资料更新率可达 $5\sim 10\text{Hz}^{[9]}$ 。

当载机做机动时,SAR可能无法正常工作,GNSS信号也可能失锁。这时,可利用 INS进行短时间定位,并为 GNSS和 SAR提供辅助信息。

可见,INS/GNSS/SAR三个子系统之间相互取长补短,克服了各自的缺点,保留了优点。所以,INS/GNSS/SAR组合导航系统是一个更完善的系统。INS/GNSS/SAR组合系统的结构如图 1所示。系统的仿真结果如图 2~ 5所示。

INS/GNSS/SAR组合系统主要由目标识别和导航信息

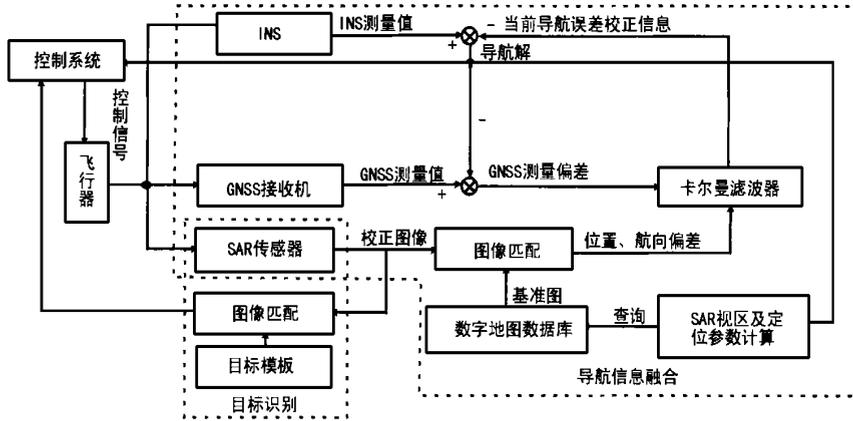


图 1 INS/GNSS/SAR系统原理结构图

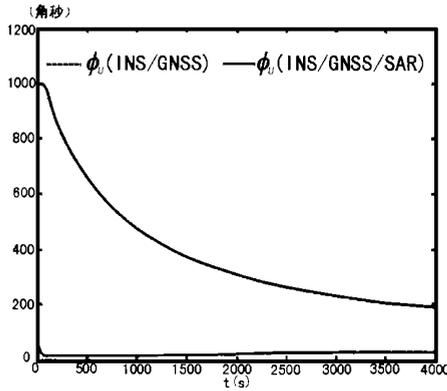


图 2 方位角 ϕ_0 误差 (1d)

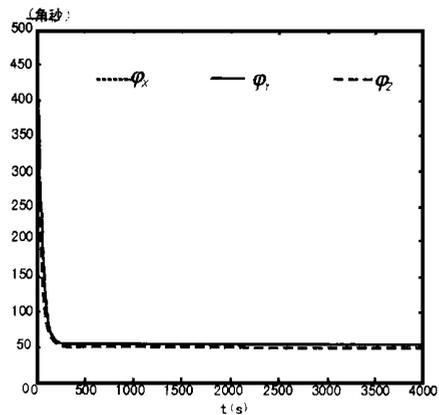


图 3 SAR天线姿态角误差 (1d) (INS/GNSS/SAR)

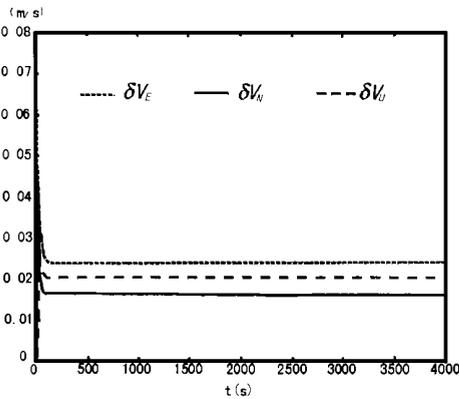


图 4 速度误差 (1d) (INS/GNSS)

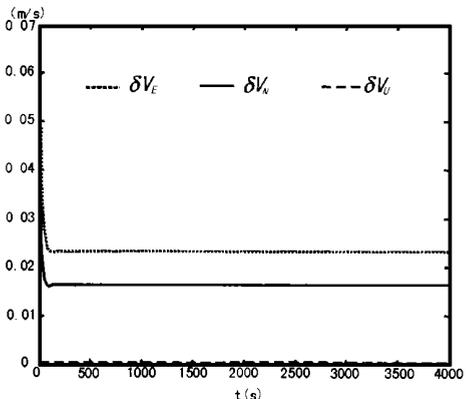


图 5 速度误差 (1d) (INS/GNSS/SAR)

融合两大部分构成。目标识别部分由目标模板、图像匹配和 SAR传感器构成;导航信息融合部分由 INS/GNSS接收机、SAR传感器、图像匹配、数字地图数据库、SAR视区及定位参数计算、卡尔曼滤波器构成。

数字地图数据库中存储着飞行区域的地形高度信息,障

碍物、目标点等位置信息,威胁区域信息以及地标信息等。在系统导航过程中,把校正后的 SAR实时图像与从数字地图数据库中查询到的相应于 SAR测绘区的地图进行匹配,可得到 INS的位置和方位偏差,将其作为观测量送到卡尔曼滤波器与其它观测量一起进行滤波。

6 结 论

(1) SAR改善了 INS/GNSS组合导航系统的自主性；
 (2) SAR使 INS/GNSS系统的定位精度得到了较明显的提高；

(3) INS/GNSS/SAR系统提供的定位信息使 SAR天线姿态稳定性有了改进,保证了 SAR的成像质量,从而提高了导航定位精度；

SAR是一种现代高分辨率成像雷达,它在国民经济的各个领域得到了广泛的应用。尤其是它在军事领域的应用,更引起了人们的极大关注,是目前研究的热点。在组合导航系统 INS/GNSS/SAR中,采用 SAR的实时图像可执行目标匹配、跟踪等任务,可以改善系统性能,提高系统导航精度。INS/GNSS/SAR是一个具有较高自主性、可靠性、全天候、高精度的多传感器组合导航系统,其发展前景是很乐观的。

参考文献

- 1 王小谟,张光义等. 雷达与探测 [M]. 国防工业出版社, 2000
- 2 Dr. Alexey Cherepakhin. Neural Network Loran- C Calibration Using GPS[C]. ION GPS 94, 407~ 416.
- 3 S. McGinnity, G. W. Irwin. Fuzzy logic approach to manoeuvring target tracking[J]. IEE Proc. - Radar, Sonar Navig., 1998(12), 337~ 341.
- 4 Michel Moruzzis, Nathalie Colin. Radar Target Recognition by Fuzzy Logic[J]. IEEE AES Systems Magazine, 1998(7), 13 ~ 19.
- 5 Dr. Barry Griffiths. Performance Enhanced Navigation Using Neural Network Technology[C]. Proceedings of the 1993 National Technical Meeting, 469~ 475.
- 6 张澄波. 综合孔径雷达 [M]. 科学出版社, 1989
- 7 Jian Li. Target Detection with Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1996 (2), 613~ 627
- 8 Leonard Chin. Application of Neural Networks in Target Tracking Data Fusion[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1993(1), 281~ 287
- 9 Tarun Kumar Bhattacharya Simon Haykin. Neural Network- Based Radar Detection for an Ocean Environment[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1997(2), 408~ 420
- 10 Z. - S. Liu. Feature extraction of SAR targets consisting of trihedral and dihedral corner reflectors[J]. IEE Proc. - Radar, Sonar Navig., 1998(3): 161~ 172.
- 11 A. K. Lohner. Improved azimuthal resolution of forward looking SAR by sophisticated antenna illumination function design [J]. IEE Proc. - Radar, Sonar Navig., 1998(2): 128~ 134.
- 12 Wiley C A. Synthetic Aperture Radar- A Paradigm for Technology Evolution[J]. IEEE Transaction on Aerospace Electronic System, 1985, 21: 440~ 443.
- 13 Sherwin C W, Ruina J P, Rawcliff R D. Some Early Developments in Synthetic Aperture Radar Systems[J]. IRE Transaction on Military Electronics, 1962, 6(2): 111~ 115.
- 14 Cutrona L J. A Comparison of Techniques for Achieving Fine Azimuth Resolution[J]. IRE Transaction on Military Electronics, 1962, 6(2): 129~ 131.
- 15 Cutrona L J. On Application of Coherent Optical Processing Techniques to Synthetic Aperture Radar. Azimuth Resolution [C]. Proceeding of IEEE, 1966, 54(8): 1026~ 1032.
- 16 王小谟,张光义等. 雷达与探测 [M]. 国防工业出版社, 2000.
- 17 吴一戎,朱敏慧.合成孔径雷达技术的发展现状与趋势 [J].遥感技术与应用, 2000, 15(2): 121~ 122.
- 18 周健,沈成忠.国外雷达卫星的发展概况及发展趋势 [J].空间电子技术, 1999, 4: 56~ 64.
- 19 Freeman A. SAR Application in the 21st Century[C]. Proceeding EUSAR, 1996, 25~ 31.
- 20 C. L. Glenie, K. P. Schwarz, A. M. Bruton, J. K. Tennant. A Combined DGPS/INS and Synthetic Aperture Radar System for Geoid Referenced Elevation Models and Ortho- Rectified Image Maps[C]. ION GPS 98, pp1159~ 1164.

- 21 Jeffrey E., Frederick V. Stuhler. Future NASA Spaceborne SAR Missions [J]. IEEE AES Systems Magazine, November 1998, 9~ 15.
- 22 D. J. Schmidt. Error Analysis of an Air- to- surface Missile with a Synthetic Aperture Radar Seeker [J]. NAECON, May 1981, 363~ 370
- 23 Jeff R. Layne. Performance Analysis of an Integrated SAR/GPS/INS Targeting and Navigation System [C]. Proceedings of 50th Annual Meeting, ION GPS 94, 157~ 168
- 24 R. Guarino, Paul Ibsen. Integrated GPS/INS/SAR/GMTI Radar Precision Targeting Flight Test Results [C]. Proceedings of ION GPS 95, 373~ 379
- 25 Denis M. Coffey. The Initial Demonstration of An Electronic Charting Capability Onboard U. S. Navy Submarines [C]. ION 96, 343~ 348.
- 26 赵佩红. 国外无人机载合成孔径雷达简介 [M]. 火控雷达技术, 1999(28): 67~ 70
- 27 张俊, 柳健, 陈学广. 雷达地图匹配制导中匹配技术研究 [J]. 现代雷达, 1998(5): 44~ 47
- 28 张俊, 陈学广, 柳健. 雷达地图匹配制导中的共性特征提取与匹配方法 [J]. 电子学报, 1999(10): 58~ 61
- 29 Anthony Abbott. GPS Exploitation for Precision Targeting- Observability Using Synthetic Aperture Radar [C]. 49th Annual Meeting Proceedings of ION, 1993 193~ 202
- 30 Richard Gibbs. Flight Demonstration of Image Fix- Taking with SAR [C]. 49th Annual Meeting Proceedings of ION, 1993 51~ 55
- 31 James E. Bevington. Precision Aided Inertial Navigation Using SAR and Digital Map Data [R]. IEEE PLANS 90, 490~ 96.
- 32 Renato S. Ornedo. GPS and Radar Aided Inertial Navigation System for Missile System Applications [R]. IEEE PLANS 98, 614~ 621.
- 33 Elachi C. Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques [M]. New York: IEEE Press, 1988.
- 34 RADARSAT INTERNATIONAL [R]. Catalogue of Recent Radar Research Related to Canada's RADARSAT, Main Volume. 1992.
- 35 郭华东主编. 雷达图像分析及地质应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- 36 郭华东, 许冠华主编. 星载雷达应用研究 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- 37 Scott Burgett. Target Location in WGS- 84 Coordinates Using Synthetic Aperture Radar Images [C]. Proceedings of the ION GPS- 93, 57~ 65.
- 38 上海无线电二厂. 单脉冲雷达技术 [R]. 上海仪表电讯技术情报所, 1975.
- 39 Moreira J.. A New Method of Aircraft Motion Error Extraction From Radar Raw Data for Real Time Motion Compensation [J]. IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, 1990(7): 620~ 626
- 40 Madsen. Topographic Mapping Using Radar Interferometry: Processing and Techniques [J]. IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing, 1993(1): 246~ 256.
- 41 Fornaro G.. Image Registration in Interferometric SAR Processing [J]. IEEE Proceedings- Radar, Sonar, Navigation, 1995 (11): 313~ 320.
- 42 梁家琳. 合成孔径雷达的军事应用 [J]. 军事测绘, 1994(2): 23~ 26.
- 43 张直中. 合成孔径雷达遥感技术及其应用 [J]. 火控雷达技术, 2000, 29(1): 1~ 7.
- 44 Ressler M, Happ L, Nguyen L, Ton T, Bennett M. The Army Research Laboratory Ultra- wideband Testbed Radar [C]. Proceeding IEEE International Radar Conference, 1999.
- 45 袁孝康. 干涉式合成孔径雷达的测高精度分析 [J]. 空间电子技术, 1999(2): 22~ 29
- 46 朱宝明. SAR技术的发展现状 [J]. 现代防御技术, 1997(3): 58~ 62
- 47 崔麦会. 合成孔径雷达在无人机上的应用 [J]. 航空科学技术, 1999(27): 32~ 33
- 48 印度考虑为米格- 27 鞭挞者' 装备 SAR吊舱 [J]. 航空周刊, 1999(28): 15
- 49 Dr. Min- I James Chang. Using Flight Control Gyros for Missile Navigation [C]. ION GPS 96, 1711~ 1716
- 50 柳仲贵. GLONASS导航电文及其解 [J]. 导航, 1996(2): 61~ 71
- 51 Alexander S Hamilton. A flexible Federated Navigation System for Next Generation Military Aircraft [C]. ION GPS 97, 409~ 415
- 52 杜攀. 常规单脉冲雷达体制下的多目标近距离分辨 [J]. 系统工程与电子技术, 1999(11): 23~ 25
- 53 Jurgen Windl, Jens Rainer. Flight and Landing Trial with a combined DGPS/DGLONASS/INS System for high Dynamic Maneuvers and Precision Landings [C]. ION GPS 98, 2043~ 2051
- 54 Joe N. Portney. Multisensor Integrated Navigation System [C]. ION GPS 89, 181~ 185
- 55 Ronald T. Kelley. Integrated Inertial Network [R]. IEEE PLANS 94, 439~ 446.
- 56 Howard Musoff. Analysis of Disparate Inertial Systems Data [C]. ION GPS 96, 15~ 19
- 57 任思聪. 惯性/合成孔径雷达组合导航系统 [J]. 导航, 1997(3): 1~ 5

- 58 金慧琴. 组合 GPS/多普勒导航系统 [J]. 导航, 1999(3): 21~ 26
- 59 John R. Coffee. An Integrated DGPS/INS Navigation System for a Ballistic Missile Design and Flight Test Results [J]. Journal of The Institute of Navigation, 1996(3): 273~ 293
- 60 袁信, 俞济祥, 陈哲. 导航系统 [M]. 航空工业出版社, 1993
- 61 S Dim. Required Navigation Performance (RNP) for Precision Approach and Landing with GNSS Application [J]. Journal of ION, 1994(1)
- 62 Davis J. RNP Tunnel Concept for Precision Approach with GNSS Application [C]. Proceedings of the ION Annual Meeting, 1993 21~ 23
- 63 Heinrichs G. The NR- Navigation System Family, Features and Performance of the Fully Integrated Single Frequency, 24 - Channel, C/A Code GPS/GLONASS Navigation Systems [C]. Proceedings of ION GPS 97
- 64 马昕. 多传感器惯性组合导航技术研究 [D]. 南京航空航天大学博士论文, 1998
- 65 邹维宝. GPS 数字地图系统研究 [D]. 西北工业大学硕士论文, 1997
- 66 GPS 制导武器使用的抗干扰系统 [J]. 航空周刊, 2000(8): 13~ 14
- 67 用于炮弹的微型 GPS 惯导系统 [J]. 航空周刊, 1999(2): 10
- 68 炮弹制导用小型 GPS 接收机 [J]. 航空周刊, 1999(49): 14
- 69 对 GPS 导航信号的干扰可设法减小 [J]. 航空周刊, 1999(1): 11
- 70 周其焕, 陈惠萍. ICAO 定义的第一代 GNSS 概貌 [J]. 导航, 1993(2): 1~ 7
- 71 Raymond A. Eastwood. GPS/GLONASS 组合接收机 [J]. 导航, 1991(3): 52~ 60
- 72 P. Misra. Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM) of GPS and GLONASS [J]. Journal of The Institute of Navigation, 1993(1): 87~ 103
- 73 Mr. Peter Raby. Integrated GPS/GLONASS Navigation Algorithms and Results [C]. Proceedings of ION GPS 93, 161~ 170
- 74 Udo Roszbach. Transformation Parameters Between PZ- 90 and WGS 84 [C]. ION GPS 96, 279~ 285
- 75 Y. Gao. Comparison and Analysis of Centralized, Decentralized, and Federated Filters [J]. Journal of ION, 1993(1), 69~ 86
- 76 J. Christopher McMillan. Techniques for Soft- Failure Detection in a Multisensor Integrated System [J]. Journal of The Institute of Navigation, 1993(3): 227~ 248
- 77 Mats Brenner. Integrated GPS/Inertial Fault Detection Availability [J]. Journal of The Institute of Navigation, 1996(2): 11 ~ 129
- 78 Ren Da, Ching- Fang Lin. A New Failure Detection Approach and Its Application to GPS Autonomous Integrity Monitoring [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1995(1): 499~ 506
- 79 Dr. Kazunobu Koremura. Position Accuracy Improvement Using Fuzzy Processing on GPS Data [C]. ION GPS 94, 165~ 172
- 80 Hu Wei- Dong. The Neural Network Method for Radar Weak Target Detection [C]. IEEE NAECON 94, 1052~ 1058
- 81 Frank W. Moore. A New Methodology for Reducing Brittleness in Genetic Programming [C]. IEEE NAECON 97, 757~ 763
- 82 Wei Yan. A Hybrid Genetic/BP Algorithm and its Application for Radar Target Classification [C]. IEEE NAECON 97, 981~ 984
- 83 K. S. Mostov. Fuzzy Adaptive Stabilization of Higher Order Kalman Filters in Application to Precision Kinematic GPS [C]. ION GPS 93, 145~ 1456
- 84 Steven R. Swanson. A Fuzzy Navigational State Estimator for GPS/INS Integration [C]. IEEE NAECON 98, 541~ 548
- 85 Milton L. Cone. Scheduling for Sensor Management Using Genetic Search [C]. IEEE NAECON 96, 150~ 156
- 86 Mikan Stamenkovich. An Application of Artificial Neural Networks for Autonomous Ship Navigation Through A Channel", PLANS 92, 346~ 352
- 87 李学恩, 房建成, 申功勋. 可视化智能融合导航系统 [J]. 中国惯性技术学报, 1998(4): 7~ 11
- 88 杨莉, 汪叔华. 采用 BP 神经网络的惯导初始对准系统 [J]. 南京航空航天大学学报, 1996(4): 487~ 491
- 89 Y. H. Cho. A Fuzzy- Tuned Adaptive Kalman Filter [C]. the Third International Conference on Industrial Fuzzy Control and Intelligent Systems, 1993, 144~ 148
- 90 C. Abdelnour. On- Line Detection and Correction of Kalman Filter Divergence by Fuzzy Logic [C]. Proceedings of the 1993 American Control Conference, 1835~ 1839
- 91 G. Viot. Fuzzy Logic Concepts to Construction [J]. AI Expert, 1993(11): 26~ 33
- 92 田蔚风, 金志华, 陆凯. 基于人工神经网络的卫星姿态信号处理 [J]. 上海交通大学学报, 1999(11): 1352~ 1354
- 93 Neal A Carlson. Information- Sharing Approach to Federated Kalman Filtering [C]. NAECON 1988, 211~ 217
- 94 N Carlson. Common Kalman Filter: Fault Tolerant Navigation for Next Generation Aircraft [C]. NAECON 1988, 23~ 32
- 95 邓强, 黄顺吉. 基于 GPS 干涉仪的机载合成孔径雷达平台姿态控制与运动补偿的研究 [J]. 导航, 1995(3): 88~ 92