

文章编号: 2095-4980(2018)03-0440-05

无人机载 SAR 任务电子系统的研究与应用

邵 威^{1,2}, 杨志谦^{1,2}

(1.中国电子科技集团公司 第三十八研究所, 安徽 合肥 230031; 2.孔径阵列与空间探测安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要: 无人机载合成孔径雷达(SAR)具有机动灵活、战场生存能力较强的特点, 它依靠SAR先进的雷达成像技术与无人机全天候、全天时侦察能力, 是未来战争中监视与侦察的重要手段。由于SAR任务受无人机航线规划与飞行姿态的影响, 各任务之间又存在差异性, 调度易受制约而造成效率低下。任务电子系统的目的就在于为无人机载SAR的任务调度提供科学的决策依据。介绍了无人机载SAR任务电子系统的架构及任务调度方法, 建立了任务调度的线性规划约束条件, 通过飞行试验验证了系统的合理性与有效性。

关键词: 无人机载 SAR; 任务电子; 动态调度; 线性约束

中图分类号: TN958

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201803.0440

Mission electronic system for UAV-borne SAR

SHAO Wei^{1,2}, YANG Zhiqian^{1,2}

(1.No.38 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei Anhui 230031, China;

2.Key Laboratory of Aperture Array and Space Application, Hefei Anhui 230088, China)

Abstract: Unmanned Aerial Vehicle(UAV)-borne Synthetic Aperture Radar(SAR) has the characteristics of high mobility and high viability on battlefield. It is one of the important surveillance and reconnaissance measures in future warfare relying on advanced radar imaging technology of SAR and reconnaissance ability on all weathers and all days of UAV. The SAR task is affected by the flight planning and flight attitude of the UAV, and the various missions have lots of differences, scheduling would be restricted and inefficient. The purpose of mission electronic system is to provide scientific decision-making references for mission dispatch of UAV-borne SAR. The structure of mission electronic system and mission dispatch method are introduced, and the constraints in linear programming of mission management are established. The flight tests have demonstrated the reasonableness and effectiveness of the system.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle(UAV)-borne Synthetic Aperture Radar(SAR); mission electronic system; dynamic scheduling; linear constraints

合成孔径雷达(SAR)将特定区域后向散射回来的整个雷达脉冲串加以相干合成, 为雷达合成出一部等效孔径很长的天线, 提供高分辨力图像^[1]。SAR能够克服云、雾、雨、雪和黑暗等条件的限制, 对地面目标成像; 可以全天时、全天候、高分辨力、大幅面对地观测; 能够在军事侦察、军用测绘及诸多民用领域发挥重要作用。SAR一般采用飞机或卫星作为运动平台^[2]。

无人机一般按军事要求^[3]设计, 用来执行所谓的“3D”(Dull, Dirty, Dangerous)任务, 即单调、肮脏和危险的任务^[4]。与载人飞机相比, 无人机是无人驾驶, 因而可以把它送到危险的环境执行任务而无须担心人员伤亡, 且无人机具有体积小、造价低、使用方便、对作战环境要求低、战场生存能力较强等优点, 世界上各主要军事国家对无人机在军事上的用途十分青睐^[5]。无人机载 SAR 相对于星载 SAR^[6], 没有飞行轨道、测绘时间和重复性等限制; 相对于有人机载 SAR, 没有航线固定、测量角度小和起飞场地的限制^[7]。无人机载 SAR 以小型无人机为平台, 以高分辨力 SAR 为传感器, 通过对地面进行测绘, 获取慢速平台下的回波数据^[8]。由于在慢速平台下要获得高分辨力 SAR 图像, 加上测绘目标的复杂性较高, 如何快速、有效地制定 SAR 系统任务调度方案, 进而有效、合理地使用无人机载 SAR 系统的资源, 是亟待解决的问题。

1 无人机载 SAR 系统组成

无人机载 SAR 系统主要分为无人机部分、雷达部分和地面设备 3 个部分。

小型无人机采用遥控或者程控方式飞行, 包含供电系统、航电和导航控制系统、机身姿态测量系统等; SAR 系统主要包括天线稳定平台、发射/接收系统、信号处理系统及任务电子系统; 地面设备包含地面网络交换控制器、地面显控终端、SAR 数据处理和地面任务控制等。

无人机载 SAR 在理想情况下无人机前端指向、实际飞行航迹方向与预定航线方向是一致的, 但由于无人机在飞行过程中会受到空气阻力等因素的影响, 机身姿态会存在一定偏差, 对无人机的姿态进行实时测量后, 送给 SAR 进行运动补偿。雷达波束对地面进行探测后形成回波, 对回波进行信号处理后得到原始的 SAR 数据, 通过无线通信传输到地面做进一步处理, 得到最终的高分辨率图像。其工作流程如图 1 所示。

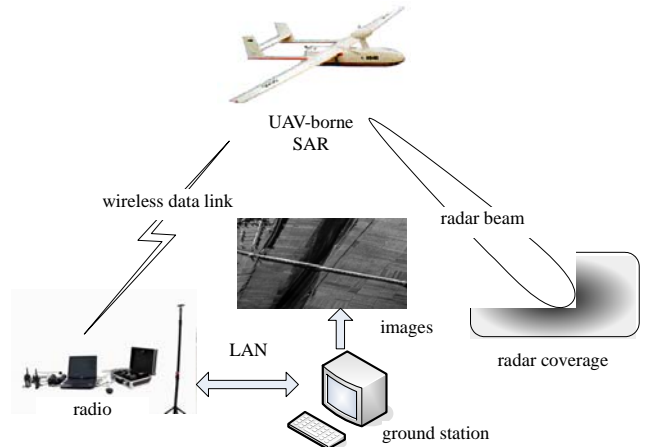


Fig.1 Working procedure of UAV-borne SAR
图1 无人机载SAR工作流程

2 任务电子系统架构

任务电子系统是 SAR 任务调度的仲裁者^[9], 其核心就是根据终端的控制指令和外设系统的状态, 决定分配任务优先级, 采用现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)与嵌入式计算机来搭配构建软硬件系统, 可以实时地根据现场系统状态自动或手动加载各种任务。系统架构组成如图 2 所示。

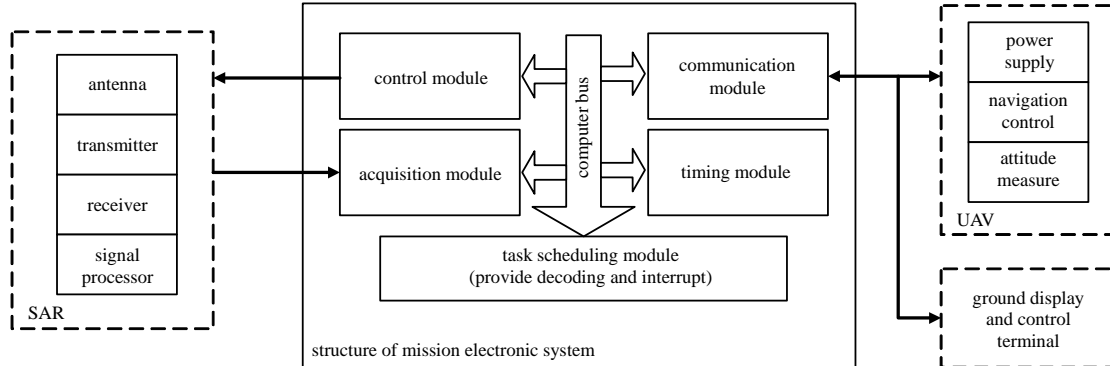


Fig.2 Structure of mission electronic system
图2 任务电子系统架构

控制模块负责接收机载终端发送的雷达控制指令、任务参数等, 或在地面站人工干预下自行设定雷达的工作参数, 同时完成雷达各分系统的状态检测回送给无人机, 实现各种工作方式/工作模式下的雷达任务执行。通信模块担负着机载终端系统、地面显控终端与雷达之间、雷达内部各分系统之间大量、快速的数据通信, 目前主要包括 1553B,429,CAN,RS422 等总线方式; 定时模块可根据无人机高度信息、速度信息以及天线波束指向信息实时计算脉冲重复频率、DDS 波形、A/D 采样起始时间及相干时序; 采集模块针对无人机载 SAR 系统在飞行前、飞行中、飞行后的诊断要求, 综合运用加电自检、周期自检和维护自检等检测模式实现雷达系统检测, 并进行故障相关、隔离、诊断和报警; 任务调度模块对上述模块需要处理的任务进行综合调度, 产生译码和中断分配, 保证系统资源和整机的工作效率。

3 任务电子系统的调度和管理

3.1 任务调度方法

无人机载 SAR 的任务调度方法一般包括静态调度和动态调度。

当所有信息均在任务执行前已知时,可以采取静态任务调度^[10],目标是通过将任务正确分配和排序,使得任务按照一定的顺序执行,以最小化任务总的完成时间。对于不可预测的动态任务(发现目标、航线变化、设备故障等),可以采用动态任务调度。

当 SAR 在某一段航线内完成对某一地区的成像,系统需要完成若干任务。为了保证各个任务之间不发生冲突,使系统资源得到合理的分配和利用,采用了并行任务树的方法对系统任务进行调度^[11];使其既具备了并行结构和树结构的优越性^[12],又能克服二者的不足。

并行任务树结构是按照自顶向下的顺序依次静态调度,但是当系统遇到突发情况,必然会增加任务数量,系统需要及时对任务进行并行的动态调度,对任务分配不同的系统资源和优先级,以求在下一个节点到来之前完成所有任务,这样是以消耗系统资源为前提,加快多个任务的完成。并行结构和树结构交替进行,直至全部的任务完成,其任务调度执行流程如图 3 所示。

3.2 线性约束条件

整个任务规划过程采用线性规划完成,通过线性规划可以有效缩短系统的计算时间,减少对计算机资源的占用^[13]。任务电子系统线性规划的目标是,无人机电 SAR 在某一成像阶段内,其总飞行时间为 T ,系统总资源为 S ,在 T 时间内,且实时使用资源不超负荷(不超过 90%)的情况下,通过 n 轮并行调度完成需要执行的所有任务 M (含动态任务)。

每一轮并行调度的时间由其中资源需求最大、完成时间最长的任务决定。设在第 i 轮并行调度中完成的任务数为 j ,则每轮完成的任务数为 j_i ,每个任务所占资源为 S_{ij} ,每个任务完成的时间为 t_{ij} ,则第 i 轮并行调度的时间 T_i 为:

$$t_i = \max(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ij}) \tag{1}$$

则系统执行完所有任务所需时间 $f(t)$ 为:

$$f_t = \sum_{i=1}^n \max(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ij}) \tag{2}$$

由此可得,该线性规划的目标函数为:

$$P = \min f(t) \tag{3}$$

其约束条件为:

$$\begin{cases} \sum_{j=1} S_{ij} (i = 1, 2, \dots, n) \leq 90\% S \\ \sum_{i=1}^n \max(t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ij}) \leq T \\ \sum_{i=1}^n j_i = M \end{cases} \tag{4}$$

在线性规划的约束条件内,求出目标函数的最优解,即在满足时间、系统资源的约束前提下,根据专家经验等知识库^[14],对各个任务的分配进行调度,安排合适的任务并行执行,获得最短的完成任务的时间,使 SAR 系统可以顺利成像。

3.3 任务电子系统的实现与测试

任务电子系统采用 FPGA 配合嵌入式计算机实现,软件采用 QNX 实时操作系统,对突发动态任务采用中断方式响应。系统软硬件均可在线编程,可完成多任务实时切换,并根据需要对各功能模块随意调用和裁剪。

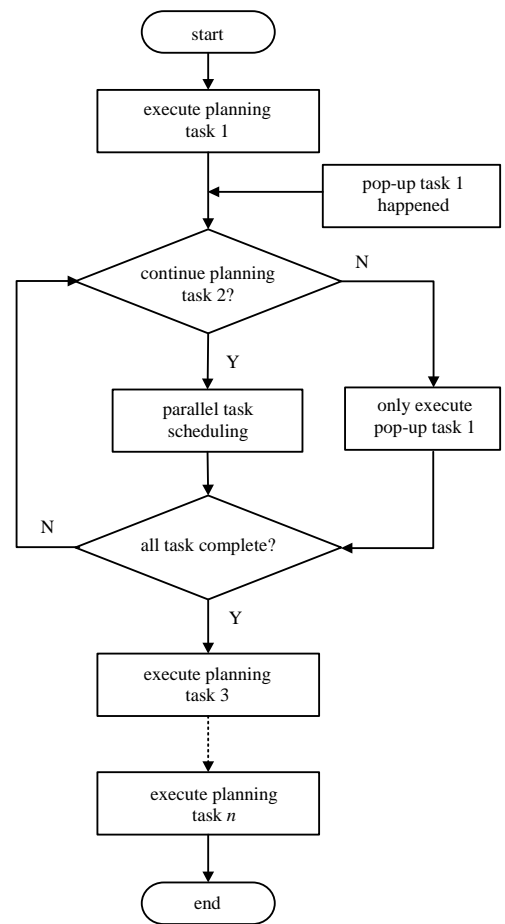


Fig.3 Working procedure of parallel task tree
图3 并行任务树的工作流程

通过实际多个架次的飞行试验的验证,任务电子系统采用的处理器为 PC104 嵌入式计算机,其内存资源为 33 MB,主频为 100 MHz,则单条指令执行时间约为 10 个时钟周期,约 100 ns,不同的任务需要的指令数和处理的数据量已知。对 SAR 在某一工作模式下的实时系统资源使用率进行记录,任务执行时间与资源利用率之间的关系如图 4 所示,在没有进行规划调度时,虽然系统经常工作在 60% 以下,但偶尔会达到 90%,存在资源冲突的风险,而完成任务需要 44 s,进行规划调度后,资源占用率稳定在 60% 左右,完成所有任务需 40 s 左右,时间缩短 10%,雷达系统最终成像结果清晰。

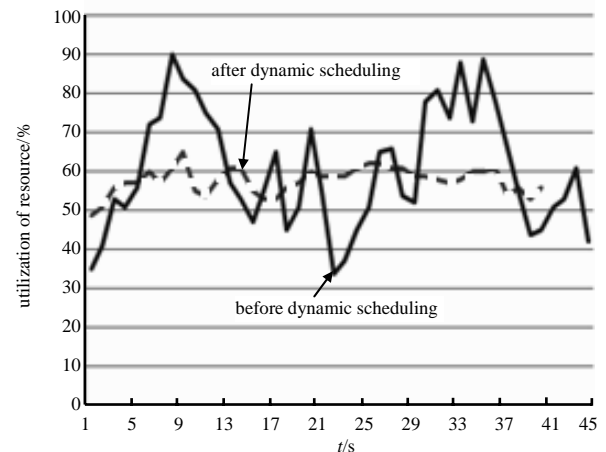


Fig.4 Relationship between system resources and time

图4 执行时间与资源利用率关系图

4 结论

任务电子系统是提高 SAR 工作效能的关键。本文给出了无人机载 SAR 任务电子系统的构架以及任务调度方法,并通过了现场试验的验证,系统是稳定和可靠的。

随着电子技术与计算机技术的快速提高,系统数字化集成度也越来越高,任务电子系统小型化、综合化、多功能一体化和通用化是发展趋势^[15]。后续可开展网络化、多用途的任务电子系统研究,同时完善任务调度方法。

参考文献:

- [1] CUMMING I G,WONG F H. Digital processing of synthetic aperture radar data:algorithms and implementation[M]. Norwood:Artech House, 2005.
- [2] 邓彬. 机载SAR地面运动目标检测方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006. (DENG Bin. Research on ground moving targets detection with airborne SAR[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2006.)
- [3] CHANDLER P R,PACHTER M,SWAROOP D,et al. Complexity in UAV cooperative control[C]// Proceedings of American Control Conference. Anchorage,AK,USA:IEEE, 2002:1831-1836.
- [4] SCHUMACHER C,CHANDLER P R,PACHETR M,et al. UAV task assignment with time constraints via mixed-integer linear programming[C]// AIAA 3rd "Unmanned Unlimited" Technical Conference,Workshop and Exhibit. Chicago,IL:AIAA, 2004. doi:10.2514/6.2004-6410.
- [5] 付伟,孙春贞. 小型高速无人机控制耦合分析及补偿控制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):57-61. (FU Wei, SUN Chunzhen. Control coupling analysis and compensation control of small high speed UAV[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):57-61.)
- [6] 朱良,郭巍,禹卫东. 合成孔径雷达卫星发展历程及趋势分析[J]. 现代雷达, 2009,31(4):5-10. (ZHU Liang,GUO Wei, YU Weidong. Synthetic Aperture Radar satellite development process and trend analysis[J]. Modern Radar, 2009,31(4): 5-10.)
- [7] 邓云凯,赵凤军,王宇. 星载SAR技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012,1(1):1-10. (DENG Yunkai,ZHAO Fengjun,WANG Yu. Study on the development trends and application of spaceborne SAR[J]. Journal of Radar, 2012,1(1): 1-10.)
- [8] THAYAPARAN T,SURESH K,QIAN S,et al. Micro-Doppler analysis of a rotating target in synthetic aperture radar[J]. IET Signal Processing, 2010,4(3):245-255.
- [9] 李仁发,刘彦,徐成. 多处理器片上系统任务调度研究进展评述[J]. 计算机研究与发展, 2008,45(9):1620-1629. (LI Renfa,LIU Yan,XU Cheng. A survey of task scheduling research progress on multiprocessor system-on-chip[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008,45(9):1620-1629.
- [10] 黄姝娟,朱怡安. 基于并行优先级任务树的多核调度方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2012,30(5):652-656. (HUANG Shujuan,ZHU Yi'an. Improving multi-core scheduling method through using parallel priority task tree model[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012,30(5):652-656.)
- [11] LIU C,ANDERSON J H. Supporting pipelines in soft real-time multiprocessor systems[C]// 21st Euromicro Conference on Real-Time Systems. Dublin,Ireland:IEEE, 2009:269-278.

- [12] 刘晓丽,杨斌,高朝晖,等. 遥感卫星滚动式动态任务规划技术[J]. 无线电工程, 2017,47(9):68-72. (LIU Xiaoli,YANG Bin,GAO Zhaohui,et al. Research on rolling dynamic mission scheduling technique for remote sensing satellites[J]. Radio Engineering, 2017,47(9):68-72.)
- [13] 高引民,甘仞初. 线性规划问题非有效约束条件性质研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005,27(6):1041-1043. (GAO Yinmin,GAN Renchu. Characteristics of ineffective constraints in linear programming[J]. Systems Engineering and Electronics, 2005,27(6):1041-1043.)
- [14] 陈力,王永吉,吴敬征,等. 基于树状线性规划搜索的单调速率优化设计[J]. 软件学报, 2015,26(12):3223-3241. (CHEN Li,WANG Yongji,WU Jingzheng,et al. Rate-monotonic optimal design based on tree-like linear programming search[J]. Journal of Software, 2015,26(12):3223-3241.)
- [15] 孟藏珍,许稼,谭贤四,等. MIMO-SAR成像技术发展机遇与挑战[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):423-430. (MENG Cangzhen,XU Jia,TAN Xiansi,et al. Development opportunities and challenges of MIMO-SAR imaging technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):423-430.)

作者简介:



邵 威(1984-), 男, 安徽省安庆市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事雷达任务电子系统研究与设计. email:154667695@qq.com.

杨志谦(1972-), 男, 河南省驻马店市人, 研究员, 主要研究方向为数字通信、复杂系统故障预测管理.

关于举办“2018 复杂环境下装备干扰与抗干扰学术交流大会”的通知

十九大报告中提出, 树立科技是核心战斗力的思想, 推进重大技术创新、自主创新, 建设创新型人民军队。这些论述进一步彰显了科技在战斗力要素构成中的地位和作用, 基于这一战略指导思想, 在吕跃广院士提议下, 中国电子学会拟于 2018 年 7 月 7-8 日在北京举办“2018 复杂环境下装备干扰与抗干扰学术交流大会”。有关会议事宜及征文内容如下:

- 一、会议主题: 科技兴军 创新超越
- 二、时间地点: 2018 年 7 月 7~8 日 6 日报道 地点: 北京
- 三、大会主办单位: 中国电子学会
大会承办单位: 中国电子学会学术交流中心
大会协办单位: 通信抗干扰技术国家级重点实验室、试验物理与计算数学国家重点实验室
中国电子学会无线电定位分会、中国电子学会导航分会
- 四、大会主席: 吕跃广院士
- 五、大会共同主席: 于 全院士、杨小牛院士、孙 聪院士、王永良院士、刘永坚院士、
王沙飞院士、陆军院士、姚富强教授、苏东林教授
- 六、大会程序主席: 戎建刚、李少谦、刘佳琪、高梅国、高志刚
- 七、会议内容: 具体要求请见网站www.iaeej.com
- 八、会议征文: 具体要求请见网站www.iaeej.com
- 九、会务组联系方式
 - 1、会议报名及合作咨询:
中国电子学会 张杰 010-68246068 手机: 13811330009 (微信号)
E-MAIL: cie_ew2016@163.com QQ: 961055790@qq.com
 - 2、收款单位: 中国电子学会 开户行: 工商银行北京公主坟支行
帐号: 9558850200000514849 (汇款注明装备会议+参会人员姓名)
 - 3、报到事项: 会务组另行通知。

中国电子学会
2018 年 3 月 29 日