

主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能分析

刘建平 梁向农

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 针对主星带伴随分布式小卫星系统效能分析中几个关键问题进行了研究。首先, 根据分布式小卫星 SAR 系统的任务需求, 给出了系统效能评估指标体系; 结合分布式小卫星轨道运行特点, 建立了系统能力模型; 根据系统的工作状态, 建立了系统可靠性 Markov 模型; 基于能力模型与可靠性模型, 建立了主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能评估模型。仿真结果证明, 以上模型的建立为主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能分析以及系统参数设计提供理论依据。

关键词: 分布式小卫星, 合成孔径雷达, 效能分析, 可靠度

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1345-04

Effectiveness Analysis of Spaceborne Parasitic Distributed SAR System

Liu Jian-ping Liang Dian-nong

(College of Electric Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract To analyze several key problems about effectiveness analysis of spaceborne parasitic SAR system, firstly, an index system of effectiveness assessment is established based on the mission request of distributed SAR system; combined with orbit characteristics of distributed small satellites, the model of system capability is established; based on system working state, Markov model of system reliability is established; based on capability model and reliability model, the model of effectiveness assessment is established. The simulation results indicate the proposed models provide theoretic dependence for effectiveness analysis of spaceborne parasitic distributed SAR system

Key words Distributed small satellites, Synthetic Aperture Radar (SAR), Effectiveness analysis, Reliability

1 引言

分布式小卫星 SAR 系统是近年来提出的一类新的 SAR 系统^[1-3], 它的基本思想是多颗小卫星协同工作, 共同完成一项或多项任务。组成这种分布式小卫星系统的单颗小卫星都是相对独立的, 有自己的结构、功率产生、通信系统、姿态控制等。多颗小卫星组合在一起, 协同工作, 才能实现系统性能的提升或是完成一些单星系统不能完成的特殊功能, 如高分辨、大测绘带成像、高精度干涉测高、以及地面慢速目标检测等。而且这类系统具有多功能、生存力和抗干扰能力强、周期短、成本低等优点, 正成为国内外关注的热点。主星带伴随小卫星编队系统就是其中一种实现形式。主星由传统的在轨单星 SAR 系统构成, 发射雷达脉冲信号, 而若干个微小卫星以一定的分布形状编队飞行在主星前或后一定距离处, 同时接收从地面目标返回的信号。法国的“干涉车轮”就是一个典型代表。

系统效能分析的目的, 就是寻求对象系统满足规定效能或使其效能水平达到预期改进的备选方案。关于主星带伴随

分布式小卫星 SAR 系统效能分析, 目前国内外的文献中还没有讨论过, 本文主要针对系统效能分析中几个关键问题进行了研究, 给出了主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能指标体系; 结合分布式小卫星轨道运行特点, 分析了系统能力; 根据系统的工作状态, 分析了系统可靠性; 基于系统能力与系统可靠性, 分析了主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能。

2 主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能评估指标体系

在以信息技术为先导的现代战争中, 天基雷达是情报收集、监视和侦察以掌握控制信息权的重要手段。高分辨率和大测绘带 SAR 成像、运动目标指示(MTI)、干涉合成孔径雷达(InSAR)测高是航天军事应用对天基雷达系统的迫切需求, 而主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统可以满足这些需求。因此, 对地侦察是主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统完成的主要任务, 而这个任务包括 3 大功能: 高分辨率和大

测绘带 SAR 成像, MTI 和 InSAR 高精度测高。对于性能指标的选择可根据用户需求而定, 高分辨、大测绘带 SAR 成像能力可以通过地面距离分辨率、方位分辨率、测绘带宽和图像信噪比来综合; MTI 能力可以通过最小可检测速度和目标检测概率来综合; InSAR 高精度测高能力可以通过地面距离分辨率、方位分辨率、测绘带宽和测高精度来综合。图 1 给出了主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能评估指标体系结构。

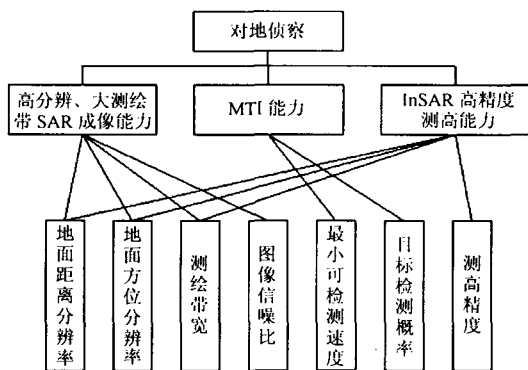


图 1 主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能评估指标体系结构

3 系统的能力分析

由图 1 可以看到, 主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统主要具有 3 个能力: 高分辨、大测绘带 SAR 成像, MTI 和 InSAR 高精度测高。这 3 个能力如何通过下一层性能指标来综合呢? 这是系统能力分析所要解决的问题。

系统的能力反映设计者赋予系统的“本领”, 美国工业界武器装备咨询委员会把能力定义为, 当已知系统在执行任务过程中的状态这一条件下, 对系统达到任务目标的程度的度量。结合主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能评估指标体系结构, 系统的能力可以定义为系统在已知状态下达到用户对于性能指标要求的概率, 如 InSAR 高精度测高能力表示系统在已知状态下达到用户对地面距离分辨率、方位分辨率、图像信噪比和测高精度指标要求的概率。

考虑主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统轨道运行特点, 对于自由运行的编队来说, 垂直基线和水平基线都会发生周期性的变化^[4]。空间基线的变化必定会引起有关性能指标的变化。因此, 根据这个特点, 系统的能力就可以表示出来。以 InSAR 高精度测高能力为例, 假定小卫星环绕角 $\beta \in (0 \sim 2\pi)$, 地面距离分辨率为 ρ_r , 地面方位分辨率为 ρ_a , 测绘带宽为 S_w , 测高精度为 $\sigma_h(\beta)$, 用户要求分别为 $5m \times 5m$, $50km$ 测绘带宽, $5m$ 的测高精度, 则能力可以表示为

$$c = P(\sigma_h(\beta) \leq 5m | \rho_r = 5m, \rho_a = 5m, S_w = 50km) \quad (1)$$

其中 $P(\bullet)$ 表示概率。

4 系统的可靠性分析

系统可靠性是指在规定的时间内和规定的条件下, 系统完成任务的概率^[5]。分析系统可靠性需要建立可靠性模型, 这里主要有 3 种方法: 一是可靠性框图分析法, 就是通过建立系统各部分之间的结构关系、功能关系和逻辑关系, 分析系统可靠性; 二是故障树分析法, 是将系统故障的各种原因(包括硬件、环境、人为因素), 由总体至部分, 按树枝状结构, 自上而下逐层细化的分析方法; 前面两种方法主要回答系统是否正常工作, 而没有告诉我们系统工作情况如何, 系统可靠性 Markov 模型解决了这个问题, 可以得到系统不同工作状态下完成任务的概率。这里采用第三种方法。

系统可靠性 Markov 模型就是求解一组差分方程, 每个方程表示一个工作状态系统可靠度随时间的变化。离散差分方程表示如下:

$$P(n+1) = A \cdot P(n) \quad (2)$$

其中 P 表示系统可靠性状态概率矢量, A 表示由部件故障率构成的状态系数矩阵。

结合本系统的实际, 可以做以下几点假设:

- (1) 每个伴随小卫星由 4 个主要部分构成: 结构总线分系统、推进分系统、数传分系统和 SAR 雷达载荷分系统;
- (2) 系统各部分只有正常和故障两种状态, 各部分的寿命相互独立, 并且服从指数分布;
- (3) 只分析硬件的可靠性, 即认为软件、人员是完全可靠的, 且与硬件之间没有相互影响;
- (4) 系统各部分是不可维修的;
- (5) 系统初始工作状态是所有部件正常工作, 系统可靠度为 100%。

首先考虑单个小卫星系统的可靠性模型, 基于前面的假设, 每个小卫星由 4 个主要部分构成: 结构总线分系统、推进分系统、数传分系统和 SAR 雷达载荷分系统。显然, 这 4 个分系统中任何一个出现故障, 整个小卫星就无法正常工作, 因此小卫星系统的可靠性模型是一个串连结构, 如图 2。

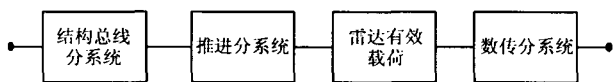


图 2 单个小卫星系统可靠性框图

假定各个分系统的寿命服从指数分布, 则

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (3)$$

整个小卫星系统的可靠度为

$$P(t) = \prod_{i=1}^4 P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^4 \lambda_i t} = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

式中 λ_t 为小卫星系统的故障率, λ_i 表示第 i 个分系统的故障率。

接着，考虑伴随的分布式小卫星系统。对于干涉测高功能来说，最少两个小卫星就可以实现功能，因此系统可工作的状态如下(小卫星数目为 6 个)：

- 状态 1 所有 6 个卫星正常工作；
- 状态 2 有 1 个卫星出现故障；
- 状态 3 有 2 个卫星出现故障；
- 状态 4 有 3 个卫星出现故障；
- 状态 5 有 4 个卫星出现故障。

图 3 给出了分布式小卫星系统可工作状态流程图，利用 Markov 模型可以建立下列系统可靠度方程：

$$\left. \begin{aligned} P_1(n+1) &= (1-6\lambda_s) \cdot P_1(n) \\ P_2(n+1) &= \lambda_s \cdot P_1(n) + (1-5\lambda_s) \cdot P_2(n) \\ P_3(n+1) &= \lambda_s \cdot P_2(n) + (1-4\lambda_s) \cdot P_3(n) \\ P_4(n+1) &= \lambda_s \cdot P_3(n) + (1-3\lambda_s) \cdot P_4(n) \\ P_5(n+1) &= \lambda_s \cdot P_4(n) + (1-2\lambda_s) \cdot P_5(n) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

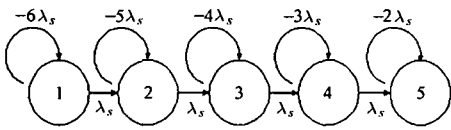


图 3 分布式小卫星系统可工作状态流程图

5 系统的效能分析

基于前面建立的能力模型和可靠性模型，系统效能定义为在整个工作寿命周期内，系统满足一定能力需求的概率。能力指标是在系统可工作的状态下得到的，不同可工作状态下，得到的能力指标不同。可靠性指标反映了系统整个寿命周期内不同可工作状态完成任务的概率。因此系统效能指标是基于能力指标和可靠性指标的综合指标。假定能力指标矢量由不同可工作状态的系统能力指标构成，用 C 表示，可靠性指标矢量用 $P(t)$ 表示，系统效能指标 $E(t)$ 可以如下确定：

$$E(t) = C \cdot P(t) \quad (6)$$

值得注意的一个问题就是系统能力指标 C 的建立，图 4 给出了小卫星数目为 6 的分布式小卫星 SAR 系统的可工作状态。可以看到，状态 3、状态 4 和状态 5 都有 3 个子状态，而且由于每个子状态发生的可能性相同，因此有

$$\left. \begin{aligned} c_3 &= (c_{31} + c_{32} + c_{33})/3 \\ c_4 &= (c_{41} + c_{42} + c_{43})/3 \\ c_5 &= (c_{51} + c_{52} + c_{53})/3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 c_i 表示第 i 个可工作状态， c_{ij} 表示第 i 个可工作状态中的第 j 个子状态。

以上分析是以小卫星数目为 6 时的情况，其他卫星数目时分析方法相同。

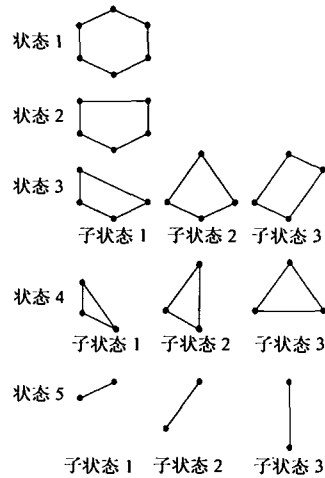


图 4 6 颗小卫星时系统可工作状态

6 仿真结果

主星的雷达参数：波长 $\lambda = 24\text{cm}$ ；带宽 $B = 60\text{MHz}$ ；脉冲重复周期 $\text{PRF} = 2000\text{Hz}$ ；脉冲宽度 $\tau_p = 35\mu\text{s}$ ；天线长度 $L = 9\text{m}$ ；天线宽度 $W = 3.5\text{m}$ ；发射功率 $P_t = 4\text{kW}$ ；天线下视角 $\theta = 35^\circ$ 。小卫星的天线长度 $l = 3.0\text{m}$ ，天线宽度 $w = 1.3\text{m}$ 。轨道参数：半长轴 $a = 6000\text{km}$ ；倾角 $i = 89^\circ$ ；离心率 $e = 0.001$ ；升交点赤经 $\Omega = 200^\circ$ ；近地点辐角 $w = 100^\circ$ 。

分布式小卫星的有关参数：主星到分布式小卫星的距离为 100km ；分布式小卫星编队构形采用“干涉车轮”，小卫星均匀分布；分布式小卫星编队轨道半短轴为 3500m ；每个小卫星的总故障率为 $0.026/\text{年}$ ；整个系统工作寿命为 10 年。地面散射系数 $\sigma = -10\text{dB}$ ；基线测量精度 $\sigma_B = 0.01\text{m}$ ；基线姿态角测量精度 $\sigma_a = 0.0003^\circ$

以小卫星数目为 6 为例，可知主星伴随分布式小卫星的可工作状态有 5 个，图 5 给出了分布式小卫星系统的可靠度变化曲线。

假定用户需求：分辨率为 $5\text{m} \times 5\text{m}$ ；测绘带宽为 50km ；测高精度为 5m 。根据能力模型，表 1 给出了不同小卫星数目情况下系统能力指标，表 2 给出了不同小卫星天线孔径大小情况下系统能力指标。通过这两个表，为了说明系统参数的选择对系统能力的影响。

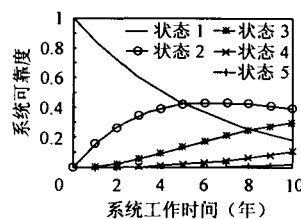


图 5 6 颗小卫星时的系统可靠度曲线

表1 不同小卫星数目情况下系统能力(小卫星天线孔径为3m)

	工作状态1	工作状态2	工作状态3	工作状态4	工作状态5
6颗小卫星	0.83	0.61	0.39	0.13	0.07
5颗小卫星	0.89	0.56	0.29	0.07	0
4颗小卫星	0.58	0.22	0.11	0	0
3颗小卫星	0.25	0	0	0	0

表2 不同小卫星天线孔径大小情况下系统能力(小卫星数目为6)

	工作状态1	工作状态2	工作状态3	工作状态4	工作状态5
2.8m 孔径	0.67	0.44	0.23	0.06	0.04
3m 孔径	0.83	0.61	0.39	0.13	0.07
3.2m 孔径	0.94	0.81	0.58	0.31	0.14
3.4m 孔径	1	0.92	0.74	0.44	0.20

图6给出了不同小卫星数目时的系统效能曲线比较图,发现增加小卫星数目,可以提高系统效能。图7给出了不同小卫星天线孔径大小时的系统效能比较图,发现增加小卫星天线孔径,可以提高系统效能。

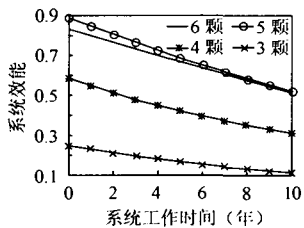


图6 比较不同小卫星数目时的系统效能

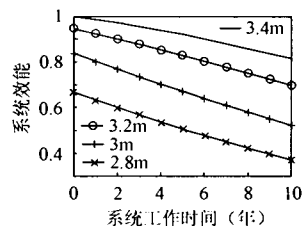


图7 比较不同小卫星天线孔径时的系统效能

7 结束语

本文主要针对系统效能分析中几个关键问题进行了研究,给出了主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能指标体系;结合分布式小卫星轨道运行特点,建立了系统能力模型;根据系统的工作状态,建立了系统可靠性 Markov 模型;基于能力模型与可靠性模型,建立了主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统效能评估模型。仿真结果证明以上模型的建立为主星带伴随分布式小卫星 SAR 系统主要参数的选取与设计提供理论依据。

参考文献

- [1] Air Force Research Laboratory—Space Vehicles Directorate, TechSat 21—Space Missions Using Satellite Clusters, <URL: <http://www.vs.af.mil/factsheets/TechSat21.html>>, June 1998.
- [2] Massonnet D. The interferometric cartwheel, a constellation of passive satellites to produce radar images that can be coherently combined, *Int J. of Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2413–2431.
- [3] Goodman N A. Processing of multiple-receiver spaceborne arrays for wide-area SAR. *IEEE Trans. on Geo. and Remote Sensing*, 2002, 40(4): 841–852.
- [4] Massonnet D. Capabilities and limitation of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geo. and Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506–520.
- [5] 金星等编著. 工程系统可靠性数值分析方法. 北京: 国防工业出版社, 2002, 第3章.

刘建平: 男, 1975年生, 博士生, 研究兴趣为分布式小卫星 SAR 系统.

梁甸农: 男, 1936年生, 博士生导师, 主要从事超宽带雷达系统理论、分布式小卫星雷达系统理论及自适应信号处理、谱估计等研究工作.