

卫星侦察信息传输业务的仿真与分析

杨海涛,赵洪利

YANG Hai-tao,ZHAO Hong-li

装备指挥技术学院,北京 101416

Academy of Equipment and Command & Technology, Beijing 101416, China

E-mail: yanghtt@yahoo.com.cn

YANG Hai-tao,ZHAO Hong-li.Simulation and analysis for transmission of satellite recon information.Computer Engineering and Applications,2007,43(30):33-36.

Abstract: The simulation and analysis for transmission of satellite recon information is mainly discussed. At first, there are three kinds of satellite recon information flow models are built, they are focus, narrow bar scan and wide bar scan. And the examples of them are given according the parameters of "Starlite" recon satellite constellation of USA. Secondly, the information capacity of the recon-sat storage without satellite transmission network is simulated and computed, which illustrates satellite transmission network is necessary. Lastly, the transmission of satellite recon information through a satellite transmission network is simulated and some primary simulation conclusions are given.

Key words: satellite recon; flow model; satellite transmission network; simulation

摘 要: 主要研究卫星侦察信息传输业务的仿真。首先建立聚束、窄条带扫描、宽条带扫描等三种模式的卫星侦察业务流量模型,并参考美国 Starlite 侦察卫星星座的指标参数进行了计算举例;其次仿真计算了无卫星传输网络时侦察卫星星载存储器的信息量状况,指出卫星传输网络的必要性;最后仿真卫星侦察信息在卫星传输网络下的传输情况,并给出初步的仿真结论。

关键词: 卫星侦察; 流量模型; 卫星传输网络; 仿真

文章编号: 1002-8331(2007)30-0033-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP393.01

1 概述

侦察卫星包括成像侦察、电子侦察、预警、监视及资源探测等多种。成像侦察卫星是军事观测卫星中发展最早、发射数目最多的一种。星上侦察装备(遥感器)主要是可见光相机、多谱段相机、合成孔径雷达(SAR)以及对地目标的定位装置。可见光相机是侦察卫星最常用的侦察装备,对地分辨率可达 0.1 m~0.3 m;多谱段相机(或成像光谱仪),可识别目标的伪装;合成孔径雷达属于微波成像装置,分辨率理论上不受高度影响,具

有全天候、全天时侦察能力,并能够侦察一定水下深度的目标,是当前星载军事观测系统发展的重点,目前美军已实现 0.3 m~1 m 的分辨率。

成像侦察业务一般分为“普查”和“详察”两种,以满足不同侦察任务的要求。“普查”卫星侦察设备视场宽,侦察范围广,但分辨率低,用于大范围内的目标搜索;“详查”卫星的侦察设备视场窄,但分辨率高,用于对已发现目标的详细侦察。目前的侦察卫星一般都兼备“普查”和“详查”的功能。美国使用的部分成像侦察卫星的主要技术参数可见表 1 的统计。

表 1 美国近期使用的成像侦察卫星技术参数

卫星类型	光学成像侦察		微波成像侦察		增强型成像系统
卫星代号	KH-11/3	KH-11/4	Lacrosse-3	Lacrosse-4	8X-1
发射时间	1995-12-05	1996-12-20	1997-10-24	2000-08-17	1999-05-22
卫星重量/t	16~19		14.5		20
轨道高度/km	280×1 000		673×674	685×690	2 689×3 132
轨道倾角/°	97.0		57.0	68.0	63.4
主要遥感器	CCD 相机、红外、多谱段相机		合成孔径雷达(SAR)		CCD 相机
地面分辨率/m	0.1		0.3~1.0		
地面覆盖/km	16×16		扫面、窄波束		50×50
数传速率/Mb/s	300~650		约 650		
卫星寿命/年	8		5~8		>5

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(the National High-Tech Research and Development Plan of China under Grant No.2006AA701428)。

作者简介:杨海涛(1979-),男,博士研究生,主要研究方向为通信与信息系统;赵洪利(1964-),男,博士生导师,主要领域通信与信息系统、空间信息系统等。

2 卫星成像侦察信息流量模型

空间信息系统中,卫星成像侦察业务由低轨成像侦察卫星采集数据生成流量,通过传输网络或直接传回地面。在模型中,主要考虑了“聚束模式”和“条带模式”的侦察业务流量,然后根据美国的 Starlite 侦察卫星星座的一些数据给出一些计算实例,为仿真设定提供依据。

2.1 聚束模式

聚束模式,主要是指单颗侦察卫星针对某一指定目标进行的高分辨率的重点侦察。设侦察卫星的分辨率为 r m,侦察地面半径为 R m,对目标的覆盖时间为 T s,拍摄速率为 p 帧/s,每像素用 24 bit 描述,则单星数据量 q bit 为:

$$q = \pi R^2 / r^2 \cdot 24 \cdot p \cdot T = \frac{24\pi R^2}{r^2} p T \quad (\text{bit})$$

设星上存储器为 M bit,则要保证这些数据不丢失,要求星际链路的传输速度 f bit/s 至少为:

$$f_{\min} = \frac{q-M}{T} = \frac{24\pi R^2}{r^2} p - \frac{M}{T} \quad (\text{bit/s}) \quad (q > M)$$

当 $q \leq M$ 时, $f_{\min} = 0$ 。

设卫星星座为 Walker Delta 星座,每轨道有 n 颗卫星,地球半径为 R_0 m,则单轨道多星连续侦察业务量 F 可这样计算。

如图 1 所示,其中, O 是地心, β 是侦察目标的对应的地球圆心角,其弧长为 $2\pi R$; $2\pi/n$ 是两颗侦察卫星星下点之间的地球圆心角。由图可求得 β 为:

$$\beta = \frac{2\pi R}{R_0} \quad (\text{rad})$$

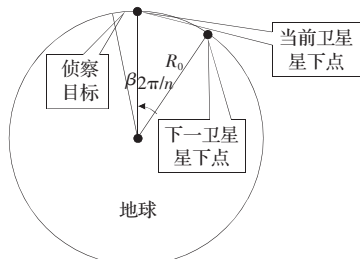


图 1 多星“聚束模式”侦察示意图

则下一卫星运行到侦察目标处需要的时间 t 为:

$$t = \frac{2\pi/n}{\beta/T} = \frac{2\pi/n}{2R/R_0 T} = \frac{\pi R_0}{nR} T \quad (\text{s})$$

由于产生的业务数据量不变,因此可求得整个轨道面对目标侦察的业务流量 F bit/s 最低 ($q > M$) 为:

$$F_{\min} = \frac{\frac{24\pi R^2}{r^2} p T - M}{t} = \frac{\frac{24\pi R^2}{r^2} p T - M}{\frac{\pi R_0}{nR} T} = \frac{24nR^3}{r^2 R_0} p - \frac{nRM}{\pi R_0 T} \quad (\text{bit/s})$$

同样,当 $q \leq M$ 时, $F_{\min} = 0$ 。

另外,由上述过程可知,单星侦察的最大业务流量为

$$f_{\max} = \frac{q}{T} = \frac{24\pi R^2}{r^2} p \quad (\text{bit/s})$$

全轨道面的最大业务流量为:

$$F_{\max} = \frac{q}{t} = \frac{24nR^3}{r^2 R_0} p \quad (\text{bit/s})$$

由以上两个公式可知:仅当 $R = \frac{\pi R_0}{n}$ 时, f 和 F 才相等,此时侦察卫星可实现全球无缝覆盖和实时侦察,此时全星座的最

大业务流量也应为 $\frac{24\pi R^2}{r^2} p$ 。但目前各国的侦察卫星还很难达

到这一点。即使未来美国计划构建的成像侦察卫星星座——Starlite,也不可能实现对全球的无缝覆盖和实时侦察。

2.2 条带扫描模式

条带扫描模式,主要是指侦察卫星针对某一区域的沿条带进行的较高分辨率侦察。设条带宽度为 W ,卫星距地心高度 H m,其他假设同前面的聚束模式,下面计算一下单星的条带模式侦察业务量。

则卫星的轨道周期^[1]为: $2\pi H \sqrt{\frac{H}{\mu}}$,其中 μ 为地球引力常数,取 $398\ 601.2 \text{ km}^3/\text{s}^2$ 。进而得卫星 T 时间内扫过的面积 $S \text{ m}^2$ 为:

$$S = W \cdot \left(\frac{T \cdot 2\pi}{2\pi H \sqrt{\frac{H}{\mu}}} \cdot R_0 \right) = \frac{WR_0 T}{H} \sqrt{\frac{\mu}{H}} \quad (\text{m}^2)$$

单星数据量 q (bit) 为:

$$q = S/r^2 \cdot 24 \cdot p \cdot T = \frac{24WR_0 T^2}{r^2 H} \sqrt{\frac{\mu}{H}} p = \frac{24WR_0 T}{r^2 H} \sqrt{\frac{\mu}{H}} k \quad (\text{bit})$$

其中, $k = pT$ 为 T 时间拍摄照片的数量。

设星上存储器为 M bit,则要保证这些数据不丢失,要求星际链路的传输速度 f bit/s 至少为:

$$f_{\min} = \frac{q-M}{T} = \frac{24WR_0}{r^2 H} \sqrt{\frac{\mu}{H}} k - \frac{M}{T} \quad (\text{bit/s}) \quad (q > M)$$

当 $q \leq M$ 时, $f_{\min} = 0$ 。

而最大业务流量为:

$$f_{\max} = \frac{q}{T} = \frac{24WR_0}{r^2 H} \sqrt{\frac{\mu}{H}} k \quad (\text{bit/s})$$

2.3 计算举例

Starlite 是美国为适应 21 世纪的情报要求而计划组建的,目前设计采用 24 颗工作星和 3 颗备份星,轨道高度为 767 km,可以每 15 min 提供一幅图像,如果星座扩大 37 颗,重访时间缩短为 8 min;如果为 48 颗,重访时间为 5 min。Starlite 对地成像侦察主要有 3 种模式:聚束模式、窄条带扫描模式和宽条带扫描模式。每颗卫星在选用“聚束模式”工作时,将以 0.3 m 分辨率侦察 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ 的区域;以“窄条带扫描模式”工作时,将以 1 m 的分辨率和 10 km 宽的一个窄条,进行扫描;在选用“宽条带扫描模式”工作时,将以 2.7 m 的分辨率进行扫描。下面利用前面推导的公式分别计算类似这 3 种模式的侦察业务的流量范围。

2.3.1 聚束模式

设侦察范围为半径 4 km 的一个圆目标范围,分辨率为 0.3 m,拍摄速率为 2 帧/min。把 $R=5\ 000 \text{ m}$, $r=0.3 \text{ m}$, $p=1/30 \text{ 帧/s}$ 带入单星侦察最大流量公式,可得侦察业务流量最大为:

$$f_{\max} = \frac{24\pi R^2}{r^2} p = \frac{24\pi \times 4\ 000^2}{0.3^2} \times \frac{1}{30} = 446.8 \quad (\text{Mb/s})$$

2.3.2 窄条带扫描模式

设条带宽度 $W=10 \text{ km}$,分辨率 $r=1 \text{ m}$,共拍摄了 100 帧照片,即 $k=100$,地球半径 $R_0=6\ 378 \text{ km}$ 。设卫星高度为 700 km,则 $H=6\ 378+700=7\ 078 \text{ km}$ 。

$$f_{\max} = \frac{24WR_0}{r^2 H} \sqrt{\frac{\mu}{H}} k =$$

$$\frac{24 \times 10 \times 6\ 378 \times 1\ 000 \times 100}{1^2} \sqrt{\frac{398\ 601.2}{7\ 078^3}} = 162.3 \quad (\text{Mb/s})$$

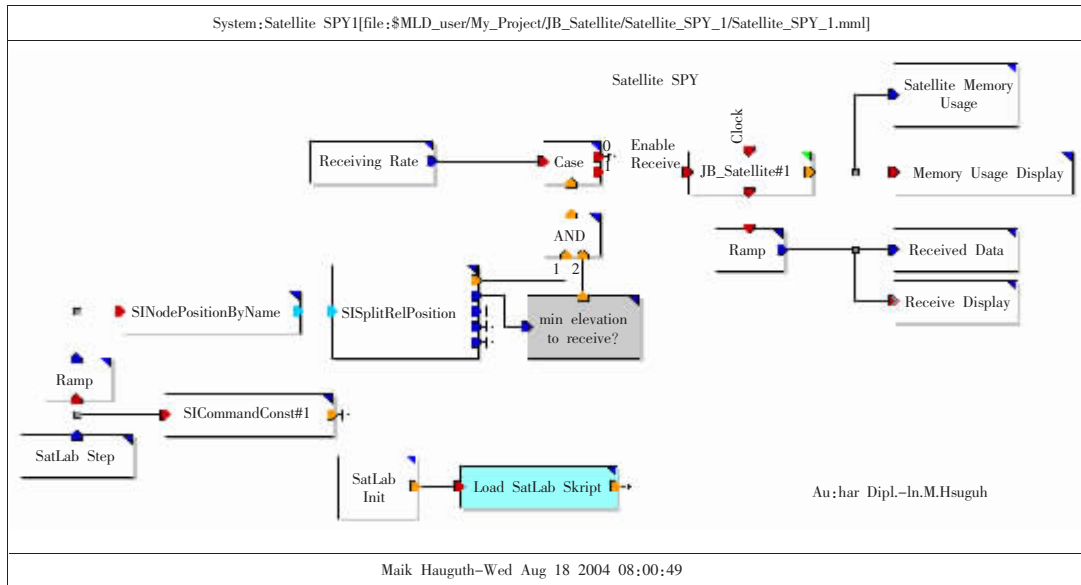


图2 成像侦察仿真系统设计

2.3.3 宽条带扫描模式

设条带宽度 $W=50$ km,分辨率 $r=2.7$ m,共拍摄了 200 帧照片,即 $k=200$,其它设置同窄条带模式。

$$f_{max} = \frac{24WR_0}{r^2H} \sqrt{\frac{\mu}{H}} k = \frac{24 \times 50 \times 6378 \times 1000 \times 200}{2.7^2} \sqrt{\frac{398601.2}{7078^3}} = 222.6 \text{ (Mb/s)}$$

由上面的计算可看出,如果能够完全实现全部 3 种工作模式,则链路的比特率一般要达到 500 Mb/s~600 Mb/s,这也是目前世界最先进的侦察卫星的发送比特率,见表 2。

表2 3种侦察模式业务统计

侦察模式	聚束模式	窄条带扫描模式	宽条带扫描模式
持续时间/s	90.0	300.0	600.0
最大业务流量/(Mb/s)	446.8	162.3	222.6

3 成像侦察业务仿真与分析

成像侦察业务的仿真采用 MLDesigner^[2,3]和 NS2^[4]配合进行。其中,MLDesigner 主要仿真分析星载存储器的容量特性;NS2 主要仿真分析成像侦察业务的网络传输特性。首先分析侦察卫星在不通过中轨网络,只通过其星地链路传输数据时,星载存储器的容量限制,以此说明采用中轨传输网络的必要性。其次分析利用卫星组网传输成像侦察业务的传输性能。

3.1 星载存储器的队列长度分析

本节主要分析侦察卫星的星载存储器的队列长度及容量问题。仿真中,设侦察卫星为陆地星(即仅拍摄陆地信息),成像数据排队存储于星载存储器,看到地面接收站时传送数据。

中轨卫星星座的设置如表 3, 侦察卫星采用太阳同步轨道,轨道高度和倾角采用表中 LEO 的参数,地面站为北京。仿真的业务为表 2 的聚束模式,设拍照速率为 30 秒 1 帧,下传速率为每 21.5 秒 1 帧。以每帧 $24 \times \pi \times 4000^2 \times 0.3^2 = 13.4041$ (Gbit) 计,折合传输速率为 623.446 5 Mb/s。

仿真采用 MLDesigner 软件完成。仿真方案设计思想如下:采用 3 种约束机制,即陆地信息和太阳同步信息的可见性信息、仰角信息,共同作为成像数据的产生门限,一旦满足即发送

表3 仿真卫星轨道参数设置

轨道类型	MEO(Walker Delta)	LEO
高度/km	11 946	700
倾角/°	45	98.2
周期/s	24 685.75	5 926.38
卫星数量	12	3
轨道数量	4	1
相位因子(360/12)	1	-
轨道面内星际链路	2	0
轨道面间星际链路	2	0
MEO/LEO 间星际链路	多条	2
地面最小仰角/°	10	8

数据,同时显示星载存储器的数据量变化(图 3)及地面站接收的数据变化(图 4)。仿真中,地面站对卫星的可视仰角为 5°,星地链路的传输速率为每秒 1 帧,仿真时间为 86 400 s。系统设计如图 2 所示。

图 3 和图 4 中,横坐标为仿真时间,单位为 s,纵坐标为信息量,单位是帧。由图 3,星载存储器的最大队列长度为 1 703 帧,以每帧 $24 \times \pi \times 4000^2 \times 0.3^2 = 13.4041$ Gbit(聚束侦察模式)计,1 703 帧的总数据量将达 22 827.18 23 Gbit,从而要求星载存储器的容量达到 23 Tbit 左右,虽然目前的技术水平可以满足的这一要求,但由图 4,接收数据量为 147 帧,因此要把一天拍摄的数据全部传输完,需要 11.6 天。不难想象,如果不采用其他传输手段或高效压缩算法,只能关闭侦察卫星来等待数据传输;地面站要实现实时地获取侦察图像是不可能的。这在军事行动中是不可接受的,因此,卫星传输网络就显得非常必要了。

3.2 成像侦察业务的网络传输性能分析

下面使用 NS2 仿真卫星侦察信息在卫星传输网络中的传输,并使用 awk 和 gnuplot^[5]工具分析业务的流量特性。

3.2.1 单业务传输

首先,仿真表 2 中 3 种侦察模式单独传输时的网络状况。仿真中,中轨卫星间星际链路的带宽设为 1 250 Mb/s,所有的星地链路以及中、低轨卫星间的星际链路带宽均设为 625 Mb/s。根据仿真理论的比例相似原则,采用 50:1 的比例进行仿真,仿

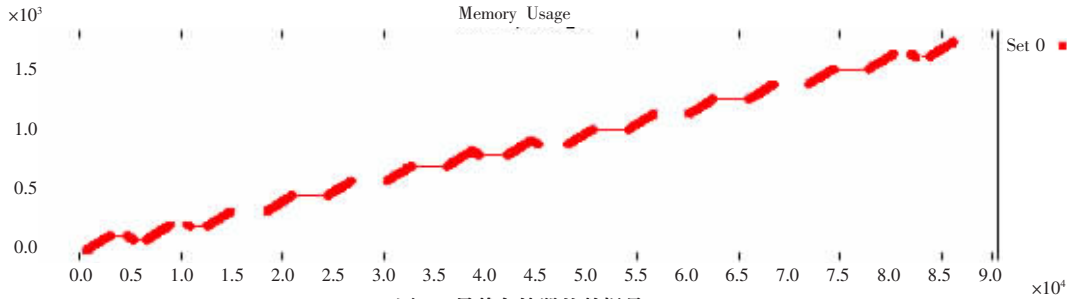


图3 星载存储器的数据量

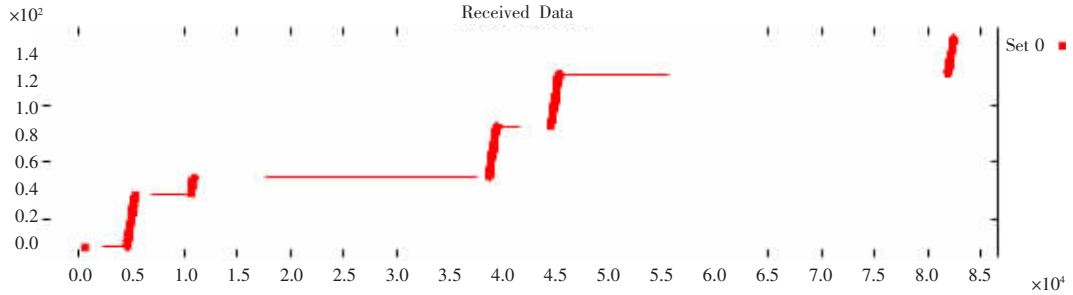


图4 地面站接收的数据量

真带宽设置如表4。由LEO1依次发送90 s、300 s、600 s的3种业务。

表4 卫星链路带宽设置

中轨卫星		低轨卫星	
中轨与低轨卫星间链路	中轨卫星地链路	中轨卫星地链路	低轨卫星地链路
25	12.5	12.5	12.5

仿真的结果如表5所示。从分析结果看,由于网络带宽设置相对宽裕,因此在传输一颗卫星的一种业务时不存在丢包现象,且各项指标均较为合理,这说明网络负载能力设计可满足这3种业务需求。

表5 3种模式业务单独仿真的分析结果

统计类型	业务类型		
	聚束模式	窄条带扫描模式	宽条带扫描模式
最大吞吐量/(Mb/s)	8.915 022	3.243 743	4.450 462
平均吞吐量/(Mb/s)	8.915 020	3.243 743	4.450 462
丢包率	0	0	0
平均延迟/ms	214.000 7	214.176 1	203.308 1
延迟抖动/ms	0.233 4	0.787 3	18.936 0
最大队列长度	1	1	1
最大跳数	4	4	4
平均跳数	4	4	4

3.2.2 多业务联合传输

其次,保持以上设置,仿真分析多个业务同时传输时的卫星传输网络负载能力。共进行了两次仿真:一是3种业务同时传输30 s(仿真结果如表6);二是3个聚束模式侦察业务同时传输30 s(仿真结果如表8)。

表6 3种业务联合负载仿真的分析结果

最大吞吐量/(Mb/s)	13.140 091	丢包率	0
平均吞吐量/(Mb/s)	12.411 087	最大队列长度	4 051
平均延迟/ms	5 226.711 3	最大跳数	4
延迟抖动/ms	2 565.839 1	平均跳数	3.269 5

由表6可见,在总的业务量8.936+3.246+4.452=16.634 Mb/s

的情况下,虽然网络最大吞吐量达到了13.140 Mb/s,但平均吞吐量是12.411 Mb/s,因此并没有出现丢包现象。图5是吞吐量的变化图,由图可见,联合业务的吞吐量的变化比较平稳。因此,从业务承载能力上讲,带宽的设置是合理的。

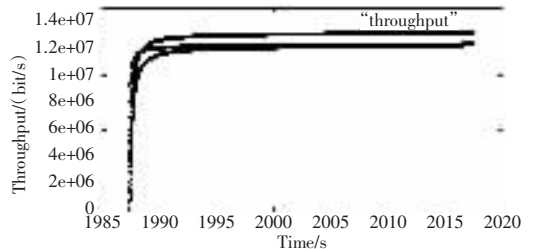


图5 联合业务的吞吐量变化

比较表5和表6,可以看出,随着业务量的增大和分散,网络的延迟性能明显下降,从单业务的200多毫秒猛增到5 200多毫秒,而抖动性能也大幅下降,从最大十几毫秒增至2 566毫秒,增大了2个数量级,这说明网络性能的下降。但对于数据业务传输来说,这种延迟还是可以接受的。

另外,表6的队列长度剧增,从1变为4 051,这说明报文主要时间延迟都消耗在排队上,这是延迟性能下降的主要原因。在队列管理上,仿真时采用Droptail协议,默认每个报文的优先级是一样的,因此报文在排队时存在着激烈的竞争,这是延迟抖动大幅升高的原因。同时还可看出,对于4 051长的队列需要存储容量为4 051×8×3 000=97.224 Mbit,远远小于不采用星际链路时侦察卫星的星载存储器容量要求,这体现了星际链路的优势。

最后,看一下路由信息。表7是分别对3种业务的个别指标的分析结果。从路由跳数上可以看出:每个业务的路由在整个仿真过程中是不变的。虽然仿真时间较短,但从队列长度的角度看,由于路由算法没考虑业务量,缺乏负载均衡机制,每个数据报文均采用同一路由,致使某几个节点的负载过大,队列长度猛增(节点1)。从网络结构方面看,网络拓扑简单仅用12

(下转70页)