

太阳观测卫星的数传天线波束及其指向设计*

曾麒麟^{1,2}, 于锡峥¹, 熊蔚明¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对三轴稳定对日指向姿态的太阳同步轨道卫星, 提出为获得最大对地数据传输时间的天线波束设计及布局方案。根据某型太阳观测卫星的轨道姿态设计方案, 建立数传天线对指定地面站的天线波束指向仿真模型; 使用卫星工具包 STK 仿真软件, 分析不同波束角方案及其可能的指向对数传时间的影响, 发现了对日指向卫星与对地指向卫星在数传时间上的不同规律, 找到最优的天线波束布局来获得最大的数传时间; 根据星载数传能力与不同天线波束宽度之间的关系, 获得传输数据的最佳天线波束宽度, 为这类卫星数传天线的波束设计及其布局提供设计依据。

关键词:太阳观测卫星; 三轴稳定对日指向姿态; 太阳同步轨道; 定向波束天线; 卫星天线布局; STK 仿真软件

中图分类号: TN919; TN917 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2019)06-135-08

Design of data transmission antenna beam angles and directions for solar observatory satellite

ZENG Qilin^{1,2}, YU Xizheng¹, XIONG Weiming¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The design of the antenna beam angle and the installation layout of sun-synchronous orbit satellites with the three-axis stabilized sun oriented attitude were put forward. And the antenna beam design and its layout scheme for obtaining the maximum data transmission time to the ground station were proposed. According to the orbit design scheme of the scientific observation satellite, a data transmission antenna pointing to specified ground station antenna beam-pointing simulation model was established. By using the satellite toolkit STK simulation software, the effect of various antenna beam angle schemes and the antenna installation orientation on the data transmission time were simulated and analyzed, the different regularities about the time of data transmission for the satellites of pointing to solar and earth station were discovered. According to the relationship between the satellite-borne data transmission capability and the different antenna beam width, the optimal antenna beam width for data transmission was obtained, which provides a design basis for the beam design and installation of this kind of satellite.

Keywords: solar observation satellites; three-axis stability sun oriented attitude; sun-synchronous orbit; directional beam antenna; satellite antenna installation layout; STK simulation software

三轴稳定对地指向卫星只需将天线安装在其对地面, 在卫星通过地面站上空时, 天线波束就一定能够覆盖地面站。三轴稳定对日指向姿态的太阳观测卫星在卫星通过地面站上空时, 固定安装在星体某个面上的天线波束不一定能够覆盖地面站, 而且也不可能改变卫星的姿态去控制定向天线波束来跟踪地面站, 这就给数传天线的波束设计及布局提出了难题。

太阳观测卫星的科学探测数据量巨大, 卫星对地数据传输能力与数传时间及数传码率密切相

关^[1]; 星地链路的传输性能决定着星载科学数据能否完整下传至地面站, 数据传输速率决定星地链路发射功率; 在数传码率受到发射功率及信道带宽限制的条件下如何提高数传时间就成为系统任务实现的关键。

本文主要研究在太阳同步轨道上、三轴稳定对日指向姿态的卫星^[2]如何获得最大对地数据传输时间的天线波束设计及布局方案。介绍了卫星的轨道姿态方案、地面站的约束条件及接力通信方式、天线安装在星上俯仰角及方位角的定义;

* 收稿日期: 2018-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11672293)

作者简介: 曾麒麟(1988—), 男, 湖南祁东人, 博士研究生, E-mail: zq19880626@163.com;

熊蔚明(通信作者), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: xwm@nssc.ac.cn

采用 STK 软件^[3-5] 仿真了不同形式波束角结合不同天线布局位置的数传时间;结合星载数传能力与不同锥形天线波束宽度的关系,获得了传输数据的最佳天线波束宽度。找出三轴稳定对日指向卫星与三轴稳定对地指向卫星在数传天线设计要求上的不同,为这类卫星数传天线的波束设计及布局提供设计依据。

1 建立卫星数传时间的仿真计算模型

为了确保太阳观测卫星的有效载荷在轨期间保持指向太阳,太阳观测卫星姿态指向与对地定向卫星^[6] (Y 轴平行于轨道面法向量, Z 轴指向地心, X 轴由右手法则确定)有明显的不同。

1.1 卫星姿态及天线指向定义

卫星对地面站的数传时间就是固定安装在星体上的天线波束覆盖地面站的时间。为了描述天线波束指向地面站,需要将地面坐标系转换到 J2000 坐标系下^[2,6],然后再转换到卫星本体坐标系下,即获得卫星本体坐标系下的地面站坐标。假定数传天线安装在卫星的质心并固联在卫星上,即天线指向坐标系与卫星本体坐标系重合,这样就可以在同一个坐标系下描述天线的波束指向向量。

1.1.1 卫星姿态定义

为确保载荷开展对太阳的连续观测,如图 1 所示, $O'X'Y'$ 为黄道面。建立卫星本体坐标系:原点 O 位于卫星质心, X 轴由卫星质心指向太阳中心, Z 轴平行于黄南极且指向与黄南极相同(与黄北极相反), Y 轴由右手法则确定。这样在卫星沿着轨道运行期间能够保持星体相对太阳三轴稳定的指向,满足载荷的探测平面相对于太阳不发生旋转。

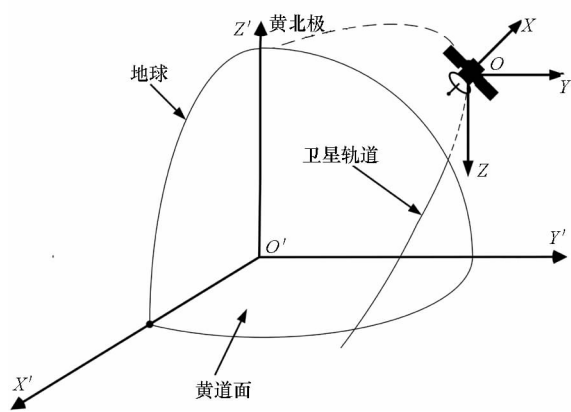


图 1 卫星指向示意图

Fig. 1 Satellite pointing diagram

1.1.2 天线在星体上的指向定义

天线固联在星体质心上,其波束指向由图 2

中的方位角及俯仰角来表示: X 、 Y 及 Z 为卫星的本体坐标轴, B 为天线波束指向,粗黑线为其在 OXY 平面上的投影线,投影线与 $+X$ 轴构成方位角 A ,沿着 Z 轴逆时针方向为正,与 X 轴重合时为 0° ,方位角范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$;投影线与 B 构成俯仰角 E ,当 B 与 Z 夹角小于等于 90° 时定义为正,否则为负,俯仰角范围为 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 。

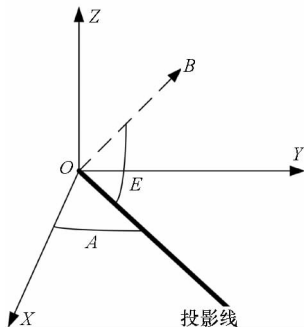


图 2 方位角及俯仰角的定义

Fig. 2 Definition of azimuth and pitch angle

后续仿真结果的柱状图下方的数字,0 - 90 表示方位角为 0° 、俯仰角为 90° ,这时天线波束指向恰好在 $+Z$ 轴上;30 - 80 表示天线波束指向投影线与 $+X$ 轴的夹角为 30° ,与投影线之间的夹角为 80° 。

1.2 卫星轨道初值及地面站约束

1.2.1 卫星轨道初值

借助 STK 软件轨道建模及数值计算的功能,实现卫星数传时间的仿真计算模型。仿真分析采用的历元时刻为 2020 年 1 月 1 日 00:00:00。卫星轨道外推使用 J2Perturbation,仿真起止时间从 2020 - 01 - 01T 00:00:00.000 (UTCG) 到 2021 - 01 - 01T 00:00:00.000 (UTCG),仿真周期为 1 a。仿真结果给出天线波束每天覆盖地面站的平均时间。卫星轨道参数如表 1 所示。

表 1 卫星轨道参数

Tab. 1 Satellite orbital elements

参数	数值	备注
半长轴	7098.14 km	高度:720 km
偏心率	0	
轨道倾角	98.274 6°	
近地点幅角	0°	
升交点赤经	降交点地方时	
	06:00	
真近点角	0°	

1.2.2 地面站约束

参与接收卫星数据的地面站为:三亚站、密云

站、喀什站。地面站地址及接收天线起始仰角如表2所示。

表2 地面站的约束条件
Tab.2 Ground station constraints

地面站	接收天线起始仰角	经度	纬度
喀什	5	75.929	39.505
密云	5	116.860	40.451
三亚	10	109.310	18.313

由站址的纬度可知,地面站均在北半球。由1.1.1节卫星的本体系定义可知,卫星本体Z轴一直与黄南极平行且指向相同。所以,当天线波束指向卫星本体的+Z轴时,应该能获得较长的数传时间。

采用卫星与多个地面站接力通信模式,接力通信模式如图3所示。在同一轨道中,卫星能够覆盖两个或者多个地面站时,允许对先覆盖的地面站通信,通信完毕后再对另一个地面站通信(与上一个站的重叠区域不再通信)。考虑到地面站的操控工作量,拟略去3min以内的过境弧段。

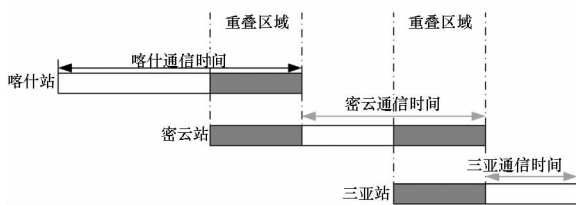


图3 接力通信模式示意图

Fig.3 Relay communication mode diagram

1.3 需要传输的科学观测数据量

星上有效载荷每天产生的科学数据量为165 GB,数传链路能够实现的对地传输数据率为450 Mbit/s,则每天至少需要数传时间为49 min。

2 基于不同锥形波束角的数传时间分析

本节首先计算了不同锥形波束角(±90°, ±80°, ±70°, ±60°, ±50°, ±40°, ±30°)安装在+Z轴的数传时间,结果见图4;得出了数传时间增长幅度与天线波束角逐步增大的关系,结果见图5;另外,计算了波束角(±70°, ±50°, ±30°)安装在-Z轴的数传时间,结果见图6。

通过图4的仿真数据可以得出:随着天线波束角的减小,所得的数传时间越来越短。虽然卫星与地面站可见时间达到93.7 min/d(即相当于

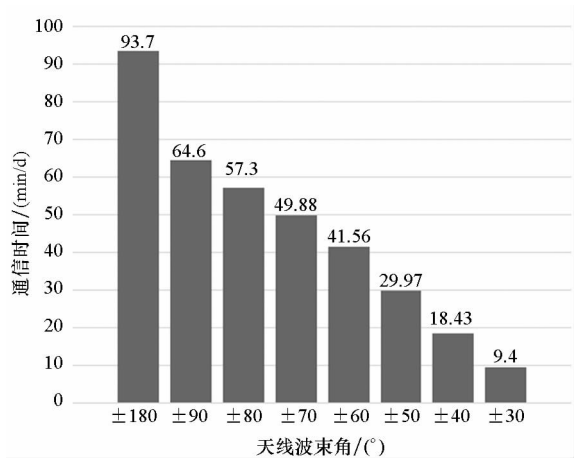


图4 不同波束角天线安装在卫星+Z轴站方向对应的数传时间

Fig.4 Data transmission time of different beam angle antennas installed in the satellite +Z direction

天线波束角为360°时),但是当天线锥形波束角为±70°时,数传时间减为约50 min/d;当波束角为±30°,数传时间仅为9.4 min/d。

从图5中可以看出:天线波束角越大,数传时间增长幅度就越小;波束角为±70°时,再增大天线的波束角,数传时间的增长幅度也变化不大。

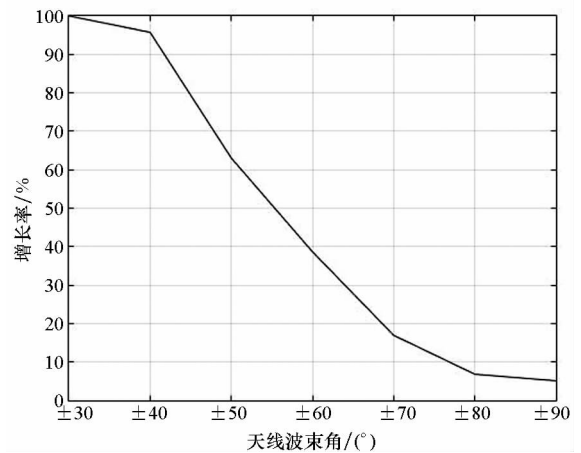


图5 数传时间增长幅度与波束角之间的关系

Fig.5 Relationship between the amplitude of data transmission and antenna beam angle

从图6中可以看出:当波束角为±30°时,实际数传时间甚至为零,相当于无法与地面站建立通信连接。

对比图4与图6可以看出:当天线安装在卫星+Z轴时,与北半球的地面站数传时间长;当天线安装在卫星-Z轴时,与北半球的地面站数传时间短。这也验证了1.2.2节中对天线指向的初步分析。

通过图4仿真的数据,得出在锥形波束角为±70°时数传时间约为50 min/d,与1.3节中需要

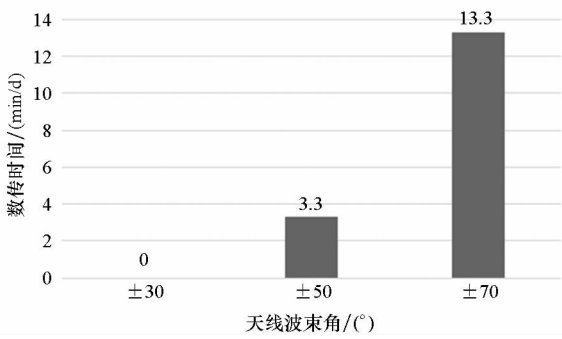


图 6 不同波束角天线安装在卫星 - Z 轴方向对应的数传时间

Fig. 6 Data transmission time of different beam angle antennas installed in the satellite - Z direction

的数传时间 49 min/d 匹配。所以,后续工作集中在寻找锥形波束角为 ±70° 天线的最佳安装方位上。

3 ±70°锥形波束角天线安装在 + Z 轴附近的数传时间分析

本节仿真分析 ±70° 的锥形波束角天线安装在卫星 + Z 轴不同方位角、俯仰角(后文用“方位角俯仰角”表示)对应的数传时间。

天线不同的安装方向对应的数传时间如图 7 所示。从图 7 可以看出:最大数传时间出现在

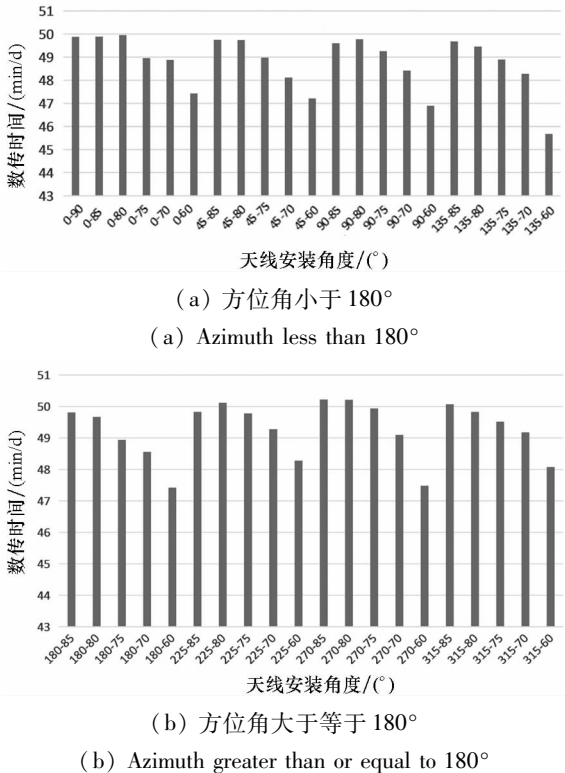


图 7 天线不同的安装方向对应的数传时间

Fig. 7 Antenna different installation modes correspond to communication time

270° - 85° 安装方向,为 50.22 min/d,此时过境地面站平均时间为 346 s/次(8.71 次/d)。最小数传时间出现在 135° - 60° 安装方向,为 45.68 min/d,此时过境地面站平均时间为 350 s/次(7.83 次/d)。数传时间为 45 ~ 49 min/d 主要集中在俯仰角安装为 60° ~ 80° 时;数传时间为 49 ~ 51 min/d 主要集中在俯仰角安装为 80° ~ 90° 时;天线安装的俯仰角越小,数传时间越短;当俯仰角一定时,方位角的变化对数传时间影响较小。

4 不同锥形波束角大小的天线安装在 + Z 轴附近的数传时间分析

为了找出天线安装在 + Z 轴方向附近的规律,计算了不同锥形波束角分别在星体的方位角 0° ~ 360°、俯仰角 50° ~ 90° 变化时的数传时间。

图 8 主要给出了不同锥形波束角、不同安装方向与数传时间的关系,为了能够清晰展示数据,对数据做四舍五入处理。仿真结果表明:数传时间与波束角的大小相关;波束角越大,数传时间越长。当定向天线安装在卫星 + Z 轴或者与 + Z 轴附近方向时,天线的最大及最小数传时间见表 3。表 3 中,找出了卫星数传时间的最大及最小值,并对其作差,发现天线波束角越小,其差值相对较大。

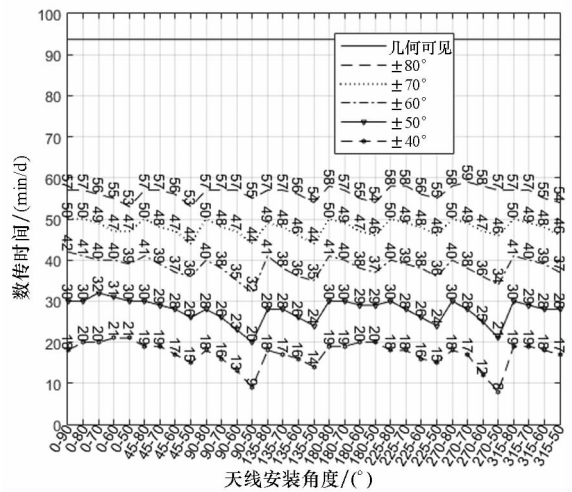


图 8 不同波束角天线安装在卫星 + Z 轴不同方向对应的数传时间

Fig. 8 Data transmission time of different beam angle antennas installed in the satellite + Z different direction

表 4 给出了不同天线波束角与地面站通信时对应的最大数传时间的安装方向、最大数传时间及此时每次过境地面站的平均时间。

表 3 不同波束角天线对应的最大及最小数传时间

Tab.3 The maximum and minimum data transmission time for different beam angle antennas

锥形天线 波束角度/ (°)	最大数传 时间/ (min/d)	最小数传 时间/ (min/d)	最大与最小数 传时间差值/ (min/d)
卫星与地面 站可见	93.7	93.7	0
±80	59.1	53.3	5.8
±70	50.2	44	6.2
±60	41.6	31.9	9.7
±50	31.7	19.7	12
±40	21.3	7.8	13.5

表 4 不同波束角天线对应的最大数传时间、
安装方向及平均时间

Tab.4 The maximum transmission time, installation direction and average time of different beam angle antennas

天线波束 角/(°)	最大数传 时间的 安装方向/ (°)	最大数传 时间/ (min/d)	平均时间/ (s/次)
±80	270 - 70	59.1	396
±70	270 - 85	50.22	346
±60	0 - 90	41.6	306
±50	0 - 70	31.7	296
±40	0 - 60	21.3	272.19

通过图 8、表 3 及表 4 可以得出:天线波束角越小,天线在卫星上的安装方向对数传时间影响越大;天线的波束角越大,安装的方位角对数传时间影响很小;天线波束角的宽度决定了数传时间的长短;波束角越小,数传时间越短,数传时间波动越大。

5 基于矩形波束角的天线,安装在 +Z 轴附近方向的数传时间分析

本节为更详细地分析 ±70°锥形天线的数传时间,采用矩形(长方形和正方形)波束角天线,保持矩形天线增益与锥形波束角为 ±70°的锥形天线增益相等,对安装在卫星不同位置对应的数传时间进行分析。将矩形(长方形与正方形)波束天线与锥形 ±70°波束角天线进行数传时间对比。

5.1 计算天线等效矩形波束角

为保持天线增益不变,要求矩形波束等效辐射面积与 ±70°的锥形波束面积相等,采用与安装点 1 m 的距离计算等效面积,如图 9 所示,保持图 9(a)中的圆面、图 9(b)中的长方形面及图 9(c)中的正方形面的面积相等。这样,等效长方形波束角为(±80.43°, ±45°),等效正方形波束角为(±67.67°, ±67.67°)。

当安装方向为 0°~90°时,长方形波束角天线(图 9(b))的短轴(对应图中 45°的边)与卫星 X 轴平行,长轴(对应角度 80.43°的边)与卫星 Y 轴平行,波束指向与卫星 +Z 轴重合。当安装方向为 0°~90°,正方形波束角的天线(图 9(c))边长分别平行于卫星的 X、Y 两轴,波束指向与卫星 +Z 轴重合。

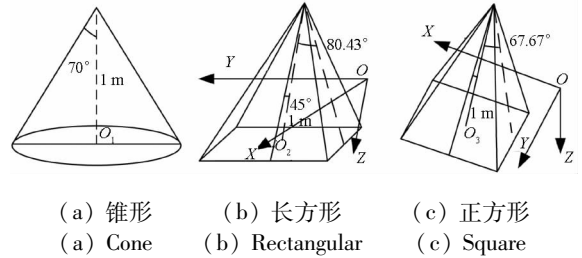
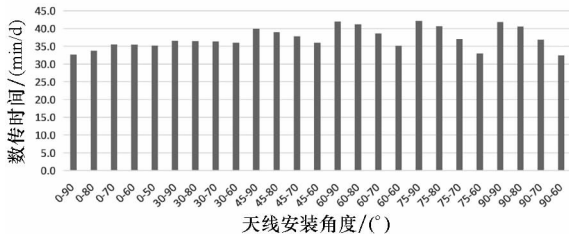


图 9 ±70°锥形波束角天线与矩形波束角天线
Fig.9 Tapered ±70° beam angle antenna and radiation shaped rectangular antenna

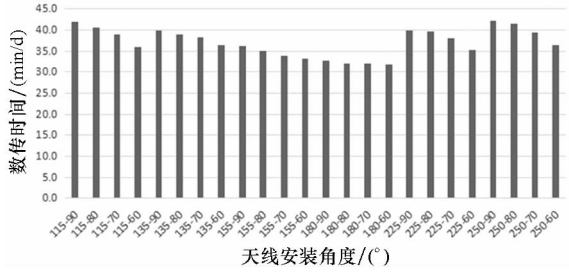
5.2 长方形波束角天线获得的数传时间

长方形的波束角天线在 +Z 轴附近不同安装方向的数传时间仿真结果如图 10 所示。图 10 中,高度角 $V = 80.43^\circ$,水平角 $H = 45^\circ$ 。从图 10 的仿真数据可以看出:最大数传时间出现在 $250^\circ - 90^\circ$ 安装方向,为 42.2 min/d,此时过境地面站平均时间为 293.147 s/次(8.64 次/d),这个数值相对于 ±70°的锥形波束角天线,数传时间减少了约 19%;最小数传时间出现在 $180^\circ - 60^\circ$ 安装方向,为 31.8 min/d,此时过境地面站平均时间为 334 s/次(5.7 次/d)。通过图 10 的仿真数据可以得出:数传时间为 31~35 min/d 时,天线的长边与卫星 Y 轴平行;数传时间为 35~42 min/d 时,天线的长边与卫星 Y 轴成一定夹角;天线安装的俯仰角一定时,天线的长边与卫星 Y 轴成一定的夹角时,数传时间增大。当天线的方位角一致时,俯仰角安装越小,每天获得的数传时间越短;当天线的俯仰角一致时,天线的长边与 Y 轴平行时,数传时间明显减少;天线安装的方位角和俯仰角同时决定卫星数传时间的长短。



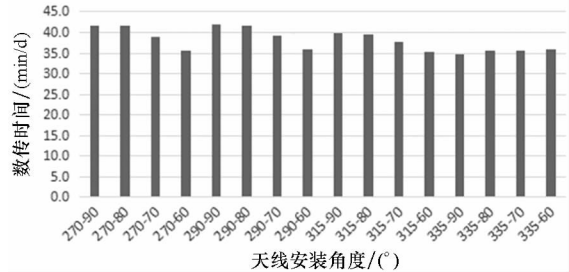
(a) 方位角小于等于 90°

(a) Azimuth less than or equal to 90°



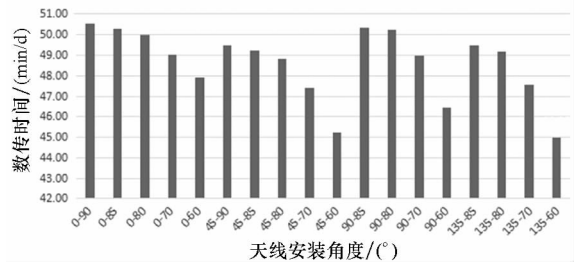
(b) 方位角大于 90° 小于 270°

(b) Azimuth greater than 90° and less than 270°



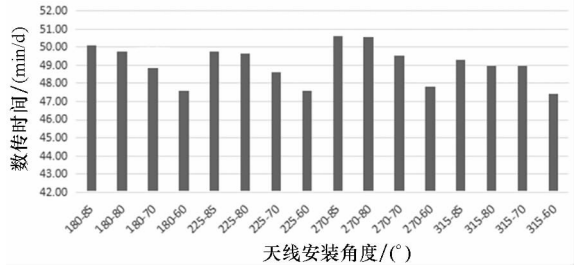
(c) 方位角大于等于 270°

(c) Azimuth greater than or equal to 270°



(a) 方位角小于 180°

(a) Azimuth less than 180°



(b) 方位角大于等于 180°

(b) Azimuth greater than or equal to 180°

图 11 正方形波束角天线不同安装方向对应的数传时间
Fig. 11 Data transmission time corresponding to different antenna installation methods

速率来确定合适的发射功率,首先要分析如何根据额定的数据传输速率来确定合理的发射功率,进而有效利用链路资源使数据传输性能最佳化。本节仅仅采用不同波束角的锥形波束角天线对地数传,找出最佳的天线波束宽度。

星载数传能力 Q (指每天能够传输的科学数据量) 等于每天平均数传时间 t 乘以数据传输速率 R 。对于太阳观测卫星,根据第 2 节内容可知,卫星的数传时间随着天线波束宽度的增大而增加;另外,数据传输速率随着发射 $EIRP$ (含天线增益) 的提高而上升;但是,天线增益反比于天线波束宽度。所以在其他链路参数一定的条件下,可能存在一个最佳波束宽度使得链路传输能力最大。

6.1 星地链路预算分析

卫星采用 X 频段信号对地数传,采用 QPSK 调制、LDPC 7/8 编码、450 Mbit/s 双圆极化频率复用^[7-8]。

地面接收采用 12 m 天线,三亚站、密云站及喀什站地面站天线的 G/T 分别为 33.5 dB/K、35 dB/K 和 32.5 dB/K。综合考虑星上调制与非线性损耗、指向损耗、自由空间损耗、极化损耗、大气损耗、雨衰(99.5% 可用)、解调损耗和编码增益之后,星地链路需具备 3 dB 余量,卫星数据链路预算结果如表 5 所示。

图 10 长方形波束角天线不同安装方向对应的数传时间
Fig. 10 Data transmission time corresponding to different antenna installation methods

5.3 正方形波束角天线获得的数传时间

图 11 为正方形波束角天线在 +Z 轴附近不同安装方向的数传时间,此时, $V = 67.67^\circ, H = 67.67^\circ$ 。最大数传时间出现在 $270^\circ - 85^\circ$ 安装方向,为 50.64 min/d,此时过境地面站平均时长为 354 s/次(8.58 次/d);最小数传时间出现在 $135^\circ - 60^\circ$ 安装方向,为 44.96 min/d,此时过境地面站平均时长为 347 s/次(7.77 次/d)。上述数据与 $\pm 70^\circ$ 的锥形波束角天线相当。

通过图 11 的仿真数据可以发现:当天线的方位角安装一致时,俯仰角安装越小,数传时间越短;当天线安装在俯仰角为 $80^\circ \sim 90^\circ$ 时,数传时间较长;当天线的俯仰角一致时,方位角的安装方式对数传时间的影响不大。

6 星载数传能力与天线波束宽度的关系

设计星地链路的任务,就是要根据数据传输

表5 星地链路计算参数

Tab.5 Calculating parameters of satellite-to-ground link

参数	密云	喀什	三亚
降雨可用度	不考虑 降雨	不考虑 降雨	99.5%
最小接收仰角/(°)	5	5	10
下行频率/MHz	8212	8212	8212
调制方式	QPSK	QPSK	QPSK
码速率/(Mbit/s)	2×500	2×500	2×500
最远星地距离/km	2608.3	2608.3	2198.4
EIRP/dBW	25	25	25
非线性与 调制损耗/dB	1	1	1
天线指向损耗/dB	-0.5	-0.5	-0.5
自由空间损耗/dB	-179.1	-179.1	-177.6
极化损耗/dB	-0.5	-0.5	-0.5
降雨损耗/dB	0	0	-11.4
地面接收 G/T 值/(dB/K)	35	32.5	33.5
玻尔兹曼常数/(dBW/Hz)	228.6	228.6	228.6
解调损耗/dB	-2	-2	-2
理论所需 E_b/N_0 值/dB	10.6	10.6	10.6

基本链路方程^[9-10]是表示收、发(单程)之间传输参数的关系,是完整的卫星通信双程(上、下行)链路分析的基础。各项均以 dB 为单位,方程式为:

$$[EIRP]_{\text{sat}} = [E_b/N_0]_{\text{th}} + [R_b] + M + [L_{\text{fs}}] - [G/T]_{\text{earth}} + [k] + [L_0] \quad (1)$$

式中: $[EIRP]_{\text{sat}}$ 为卫星将天线增益与发射机功率结合起来的等效发射能力; $[E_b/N_0]_{\text{th}}$ 是调制信号在误码率为 $1E-6$ 下的解调门限; $[R_b]$ 为数据速率,等于传输码率乘以编码码率; M 为链路余量,一般取 3 dB; L_{fs} 为自由空间损耗,即电波在空间传播时信号电平所受到的损耗; $[G/T]_{\text{earth}}$ 为地面站的 G/T ; k 为玻尔兹曼常数; L_0 为其他损耗,如大气、极化、天线指向等附加损耗。通过式(1)便可计算表5星地链路 EIRP。

根据式(1)计算表5可知,如果星地链路需要具备 3 dB 余量,星载 EIRP 至少应该在 25 dBW。

根据式(1)知:

$$EIRP_{\text{sat}} = P_T G_T = \left[\frac{E_b}{N_0} \right]_{\text{th}} ([R_b] \cdot M \cdot [L_{\text{fs}}] \cdot [k] \cdot [L_0]) / [G/T]_{\text{earth}} \quad (2)$$

通常用 3 dB 波束宽度 θ 来表示波束的宽度^[11],采用 Cassegrain 天线时按式(3)计算。

$$\theta = 70 \frac{\lambda}{D} \quad (3)$$

式中, D 表示天线口面直径, λ 表示波长。

Cassegrain 天线^[12-13]的增益计算公式为:

$$G_T = \frac{4\pi}{\lambda^2} A \eta = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta = \left(\frac{70\pi}{\theta} \right)^2 \eta \quad (4)$$

式中: A 表示为天线的面积; η 是天线效率,在 X 波段可取 65%。

由式(2)知:

$$R_b = \frac{P_T G_T}{M \cdot L_{\text{fs}} \cdot k \cdot L_0} \cdot \frac{[G/T]_{\text{earth}}}{[E_b/N_0]_{\text{th}}} = \frac{P_T}{M \cdot L_{\text{fs}} \cdot k \cdot L_0} \cdot \frac{[G/T]_{\text{earth}}}{[E_b/N_0]_{\text{th}}} \cdot G_T \quad (5)$$

$$\text{令 } c_1 = \frac{P_T}{M \cdot L_{\text{fs}} \cdot k \cdot L_0} \cdot \frac{[G/T]_{\text{earth}}}{[E_b/N_0]_{\text{th}}}, \text{ 将式(4)}$$

代入式(5)可得:

$$R_b = c_1 \left(\frac{70\pi}{\theta} \right)^2 \cdot \eta \quad (6)$$

令 $c_2 = c_1 \cdot (70\pi)^2 \cdot \eta$, 则

$$R_b = c_2 \cdot \left(\frac{1}{\theta^2} \right) \quad (7)$$

由于天线波束宽度与数传时间的关系表达式可以表示成 $t = \rho(\theta) \cdot \theta$, 其中, $\rho(\theta)$ 为 θ 的函数, 那么 $t = \rho(\theta) \cdot \theta$ 可表示不同波束角天线每次过境地面站的数传时间。数据量 Q (单位: bit) 为卫星每天需要传输的科学数据量, t (单位: s) 为卫星与地面站的数传时间。

所以 Q 可以写成:

$$Q = t \cdot R_b = \rho(\theta) \cdot \theta \cdot c_2 \cdot \frac{1}{\theta^2} = c_2 \cdot \frac{\rho(\theta)}{\theta} \quad (8)$$

此时式(8)变成星上科学数据量与天线波束宽度的函数。

6.2 仿真结果验证

将表5中的参数代入式(8), 现考虑地面站 G/T 取最小值, 取三亚站的地面 G/T ; 取星地三亚站最远距离作为自由空间损耗; 考虑雨衰, 取三亚站雨衰。星载数传能力与天线波束宽度之间的关系如图12所示。根据图12仿真的结果可以得出: 当天线束宽度为 $\pm 50^\circ$ 时, 传输数据量达到最大值; 增大或减少天线的 3 dB 波束宽度都不利于科学数据量的传输。而此时天线的增益值可根据式(4)求得, 为 11 dB, 如果 $EIRP = 25$ dBW, 那么星载发射天线的输入功率为 14 dBW。

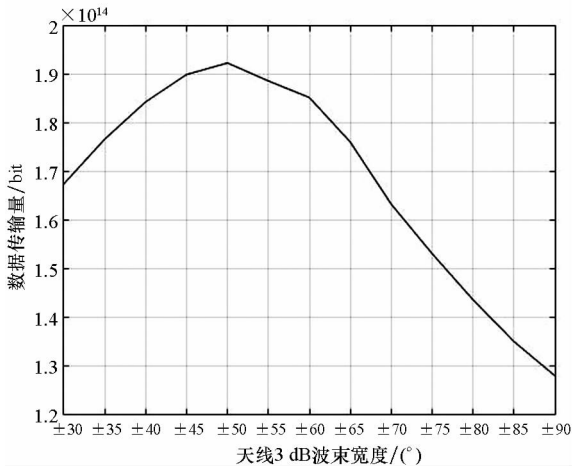


图 12 星载数传能力与天线波束宽度之间的关系

Fig. 12 Relation between on-board data transmission capability and antenna beam width

7 结论

通过本文的工作,最终获得三轴稳定对日指向的太阳观测卫星数传天线最优的天线波束设计及其布局,即获得最大的数传时间。主要结果如下:

1) 数传天线的最佳安装方向在星体 + Z 轴方向(使用位于北半球的地面站时)或者星体 - Z 轴方向(使用位于南半球的地面站时),安装偏差应不大于 $\pm 10^\circ$;

2) 天线波束角越大,能够获得的数传时间就越大,并且数传时间受到安装方位角的影响就越小,当锥形波束角大于 $\pm 60^\circ$ 时,可以忽略方位角安装的影响;

3) 在天线辐射面积相同的条件下,锥形波束角天线比长方形波束角天线能够获得更大的数传时间,与正方形波束天线获得的数传时间相当;

4) 天线采用矩阵波束形式时,垂直于轨道面方向的波束角越大,能够获得的数传时间就越大,这为数传天线采用一维指向(沿着轨道方向)机构奠定了设计基础;

5) 对太阳观测卫星采用 Cassegrain 天线对地数传,结合数传码率、数传时间及星地链路的预算分析,找出传输最佳星上科学数据对应天线的 3 dB 波束宽度。

通过对卫星轨道姿态及天线波束指向的实际仿真工作,发现与三轴稳定对地指向卫星存在最大波束角(超过某个角度,数传时间不再增加)不同,对日指向卫星能够获得的数传时间严重依赖于天线波束角,波束角越大,获得的数传时间越大。

参考文献 (References)

[1] 姜昌, 范晓玲. 航天通信跟踪技术导论[M]. 北京: 北京

工业大学出版社, 2003.

JIANG Chang, FAN Xiaoling. Space communication tracking technology introduction [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2003. (in Chinese)

[2] 黄圳圭. 航天器姿态动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1997.

HUANG Zhengui. Spacecraft attitude dynamics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1997. (in Chinese)

[3] 杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 69-99.

YANG Ying, WANG Qi. Application of STK in computer simulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 69-99. (in Chinese)

[4] 陈宏宇, 吴会英, 周美江, 等. 微小卫星轨道工程应用与 STK 仿真[M]. 北京: 科学出版社, 2016.

CHEN Hongyu, WU Huiying, ZHOU Meijiang, et al. Orbit engineering application and STK simulation for microsatellite [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)

[5] 丁溯泉, 张波, 刘世勇, 等. STK 使用技巧及载人航天工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

DING Suquan, ZHANG Bo, LIU Shiyong, et al. STK use skills and manned aerospace engineering applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)

[6] 章仁为. 卫星轨道理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015: 65-90.

ZHANG Renwei. Theory and application of satellite orbit [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2015: 65-90. (in Chinese)

[7] Malfajani R S, Atlasbat Z. Design and implementation of a broadband single layer circularly polarized reflectarray antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 973-976.

[8] 康行健. 天线原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.

KANG Xingjian. Antenna principle and design [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1993. (in Chinese)

[9] 曹志刚, 钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.

CAO Zhigang, QIAN Yasheng. Modern communication principle [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese)

[10] 张力军, 钱学荣, 张宗橙, 等. 通信原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.

ZHANG Lijun, QIAN Xuerong, ZHANG Zongcheng, et al. Communication principle [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)

[11] 约翰·克劳斯, 罗纳德·马赫夫卡. 天线: 上册[M]. 章文勋, 译. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2004.

Kraus J D, Marhefka R J. Antenna: volume 1 [M]. Translated by ZHANG Wenxun. 3rd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2004. (in Chinese)

[12] Padman R, Murphy J, Hills R. Gaussian mode analysis of Cassegrain Antenna Efficiency [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(10): 1093-1103.

[13] 孟庆鼎. 卫星通信接收天线的质量分析[C]//中国电子学会第七届学术年会, 2001.

MENG Qingnai. Quality analysis of satellite communication receiving antenna [C]//Proceedings of the 7th Annual Academic Conference of the Chinese Society of Electronics, 2001. (in Chinese)