

遥感卫星地面站天线遮挡预报 模型及其应用*

付伟龙 石璐 吴凤霞
邓少华 田妙苗 马广彬

(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

摘要 基于遥感卫星地面站业务运行中所遇到的实际问题和运行经验,为降低因地面站天线周边遮挡物对低轨道空间科学卫星、陆地观测卫星等极轨卫星的空间通信任务所产生的影响,以提高航天器和地面的有效通信时长和通信质量为目标,将地面站天线作为基准,对周边环境的遮挡进行建模分析.建立遮挡模型空间几何关系,模型选择推导“天线无遮挡最小仰角”的求解思路,通过模型分析和推导得到了遮挡物的实体遮挡模型公式和大型天线遮挡模型公式.通过模型验证,将模型计算结果同实际遮挡采样信息对比,结果表明遮挡模型和遮挡实际情况基本吻合,模型计算结果准确度可达到 99.67%.以天线遮挡预报模型为信息支持,将天线遮挡预报封装成服务,在任务规划阶段调用天线遮挡预报的计算服务和相应任务规划策略,以实现天线遮挡预报模型在地面站运行管理资源调度中的工程应用.经试运行和应用统计结果表明,某地面站的运行管理资源调度优化率达到 56.07%.

关键词 空间通信, 极轨卫星, 遥感卫星地面站, 天线, 遮挡预报模型

中图分类号 V443.1, TN927

Remote Sensing Satellite Ground Station Antenna Occlusion Forecasting Model and its Application

FU Weilong SHI Lu WU Fengxia DENG Shaohua
TIAN Miaomiao MA Guangbin

(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094)

Abstract Based on the practical problems encountered in the operational operation of remote sensing satellite ground stations and operational experience, this paper aims to reduce the impact of obstructions around the antennas of ground stations on the space communication missions of polar orbit satellites such as low-orbit space science satellites and land observation satellites. With the goal of improving the effective communication duration and communication quality between the spacecraft and the ground,

* 空间科学卫星在轨运行地面支撑系统地面接收分系统项目资助 (E02118050B)

2023-11-21 收到原稿, 2024-02-28 收到修定稿

the ground station antenna is used as a benchmark for modeling and analyzing the obstructions in the surrounding environment. First establish the occlusion model spatial geometry relationship. The model is chosen to derive the solution for the “minimum elevation angle of the antenna without obstruction”. The solid occlusion model equations and large antenna Occlusion model equations are obtained through model analysis and derivation. Through the model validation, it shows that the model results and the actual situation of the occlusion basically match, and the accuracy of the model calculation results can reach 99.67%. Using the antenna occlusion forecast model as information support, the antenna occlusion forecast is encapsulated into a service, and the computation service of the antenna occlusion forecast and the corresponding mission planning strategy are invoked in the mission planning stage, so as to realize the engineering application of the antenna occlusion forecast model in the operation and management resource scheduling of a ground station. The results of trial operation and application statistics show that the optimization rate of operation management resource scheduling of a ground station has reached 56.07%.

Key words Space communication, Polar orbiting satellite, Remote sensing satellite ground station, Antenna, Occlusion forecasting model

0 引言

遥感卫星地面站是用来接收、处理、存档和分发各类遥感卫星数据的技术系统,其作为空间对地观测体系的地面基础设施和空间信息基础数据源,在国家经济建设活动中发挥着公用数据平台的作用^[1].多年来,中国也非常重视遥感卫星地面站的研发和建设.

以陆地观测卫星数据接收站网为例,中国科学院空天信息创新研究院中国遥感卫星地面站(以下简称地面站)于1986年建成并投入运行,历经30余年的自主研发、协调合作和技术创新,已经形成了空间科学卫星与陆地观测卫星数据接收站网,规模体量和卫星任务接收数量位居世界民用卫星地面站前列.截至2020年已实现密云、喀什、三亚、昆明、北极5站全自动化业务运行,承担着中国空间科学卫星、陆地观测卫星和国际陆地观测卫星等30余颗国内外卫星任务^[2].

为应对在轨运行空间探测器、卫星等航天器数量的逐年增长,以及地面接收系统的技术革新,地面站多年来持续开展地面接收系统的研发和建设.设立新站区建设卫星地面接收系统难度大、周期长.为节省资金投入,在老站区内尽可能有效使用用地面积,扩建新系统成为当下的最优选择,这样也进一步增加了老站区内的天线密度.与此同时,随着中国城市化建设的迅速发展,站区周边建筑物不断增多.综合上述两种情况,亟需对站区天线被遮挡情况进行评估.

极轨卫星有太阳同步极地轨道、轨道高度较低、

轨道周期短、卫星移动速度快的轨道特征.目前地面站参与通信业务的极轨卫星距离地面高度一般为500~800 km,对于一次完整的星地通信轨道窗口,地面站天线包含低仰角和高仰角工作状态,这就要求地面站天线可能出现长时间低仰角工作的特点.地面站主要采用大口径卡塞格伦天线,用于低轨道空间科学卫星、陆地观测卫星等极轨卫星的数据传输、遥测和测控等星地通信任务.在天线全半球范围内,主反射面辐射区域不得有遮挡,遮挡物会影响天线增益或天线效率^[3],遮挡会削弱星地通信信号电平和信噪比等数据指标,进而影响通信数据质量,遮挡严重时可能阻断星地通信链路,或在卫星数据处理阶段出现数据无法录入或处理失败等问题.可见,遮挡对地面站天线低仰角工作的危害不容忽视.

目前,地面站采用运行资源综合调度的策略,考虑时间窗口和资源性能等约束,合理分配地面站资源,以完成卫星数据传输、遥测和测控任务^[4].若将天线遮挡情况加入天线资源约束条件,可在运行管理资源调度阶段实现遮挡预报和任务规划的天线资源优化,以规避天线遮挡的发生.因此,研究和掌握地面站天线遮挡预报模型,并将该模型应用于地面站运行管理资源调度中就显得十分必要.

文献[5]提出了一种卫星接收天线方位角和俯仰角的定位方法,适用于多种结构的卫星接收天线,该方法可用于地面站天线定位使用,便于后续遮挡模型研究分析.文献[6-8]对广播电视卫星地球站天线的

近场遮挡实例进行分析和计算, 广播电视卫星多为地球同步轨道卫星, 实例涉及实体遮挡和天线遮挡, 分析和计算均加入了保护角; 遥感卫星地面站主要接收极轨卫星, 极轨卫星的轨道特征要求地面站天线的伺服跟踪精度极高, 所以地面站天线遮挡模型不考虑这种保护角. 文献 [9] 根据卫星通信天线指向同步卫星的方位角和俯仰角, 建立空间模型, 分析推算了天线与建筑物间距和两天线间距的计算公式, 但若掌握某天线遮挡预报模型信息, 该公式有一定局限性. 在工程应用方面, 地面站运行管理资源调度亟需可靠的天线遮挡预报模型信息用于天线遮挡预报工作. 此前, 尚未有可靠的天线遮挡模型支持.

本文以卡塞格伦天线为例进行分析, 考虑天线的物理结构和转动轮廓, 为增加遮挡模型的准确性, 将天线遮挡问题划分为实体遮挡问题和大型天线遮挡问题, 分别建立空间几何模型. 为便于预报模型应用, 选择推导天线无遮挡最小仰角的模型求解思路, 经过模型分析和推导得到实体遮挡模型和大型天线遮挡模型公式. 通过模型验证和结果分析, 验证遮挡模型的准确性. 最后, 以天线遮挡预报模型为信息支持, 将天线遮挡预报封装成服务, 在任务规划阶段调用天线遮挡预报的计算服务和相应任务规划策略, 以实现天线遮挡预报模型在地面站运行管理资源调度中的工程应用.

1 模型分析

1.1 地面站天线位置

天线在执行卫星任务时, 大多采用两种跟踪方

式, 即程序跟踪和自动跟踪. 程序跟踪为辅助模式, 自动跟踪为主模式, 即卫星过境时, 先用程序跟踪模式按事先预报的卫星轨道参数计算得到“天线程序跟踪引导文件”驱动天线运行, 当发现卫星信号强度超过自动跟踪捕获门限时, 自动切换成自动跟踪模式. 目前, 地面站事先预报的天线程序跟踪引导文件涉及不同时刻天线大地系方位角 A 和俯仰角 E , 其精度完全可用于卫星跟踪^[10]. 天线经纬度位置与天线方位角 A 和俯仰角 E 有如下计算关系:

$$A = 180^\circ - \arctan \left[\frac{\tan(\phi_s - \phi_e)}{\sin \varepsilon} \right], \quad (1)$$

$$E = \arctan \left[\frac{\cos(\phi_s - \phi_e) \cos \varepsilon - 0.15127}{\sqrt{1 - [\cos(\phi_s - \phi_e) \cos \varepsilon]^2}} \right]. \quad (2)$$

式中, ε 为卫星地面站天线位置纬度; ϕ_e 为卫星地面站天线位置经度, ϕ_s 为卫星经度. 所以, 通过掌握卫星和地面站天线的经纬度位置信息, 可计算得到卫星地面站天线对准卫星时的方位角 A 和俯仰角 E ^[5].

1.2 实体遮挡模型

以卡塞格伦天线为例进行分析, 该天线主波束辐射方向与主反射面光轴线平行, 且天线主波束宽度与主反射面口径一致^[3].

研究实体遮挡模型优先构建地面站天线和实体的空间几何关系^[9]. 实体可以是山体, 也可以是建筑物. 假设一规则结构实体, 距离天线为 s , 实体高为 h_2 ; 天线口径为 d , 地面站天线俯仰轴距离地面为 h_1 , 单位均为 m, 如图 1 所示.

为便于预报模型应用, 遮挡模型选择推导天线无

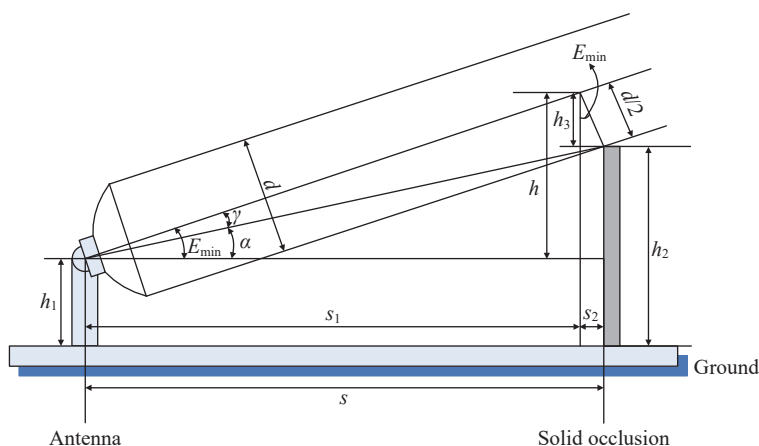


图 1 实体遮挡模型空间几何结构

Fig. 1 Spatial geometry of solid occlusion mode

遮挡最小仰角的求解思路. 可以根据下面公式计算天线无遮挡最小仰角 $E_{\min}$, 推导过程如下:

$$E_{\min} = \alpha + \gamma, \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan \frac{h_2 - h_1}{s}, \quad (4)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{d/2}{\sqrt{s^2 + (h_2 - h_1)^2}}, \quad (5)$$

$$E_{\min} = \arctan \frac{h_2 - h_1}{s} + \arcsin \frac{d/2}{\sqrt{s^2 + (h_2 - h_1)^2}}. \quad (6)$$

当天线俯仰角 $E \geq E_{\min}$ 时, 天线不被实体遮挡.

1.3 大型天线遮挡模型

当大型天线作为遮挡物时, 不同于实体遮挡物, 天线结构不规则, 其遮挡程度还与天线的转动姿态有关. 在分析地面站天线遮挡模型时, 建立两天线的空间几何关系, 需考虑天线的物理结构和转动轮廓^[9].

已知某地面站两支天线, 天线 A 为待评估天线, 天线 B 为遮挡天线, 天线 A 俯仰轴心距离地面为 h_1 , 天线 B 俯仰轴心距离地面为 h_2 . 两支天线之间距离为 s , 天线 A 的电轴为 OF . 天线 A 口径与主波束宽度均为 d , 天线 B 转动轮廓直径为 D , 单位均为 m, 如图 2 所示.

图 2 给出了天线 A 和天线 B 的空间位置关系, 天线 A 俯仰轴中心点为 O 点, O 点在地面的投影为 O' 点; 天线 B 俯仰轴中心点是 B 点, B 点在地面的投影为 B' 点; B 点在天线 A 光轴铅垂面的投影为 C 点, C 点在地面的投影为 C' 点; 构建平行于地面的 $OB''C''$ 平面作为辅助平面, 则 B 点在 $OB''C''$ 平面的

投影为 B'' 点, C 点在 $OB''C''$ 平面的投影为 C'' 点. C 点在天线 A 光轴线上投影为 F 点.

有如下空间垂直关系 (Rt 表示直角三角形):

$$C'B' \perp O'C' \Rightarrow Rt\Delta O'B'C',$$

$$CC'' \perp OC'' \Rightarrow Rt\Delta OCC'',$$

$$BC \perp OFC \Rightarrow BC \perp FC \Rightarrow Rt\Delta FBC,$$

$$CF \perp OF \Rightarrow Rt\Delta OFC,$$

$$BC \perp OF, CF \perp OF \Rightarrow OF \perp FBC \Rightarrow OF \perp FB.$$

以天线 B 的转动轮廓为遮挡的最大包络近似处理, FB 长度为 B 点距离天线 A 光轴线 OF 的最短距离, 有如下关系:

$$FB = \frac{D + d}{2}. \quad (7)$$

天线 A 光轴所在铅垂面 OFC 和两天线俯仰轴中心点所在铅垂面 $OB''C''$ 的夹角为 α ; 在天线 A 光轴铅垂面 OFC 上, $\angle COC''$ 为 β , $\angle FOC$ 为 γ . 已知卫星轨道参数, 可通过式 (1) 和式 (2) 计算得到天线 A 方位角 A_a 和俯仰角 E_a ; 同时, 已知待评估天线 A 和遮挡天线 B 的经纬度, 可计算得到天线 B 相对天线 A 的方位角度 A_x , 有

$$\alpha = A_a - A_x, \quad (8)$$

$$BC = B'C' = s \times \sin \alpha, \quad (9)$$

$$FC = \sqrt{FB^2 - BC^2} = \frac{\sqrt{(D + d)^2 - (2s \times \sin \alpha)^2}}{2}, \quad (10)$$

$$OC = \frac{OC''}{\cos \beta} = \frac{O'C'}{\cos \beta} = \frac{s \times \cos \alpha}{\cos \beta}, \quad (11)$$

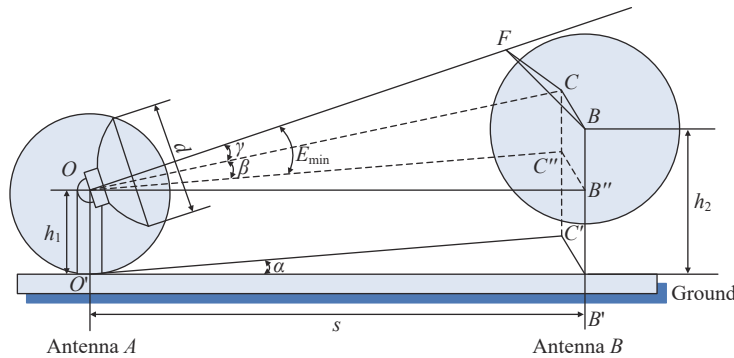


图 2 大型天线遮挡模型空间几何结构

Fig. 2 Spatial geometry of large antenna occlusion model

$$\beta = \arctan \frac{CC''}{OC''} = \arctan \frac{h_2 - h_1}{s \times \cos \alpha}, \quad (12)$$

$$\gamma = \arcsin \frac{FC}{OC} = \arcsin \left[\frac{\cos \beta}{2s \times \cos \alpha} \sqrt{(D + d)^2 - (2s \times \sin \alpha)^2} \right]. \quad (13)$$

则天线 A 无遮挡的最小仰角为

$$E_{\min} = \beta + \gamma; \quad (14)$$

$$E_{\min} = \beta + \arcsin \left[\frac{\cos \beta}{2s \times \cos \alpha} \sqrt{(D + d)^2 - (2s \times \sin \alpha)^2} \right], \quad \beta = \arctan \frac{h_2 - h_1}{s \times \cos \alpha}. \quad (15)$$

即当天线 A 执行卫星接收任务处于方位角 A_a 时, 天线 A 俯仰角 E_a 在小于 $E_{\min}$ 时, 天线 A 将被天线 B 遮挡.

2 模型验证与结果分析

以某地面站两套天线为例, 两套天线结构和绝对海拔高度一致, 且口径均为 12 m, 设天线 A 为待评估天线, 天线 B 为遮挡天线. 两天线距离 72 m, 遮挡天线 B 相对待评估天线 A 的方位角是 149.68° , 遮挡天线转动轮廓尺寸为 19.812 m. 根据地面站天线遮挡模型式 (15) 可计算天线 A 在 $137^\circ \sim 165^\circ$ 方位角范围内, 天线 A 未被天线 B 遮挡的最小仰角, 用于评估天线 A 被天线 B 的遮挡情况 (见表 1). 一般情况下, 为保证卫星任务正常运行, 地面站天线执行卫星任务的起始跟踪最小仰角为 5° .

根据分析以上数据可知 (见图 3), 当天线 A 方位角小于 137° 和大于 162° 时, 天线无遮挡最小仰角小于 5° , 天线 A 无遮挡; 当天线 A 方位角在 $137^\circ \sim 161^\circ$ 范围内, 天线无遮挡最小仰角大于 5° , 则天线 A 被天线 B 遮挡, 同时方位夹角越小, 天线 B 对天线 A 遮挡程度越大, 卫星数据传输信号受到遮挡的影响越大, 严重时遮挡物可能阻断星地通信链路.

选取天线 A 执行过的 188 轨存在遮挡情况的卫星接收任务样本. 此时, 遮挡判断的主要依据如下: 天线发生遮挡时间段, 星地通信指标和卫星数据会表现出不同程度的影响, 例如卫星信号电平低于门限值、信噪比低于常规门限、载波失锁、帧同步失锁、数据

表 1 地面站天线 A 无遮挡最小仰角计算数据 (起始跟踪最小仰角为 5°)

Table 1 Calculation data for the minimum elevation angles without obstruction of the ground station antenna A (Minimum elevation angle of 5° for initial tracking)

天线A方位角度/($^\circ$)	天线B方位角/($^\circ$)	夹角 α /($^\circ$)	无遮挡最小仰角 $E_{\min}$ /($^\circ$)
137	149.68	12.68	1.464
138	149.68	11.68	5.181
139	149.68	10.68	7.029
140	149.68	9.68	8.358
141	149.68	8.68	9.393
142	149.68	7.68	10.224
143	149.68	6.68	10.900
144	149.68	5.68	11.448
145	149.68	4.68	11.887
146	149.68	3.68	12.229
147	149.68	2.68	12.483
148	149.68	1.68	12.654
149	149.68	0.68	12.745
149.68	149.68	0	12.763
150	149.68	-0.32	12.759
151	149.68	-1.32	12.696
152	149.68	-2.32	12.554
153	149.68	-3.32	12.330
154	149.68	-4.32	12.021
155	149.68	-5.32	11.618
156	149.68	-6.32	11.111
157	149.68	-7.32	10.484
158	149.68	-8.32	9.713
159	149.68	-9.32	8.758
160	149.68	-10.32	7.550
161	149.68	-11.32	5.934
162	149.68	-12.32	3.359

出现丢帧和错帧、数据处理失败等. 该样本集由 38 轨空间科学系列卫星任务、25 轨资源系列和环境系列卫星任务、22 轨高分辨率对地观测系列卫星任务、103 轨民用商业卫星任务组成. 样本卫星包括暗物质粒子探测卫星 KX-03、电磁检测试验卫星 CSES、太阳观测 01 星 SCSY-1、地球科学卫星 CASEarth、引力波伽马暴科学卫星 TY-28、大气环境监测卫星

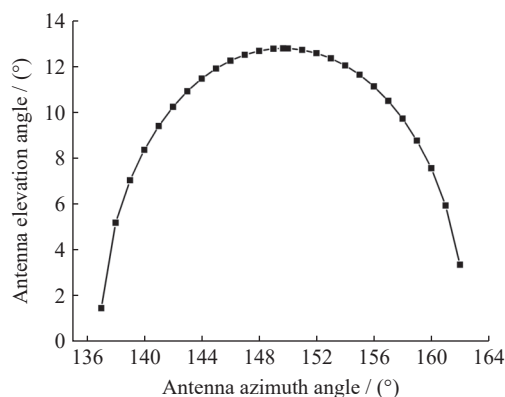


图3 天线无遮挡最小仰角

Fig. 3 Minimum elevation angle without obstruction

DQ-1、环境减灾二号 A 星 HJ-2A、陆地探测一号卫星 01 组 A 星 LT-1A、美国陆地八号卫星 LANDSAT-8、资源三号 03 星 ZY303、高分一号/二号/三号/六号/七号卫星等. 样本集内所有卫星均为低轨道极轨卫星, 卫星距离地面高度为 500~800 km. 从上述样本集中采样了 930 个发生遮挡时刻的天线俯仰角和方位角信息, 如图 4 所示. 图 4 中实心曲线是利用式 (15) 计算得到的天线 B 对天线 A 的遮挡曲线, 在方位角 137°~161°范围内, 天线 A 无遮挡最小仰角大于天线起始跟踪最小仰角 5°, 则该区域天线 A 被天线 B 遮挡, 将遮挡曲线投影区域称作遮挡区域. 图 4 中有 3 个采样点落在遮挡曲线上方, 其余所有采样点均在遮挡区域内. 通过对比模型计算结果和实际遮挡采样信息发现, 遮挡模型和实际遮挡情况基本吻合, 该遮挡模型的准确度可以达到 99.67%.

3 模型应用

天线遮挡预报模型在地面站运行管理资源调度中具有非常重要的工程应用意义.

3.1 地面站天线遮挡预报模型

利用上述的遮挡模型公式, 可计算得到地面站天线 360°全向遮挡预报模型信息.

例如, 以某地面站 S 天线 A 为例, 为评估天线 A 的遮挡区域和具体遮挡情况. 首先分析可能的遮挡物为天线 B、天线 C、山体 k 和建筑 z . 3 支天线结构一致, 且 3 支天线俯仰轴绝对海拔高度一致, 天线转动轮廓尺寸均为 19.812 m. 具体参数列于表 2. 考虑到山体和建筑物形状和遮挡位置的不规则性, 在遮挡

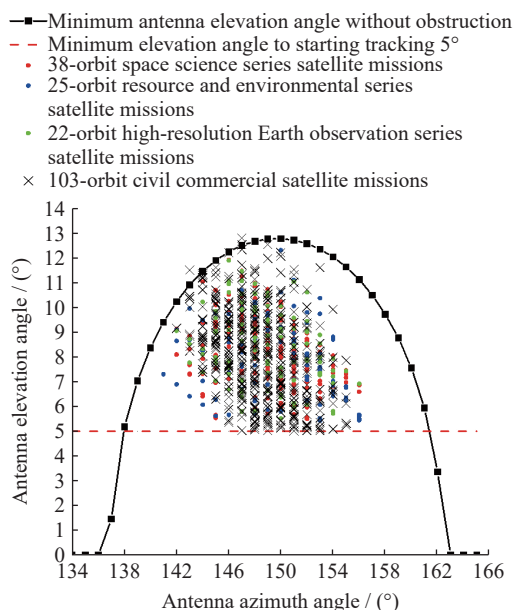


图4 实例分析与验证

Fig. 4 Example analysis and validation

表2 某地面站 S 天线 A 周边地理环境参数

Table 2 Parameters of the geographic environment around the antenna of a ground station

试验类型	与天线A距离/m	俯仰轴绝对海拔高度/m	遮挡物相对天线A的方位角/(°)
天线A	0	47.165	0
天线B	72	47.165	137~161
天线C	97.3	47.165	102~117
山体 k	3432	330~396.45	85~91
建筑 z	230~270	64.8	137~185

区域按照 1°步进采集遮挡物绝对海拔高度和距离. 根据式 (6) 可计算山体 k 和建筑 z 对天线 A 的遮挡情况; 根据式 (15) 可计算天线 B 和天线 C 对天线 A 的遮挡情况. 整理后可以得到天线 A 全向遮挡区域, 如图 5 所示.

天线 A 全向方位角遮挡程度如图 5 所示, 超过红线区域即为遮挡区域. 天线 A 方位角在 85°~91°被山体 k 遮挡, 最低接收俯仰角范围为 5°~5.91°; 天线 A 方位角在 102°~117°范围内被天线 C 遮挡, 最低接收俯仰角变化范围为 5°~9.41°; 天线 A 方位角在 137°~161°范围内被天线 B 遮挡, 最低接收俯仰角变化范围为 5°~12.76°; 天线 A 方位角在 137°~185°范围内被建筑 z 遮挡, 最低接收俯仰角变化范围为

5°~6.12°.

同理可得到地面站 S 每支天线遮挡预报模型信息, 为进一步用于地面站运行管理资源调度的天线遮挡预报工程应用提供了模型支持.

3.2 天线遮挡预报在任务规划中的应用

天线遮挡预报可以应用在地面站运行管理资源调度中, 具体策略是将天线遮挡预报封装成服务, 任务规划时调用天线遮挡预报计算服务获取天线遮挡结果.

天线遮挡预报服务的主要技术方案主要包含以下 5 个步骤.

步骤 1 从卫星计划表中获取输入时间段、接收站的所有卫星计划信息, 包括卫星名称、接收站天线、轨道号、接收开始和结束时间.

步骤 2 从卫星瞬时轨道根数表中获取卫星瞬时轨道根数.

步骤 3 从天线遮挡预报模型信息中获取天线在 0~360°方位的无遮挡最小仰角信息.

步骤 4 调用轨道计算服务的多点过站计算功能获取卫星的过站预报结果.

步骤 5 将卫星的过站预报结果与天线遮挡预报模型信息进行对比分析, 获取每支任务天线的实际遮挡信息.

应用天线遮挡预报任务规划策略是将各任务使用各天线的遮挡时间作为任务安排的影响因素, 尽量避免安排存在遮挡的任务天线资源. 具体方法如下.

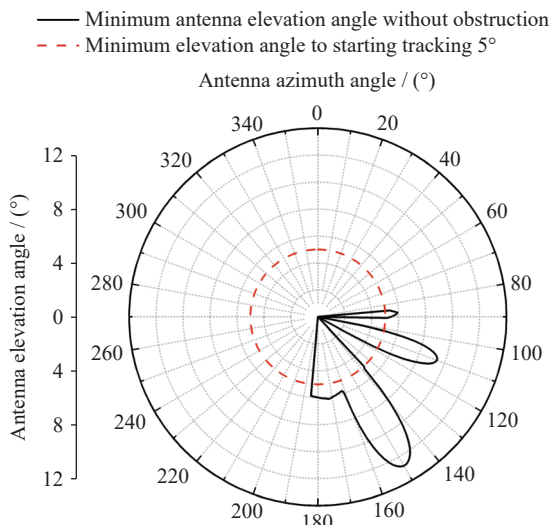


图 5 天线遮挡预报模型

Fig. 5 Antenna occlusion forecasting model

(1) 将任务 i 使用天线 j 的被遮挡任务时长 $t_{i,j}$ 作为任务规划的输入.

(2) 根据 $t_{i,j}$ 的值设置遮挡权重 $P_{i,j}$. 权重越大, 表示遮挡越严重, 则尽量不使用该天线安排该任务. $P_{i,j}$ 的值与 $t_{i,j}$ 的值呈正相关.

(3) 在任务规划目标函数中增加遮挡对天线使用的影响有 $P_{i,j} \times Q_{i,j}$. 其中 $Q_{i,j}$ 为二值变量, 值为 1 表示任务 i 使用天线 j .

3.3 应用效果统计和分析

天线遮挡预报模型在某地面站 S 已投入地面站运行管理资源调度的工程应用试运行阶段. 优先计算得到该地面站所有天线的遮挡预报模型信息; 在运行管理资源调度阶段, 任务规划会自行调用天线遮挡预报计算服务, 预报结果信息涉及该任务在该站存在遮挡的天线 and 其对应遮挡时长; 最后, 根据天线遮挡预报任务规划策略对该任务天线资源进行优化配置.

为掌握其实际应用效果, 整理收集了该地面站为期 23 天的极轨卫星任务规划样本, 共计 2149 轨 (见表 3). 表 3 中有 1205 轨成功实现遮挡预报和任务天线资源使用的配置优化, 期间未再发生任务天线遮挡, 该地面站运行管理资源调度优化率达到 56.07%. 统计结果表明, 天线遮挡预报模型在地面站运行管理资源调度的应用可极大降低地面站天线在任务过程中发生遮挡的概率, 提高了星地有效通信时长、卫星数据质量和地面站运行管理资源调度能力.

4 结论

基于遥感卫星地面站业务运行中所遇到的实际问题和运行经验, 为降低因地面站天线周边遮挡物对低轨道空间科学卫星、陆地观测卫星等极轨卫星的星地通信任务所产生的影响, 以地面站卡塞格伦天线作为基准, 对周边环境的遮挡环境进行建模分析研究. 通过模型分析, 模型选择推导天线无遮挡最小仰角的

表 3 某地面站天线遮挡预报试运行情况
Table 3 Trial operation of antenna occlusion forecasting at a ground station

采样时间/d	任务样本总量/轨	遮挡预报和资源优化任务量/轨	运行管理资源调度优化率/(%)
23	2149	1205	56.07

求解思路, 得到实体遮挡模型和大型天线遮挡模型公式. 接着选取某地面站天线 188 轨存在遮挡情况的低轨道极轨卫星任务样本, 采集了 940 个遮挡时刻天线俯仰角和方位角信息用于模型验证和分析, 验证结果表明模型结果和遮挡实际情况基本吻合, 同时该遮挡模型准确度可达到 99.67%. 最后, 以天线遮挡预报模型为信息支持, 将天线遮挡预报封装成服务, 在任务规划阶段调用天线遮挡预报的计算服务和相应任务规划策略, 以实现天线遮挡预报模型在地面站运行管理资源调度中的工程应用. 经试运行和应用统计结果表明, 该地面站运行管理资源调度优化率达到 56.07%. 天线遮挡预报模型在运管资源调度中的工程应用可极大减少因天线遮挡对低轨道极轨卫星通信中数据传输、遥测和测控产生的影响, 提高星地有效通信时长、通信质量和地面站运行管理资源调度能力, 减少地面站天线发生空转的概率, 在降低运行能耗、节省资源、提升空间通信一体化指标等方面具有重要意义. 本文研究工作还可用于承担低轨道极轨卫星任务地面站的天线布局设计、地面站选址、天线全向遮挡评估和周边建筑物限高等工作.

参考文献

- [1] AN Peijun, WANG Xuemei, ZHANG Zhiqiang, *et al.* Distribution of overseas satellites ground stations and their operational characteristics[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, **23**(6): 697-704 (安培浚, 王雪梅, 张志强, 等. 国外遥感卫星地面站分布及运行特点 [J]. *遥感技术与应用*, 2008, **23**(6): 697-704)
- [2] LI An, HUANG Peng, SHI Lu, *et al.* Update of remote sensing satellite ground system of China remote sensing satellite ground station[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, **25**(1): 251-266 (李安, 黄鹏, 石璐, 等. 中国遥感卫星地面站卫星地面系统的发展 [J]. *遥感学报*, 2021, **25**(1): 251-266)
- [3] KRAUS J D, MARHEFKA R J. *Antennas: For All Applications*[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001
- [4] LIU Jingyi, TIAN Miaomiao, HUANG Peng, *et al.* Hybrid decomposition algorithm for remote sensing satellite ground station resource scheduling[J]. *Journal of Jilin University (Science Edition)*, 2020, **58**(3): 611-619 (刘静怡, 田妙苗, 黄鹏, 等. 遥感卫星地面站资源调度的混合分解算法 [J]. *吉林大学学报 (理学版)*, 2020, **58**(3): 611-619)
- [5] LI Ruiqiang, YANG Jinchuan, ZHANG Tao. Orientate directed angle and elevated angle method of parabolic antenna[J]. *China Digital Cable TV*, 2006(2): 182-184 (李瑞强, 杨金川, 张涛. 简便实用的抛物面天线方位角仰角定位方法 [J]. *中国有线电视*, 2006(2): 182-184)
- [6] TIAN Shijun, CHAO Lumen. Analysis of the possibility of radio and television satellite antennas being blocked[J]. *Research on Digital Media*, 2018, **35**(9): 43-45 (田世军, 朝鲁门. 广播电视卫星天线遮挡分析 [J]. *数字传媒研究*, 2018, **35**(9): 43-45)
- [7] ZHANG Jun, LUO Peng. Example analysis of satellite earth station antenna site selection[J]. *Radio & Television Information*, 2019(12): 72-74 (张俊, 罗鹏. 关于卫星地球站天线场址选择的实例分析 [J]. *广播电视信息*, 2019(12): 72-74)
- [8] HOU Jundong. Feasibility analysis for the construction of two additional 12-metre C-band parabolic antennas at the existing antenna site at Radio 501[J]. *Research on Digital Media*, 2019, **36**(12): 61-67 (侯俊东. 501 台现有天线场地增建两面 12 米口径 C 频段抛物面天线可行性分析 [J]. *数字传媒研究*, 2019, **36**(12): 61-67)
- [9] WANG Zhibo. Analysis of satellite communication antenna occlusion[J]. *Communications Technology*, 2020, **53**(7): 1803-1805 (王志波. 卫星通信天线遮挡分析 [J]. *通信技术*, 2020, **53**(7): 1803-1805)
- [10] WANG Wanyu, ZHOU Zikuan. Exploration of remote sensing satellite ground station tracking technology[C]//The Thirteenth Academic Conference of the Space Exploration Committee of the Chinese Society of Space Science. Chengdu: Chinese Society of Space Research, 2000 (王万玉, 周自宽. 遥感卫星地面站跟踪技术探讨 [C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十三次学术会议. 成都: 中国空间科学学会, 2000)

作者简介



付伟龙 男, 1989 年 3 月出生于河北省廊坊市, 现为中国科学院空天信息创新研究院工程师, 主要研究方向为卫星地面接收系统工程技术、电磁场与微波技术等。
E-mail: fuwl@aircas.ac.cn