

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.015

## 基于 Matlab 与 STK 的卫星信关站部署仿真平台实现

柳 敏, 杨丹丹, 王永兵

(南京熊猫汉达科技有限公司, 南京 210002)

**摘要:** 为提高卫星通信网络的运行效率, 设计一款基于 Matlab 与 STK 的卫星信关站部署仿真平台。构建卫星星座仿真、信关站覆盖范围和可见性判定模型, 对低轨卫星星座空间与地面段进行模拟, 根据实际需要设置不同的卫星星座和地面站址参数, 对地面信关站与卫星的可见性进行评估。仿真结果表明: 该平台可以有效支持地面信关站部署方案的分析, 为低轨卫星通信系统地面总体设计提供参考。

**关键词:** 低轨卫星; 仿真平台; 信关站; 位置部署

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Simulation Platform Implementation for Satellite Gateway Station Deployment Based on Matlab and STK

Liu Min, Yang Dandan, Wang Yongbin

(Nanjing Panda Handa Technology Co., Ltd., Nanjing 210002, China)

**Abstract:** In order to improve the operation efficiency of the satellite communication network, simulation platform for satellite gateway deployment based on Matlab and STK has been designed. Satellite constellation simulation, information gate station coverage and visibility judgment model have been established, which can realize the simulation of low-orbit satellite constellation space and ground segment. The simulation platform can set different satellite constellation and ground station location parameters according to actual needs, which is used to evaluate the visibility of ground station and satellite. The simulation results show that the platform can effectively support the analysis of ground station deployment scheme. It can provide reference for the overall ground design of low orbit satellite communication system.

**Keywords:** LEO satellite; simulation platform; gateway station; location deployment

### 0 引言

卫星通信以其覆盖范围广、移动性强、传输容量大、组网方式灵活、不受地理条件限制等特点, 在通信领域得到世界各国的高度重视。低轨卫星系统作为卫星通信系统的重要组成部分, 凭借其运行轨道低、传输时延短及覆盖范围广等独特优势, 可对接入用户提供任意时间、任意地点服务<sup>[1]</sup>。近年来, 低轨宽带通信卫星技术逐渐发展成熟, 全球有几十个 LEO 通信卫星星座计划出炉, 正处在大规模商用的前夜。国外当前计划或在建的低轨卫星通信系统包括铱星系统、全球星系统、Orbcomm 系统以及 SpaceX 的“Starlink”计划等<sup>[2]</sup>。我国低轨卫星通信系统主要有航天科技集团的“鸿雁星座”、航天科工集团的“虹云工程”、中国电科集团的“天象”等<sup>[3]</sup>。大力发展自主可控的全球低轨卫星通信系统对我国有着非常重要的特殊意义。

低轨卫星通信系统划分为空间段、地面段和应

用段 3 个组成部分。地面信关站系统作为重要的组成部分, 用于地面与卫星之间的通信, 能够实现语音、数据、图像等多种业务信息的实时传递, 提供无线通信传输信道<sup>[4]</sup>。

目前国内外对低轨卫星通信系统设计及关键技术也做了很多研究: 文献[5]通过比较不同仰角下实现卫星链路计算满足终端速度要求的复杂性, 提出构建高仰角宽带 LEO 星座卫星通信系统的构想; 文献[6]探索了通信卫星星座设计的优化设计方法; 文献[7]面向宽带 LEO 星座卫星通信系统星座进行了轨道高度与边缘通信仰角优化设计; 文献[8-9]针对卫星地面站建站选址策略进行了分析与研究。

笔者在构建卫星星座系统仿真模型、信关站覆盖范围模型以及可见性判定模型的基础上, 开发了基于 Matlab 与 STK 的卫星信关站部署仿真平台。该平台具有很好的可扩展性, 便于后续功能拓展, 为未来低轨卫星通信系统地面部署方案设计提供有力的仿真支撑。

收稿日期: 2021-04-13; 修回日期: 2021-05-10

作者简介: 柳 敏(1990—), 男, 湖北人, 博士, 工程师, 从事卫星通信与导航技术研究。E-mail: nrcliumin@126.com。

## 1 卫星星座及信关站系统仿真建模

### 1.1 卫星星座系统仿真模型建立

空间卫星星座仿真采用 Walker 星座。卫星在空间的运行情况通过对卫星轨道根数推导得到。仿真器中不涉及摄动力因素，选取主要 6 个卫星轨道参数：起始平近点角  $M_0$ 、卫星轨道偏心率  $e$ 、卫星轨道长半轴  $a$ 、升交点赤经  $\Omega$ 、轨道面倾角  $i$ 、近地点角距  $\omega_0$ 。

由轨道参数推导卫星的位置具体算法为：

1) 根据开普勒定理计算卫星运行平均角速度

$$n = [GM/a^3]^{1/2} \quad (1)$$

其中  $GM$  采用的是 WGS-84 坐标系地球引力常数

$$GM = \mu = 3986005 \times 10^{14} (\text{m}^3 / \text{s}^2) \quad (2)$$

2) 计算归化时间

$$\Delta t = t - t_0 \quad (3)$$

其中： $t$  为时间； $t_0$  为起始时间。

3) 计算观测历元  $t$  的平近点角

$$M = M_0 + n\Delta t \quad (4)$$

4) 计算偏近点角

$$E = M + e \sin E \quad (5)$$

其中  $M, E$  的单位均为 rad。

5) 计算卫星的地心矢径

$$r = a(1 - e \cos E) \quad (6)$$

6) 计算真近点角

$$f = 2 \arctan(((1+e)/(1-e))^{1/2} \tan(E/2)) \quad (7)$$

7) 计算升交点角距

$$\varphi_0 = \omega_0 + f \quad (8)$$

8) 计算观测历元  $t$  的升交点经度

$$\lambda = \Omega - \omega_{ie} \Delta t \quad (9)$$

9) 计算卫星在轨道直角坐标系中的坐标

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

10) 计算卫星在瞬时地球系中的位置。

轨道直角坐标系经过旋转可以变换到瞬时地球坐标系中，卫星在协议地球坐标系中的位置为

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda & -\sin \lambda \cos i & \sin \lambda \sin i \\ \sin \lambda & \cos \lambda \cos i & -\cos \lambda \sin i \\ 0 & \sin i & \cos i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

### 1.2 信关站覆盖范围模型建立

如图 1 所示，假定低轨卫星星座中所有卫星工

作于一定的轨道高度。为了满足信关站可视仰角中对卫星的可见度，信关站的覆盖范围必须满足距离的要求。

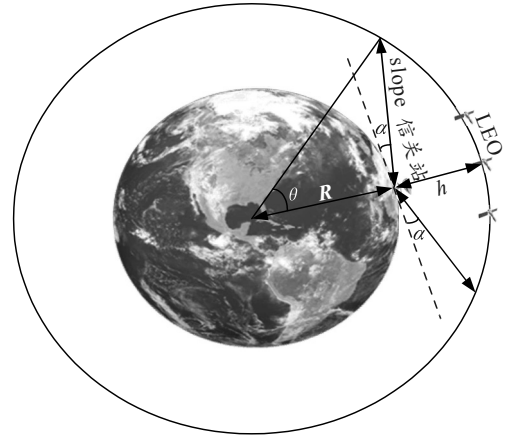


图 1 信关站覆盖范围

图中： $R$  为地球半径，取值为 6 378 km； $h$  为低轨卫星轨道高度；slope 为信关站的覆盖斜距； $\alpha$  为可视仰角，在实际应用中考虑信关站的最小仰角为  $15^\circ$  (紧急情况可降低至  $5^\circ$ )。此处考虑地球为圆球体，根据几何关系可以得到下式：

$$(\text{slope} \cdot \sin \alpha + R)^2 + (\text{slope} \cdot \cos \alpha)^2 = (R + h)^2 \quad (12)$$

如图 1 所示，单个信关站在地表的覆盖区域可以通过下式进行计算：

$$A = 2\pi R_e^2 (1 - \cos \theta) \quad (13)$$

式中： $A$  为波束覆盖面积； $R_e$  为地球半径； $\theta$  为地球中心角。

### 1.3 卫星相对于信关站可见判定方法

若卫星相对于信关站可见，必须在信关站可视仰角及覆盖距离构成的顶空区域范围内。根据信关站和卫星的位置坐标可以进行瞬时距离和高度角的计算。设信关站在地球直角坐标系  $T$  中的位置为  $(x, y, z)_T$ ，卫星在地球直角坐标系  $T$  中的位置为  $(x_s, y_s, z_s)_T$ ，则信关站到卫星的矢量在地球直角坐标系下的表达式为：

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_T = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_T - \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}_T \quad (14)$$

通过坐标变换矩阵可以得到信关站到卫星的矢量在站心直角坐标系  $r$  中的投影：

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_r = C_r^T \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_T \quad (15)$$

式中，由地球直角坐标系  $T$  到站心直角坐标系  $r$  的坐标变换矩阵为：

$$C_T^r = \begin{bmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\varphi\sin\lambda & \cos\varphi \\ -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 \\ \cos\varphi\cos\lambda & \cos\varphi\sin\lambda & \sin\varphi \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中  $\lambda$  和  $\varphi$  分别为信关站的经度和纬度。根据几何关系可以通过下式计算卫星在站心直角坐标系中的瞬时距离和高度角：

$$\left. \begin{aligned} \rho_s &= \sqrt{\Delta x_r^2 + \Delta y_r^2 + \Delta z_r^2} \\ h_s &= \arctan\left(\Delta z_r / \sqrt{\Delta x_r^2 + \Delta y_r^2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中： $\rho_s$  为卫星到信关站间的距离； $h_s$  为卫星相对于信关站的高度角。若卫星在信关站的可见范围内，则计算出的瞬时距离和高度角在设定的门限内。

## 2 信关站部署仿真平台设计与实现

### 2.1 仿真平台功能结构设计

低轨卫星通信系统地面站系统用于地面与卫星之间的通信，能够实现语音、数据、图像等多种业务信息的实时传递，提供无线通信传输信道。信关站数目与位置直接关系到整个网络运行效率、所能提供服务的性能以及系统可靠性等多方面内容。构建基于 Matlab 与 STK 的卫星信关站部署仿真平台，可用于低轨卫星星座系统地面信关站部署仿真与分析。仿真平台结构如图 2 所示，主要有 4 部分功能：

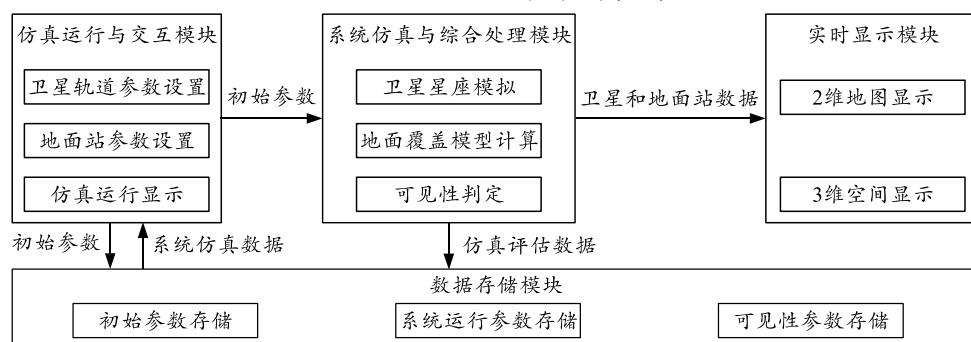


图 2 仿真平台结构模块

### 2.2 基于 Matlab 与 STK 的仿真平台实现

由图 2 可知：基于 Matlab 与 STK 的卫星信关站部署仿真平台功能模块主要由 4 部分组成，利用 Matlab 的图形用户界面 (graphical user interface, GUI) 设计用户界面，实现仿真运行与交互模块，简化用户操作，提升系统仿真便利性。通过 GUI 回调函数编写 M 文件实现系统仿真与综合处理模块以及数据存储模块，并依托 Matlab 与 STK 之间的交

#### 1) 仿真运行与交互模块。

仿真运行与交互模块用于实现人机交互及仿真运行显示，用户可以通过界面对仿真平台进行参数设置和运行。设置参数包括对地面信关站位置、卫星轨道参数、仿真时间等。同时该模块可以对运行结果进行实时显示和绘图，包括地面站部署的显示、卫星和地面站位置的显示以及地面站可见星统计曲线的绘图。

#### 2) 系统仿真与综合处理模块。

系统仿真与综合处理模块用于接收仿真运行与交互模块的各种设置参数。首先对整个通信卫星星座的卫星运行情况进行模拟仿真，根据设定的可视仰角及轨道高度对信关站的覆盖范围进行计算，结合卫星和地面站位置进行可见性判定，获取设定部署情况下的卫星星座可见情况，并将计算的信息进行输出显示和存储。

#### 3) 实时显示模块。

实时显示模块能够对仿真平台中设置的卫星星座以及地面台站进行 2 维和 3 维的实时显示，包括位置信息及地面投影显示、覆盖区域显示以及可见性相对关系显示等。

#### 4) 数据存储模块。

数据存储模块用于接收仿真运行与交互模块、系统仿真与综合处理模块的所有数据，包括用户设置的地面信关站参数、卫星星座轨道数据以及可见性统计值等。

互接口，基于 STK 软件完成实时显示模块的实现。

用户可以通过仿真运行与交互模块的主界面进行仿真运行的显示和控制。如图 3 所示，主界面能够实时显示卫星位置信息、地面站位置信息以及地面部署图等显示。如图 4 所示，仿真参数设置子界面可以设置仿真初始条件，包括仿真时间、卫星轨道参数等。如图 5 所示，STK 实时显示界面可以实现设置条件下的地面站部署与卫星星座的可视化。

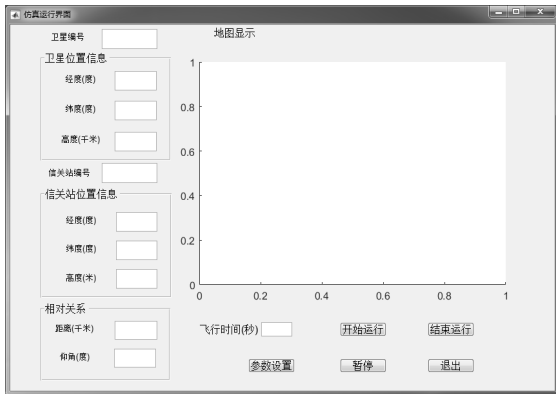


图 3 仿真平台主界面



图 4 仿真参数设置子界面

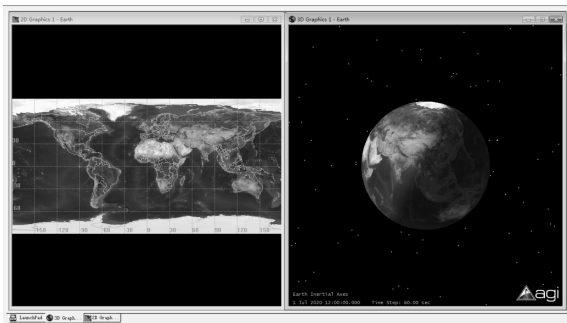


图 5 STK 实时显示界面

在仿真平台中，用户只需设计一个仿真方案，并进行相应的参数设置，就可以验证不同情况下的卫星可见性情况，大大降低了仿真的工作量，同时可以有效支撑地面站部署仿真工作。

### 3 仿真平台应用分析

#### 3.1 仿真参数设置

参照 OneWeb 系统进行卫星星座仿真参数设置，包括 720 颗卫星，分布在 18 个轨道面，每个轨道面 40 颗卫星实现全球覆盖。轨道高度为 1 200 km，偏心率为 0，轨道倾角为 86.5°，轨道面经度分布范围为 185°。

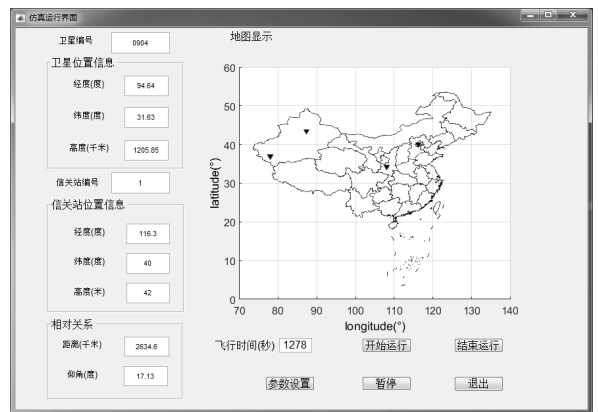
地面信关站在选址部署方面，考虑地面站周边的物理遮挡、电磁环境、气候条件、地质地貌条件、维护管理等因素。假设地面信关站的可视仰角为 15°，优先在省会城市范围内选取典型信关站站址进行部署仿真分析。站址选取如表 1 所示。

表 1 信关站选址信息 (°)

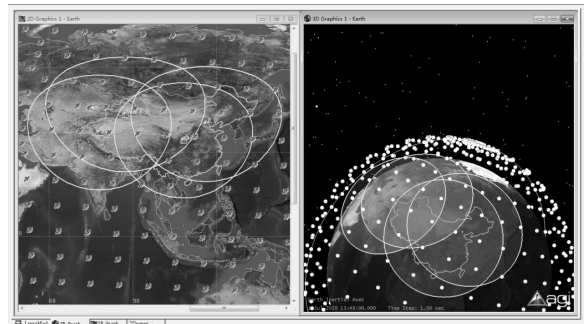
序号	站址	经度	纬度
1	北京	116.3	40.0
2	西安	108.1	34.2
3	喀什	78.0	37.0

#### 3.2 仿真结果分析

根据上述参数设置，仿真运行总时间为 48 h，利用设计实现的仿真平台进行低轨通信星座的信关站部署仿真，统计一定时间范围内不同站址信关站的可见卫星数目，从而便于在信关站部署过程中对选址的位置和数量进行合理配置。仿真运行显示如图 6 所示。



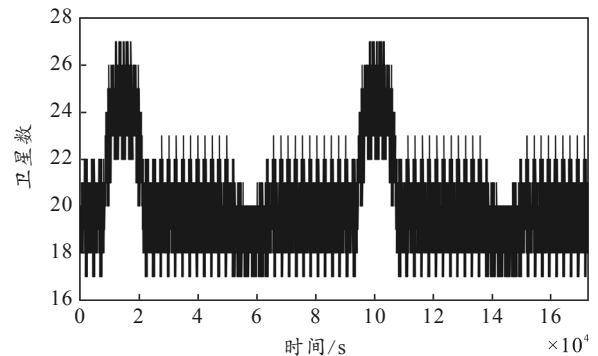
(a) GUI 界面显示



(b) STK 界面显示

图 6 仿真运行显示

如图 7 所示，根据存储的可见星数据，可以得到仿真部署信关站的可见星数统计曲线。



(a) 北京信关站

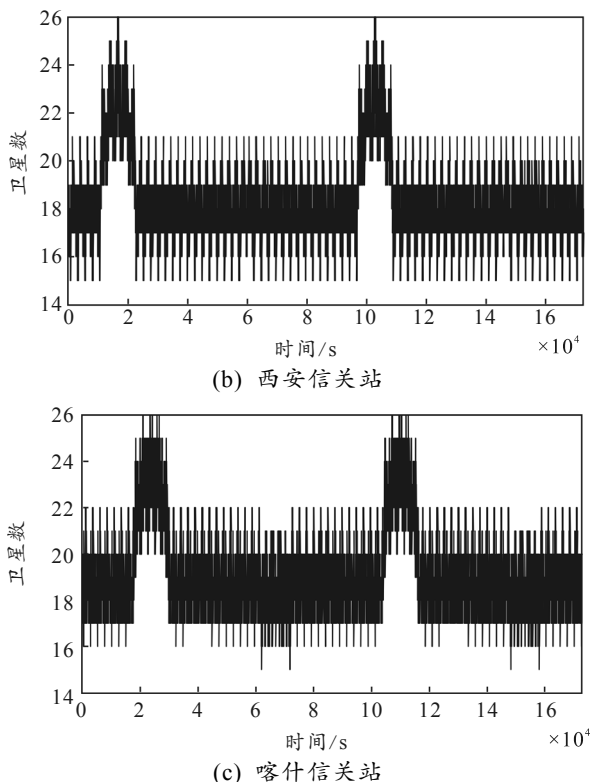


图 7 不同站址可见星数统计曲线

不同站址可见星数统计如表 2 所示。

表 2 不同站址可见星数统计

序号	站址	可见星数		
		最大值	最小值	平均值
1	北京	27	17	20
2	西安	26	15	18
3	喀什	26	15	19

根据上述图表可知：笔者设计的基于 Matlab 与 STK 的卫星信关站部署仿真平台可以有效地对卫星星座运行、地面部署及覆盖情况进行可视化显示。同时，平台可以对每个信关站的可见卫星情况进行统计分析，如北京站在仿真运行时间内可见星数最大值为 27，最小值为 17，平均数为 20，可以为北京站接入网天线配置数量提供参考，并且评估北京站接入卫星数量整体情况。

#### 4 结论

笔者在建立卫星星座及信关站系统仿真模型基础上，结合 Matlab 的图形用户界面以及 STK 软件，设计了一套卫星信关站部署仿真平台，提供了大量的可调参数，且平台功能可拓展，有效支撑卫星星座与地面信关站的接入与覆盖情况仿真。仿真结果表明：该平台能对不同信关站选址情况下的卫星可见性及地面站覆盖情况进行分析与可视化呈现，可用于指导地面信关站选址部署以及单站的天线数量配置。

#### 参考文献：

- [1] HAN W, WANG B, FENG Z, et al. Exploring the Gateway-Based Distributed Location Management Schemes in LEO Satellite Networks[J]. ICE Transactions on Communications, 2018, 101(3): 825-834.
- [2] MUSUMPUKA R, WALINGO T M, SMITH J M. Performance Analysis of Correlated Handover Service in LEO Mobile Satellite Systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11): 2213-2216.
- [3] 方芳, 吴明阁. 全球低轨卫星星座发展研究[J]. 飞航导弹, 2020(5): 88-92, 95.
- [4] 王毅, 李新华, 王新荣. 低轨星座地面通信应用系统初步设计[J]. 通信技术, 2019, 52(3): 628-634.
- [5] XU J, BIAN D, WANG C, et al. Satellite Constellation Based on High Elevation Angle for Broadband LEO Constellation Satellite Communication System[J]. IEICE Transactions on Communications, 2019, 102(10): 1960-1966.
- [6] 莫宇. 低轨卫星通信星座多目标优化设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [7] 徐军, 张更新, 边东明, 等. 面向宽带 LEO 星座卫星通信系统星座的轨道高度与边缘通信仰角优化设计[J]. 信息通信, 2019(1): 26-30.
- [8] 薛中伟. 卫星地面站建站选址策略研究[J]. 信息通信, 2017(5): 201-202.
- [9] 邸高高. Ka 频段卫星地面系统选址分析[J]. 电信网技术, 2016(6): 61-67.