

一种适用于远距离星间链路通信的设计

何 杉, 高翠东, 王 淦, 黄繁荣

(航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 为解决远距离星间通信时存在的两星之间通信视场变窄甚至星间通信信号中断等问题, 提出了一种适用于远距离星间链路通信的设计; 该设计采用将卫星上的星间发射、接收天线按照天线波束指向计算得到的调整角度进行倾斜安装、采用窄波束、高增益的星间发射、接收天线以及采用卷积编码作为信道编码方式等设计方法; 通过两星之间通信视场可见性分析及计算、星间链路信道分析及余量计算和使用 STK 软件进行星间通信视场仿真覆盖性分析进行了验证, 结果表明: 该设计能够保证两星之间满足星间通信视场的可见性要求, 星间链路信道余量满足正常通信的要求; 该星间通信链路设计能够适用于远距离的星间链路通信, 可为小卫星编队飞行及其它低轨航天器之间进行远距离星间通信提供设计参考。

关键词: 星间链路通信; 远距离; 小卫星; 通信视场

An Inter-satellite Links System Design for the Long Distance Communication

He Shan, Gao Cuidong, Wanggan, Huang Fanrong

(DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China)

Abstract: In order to solve the problem of narrowing of the field of view and signal interruption in the long distance intersatellite communication, a design for the long distance inter-satellite link communication is proposed. The design uses the inter-satellite emission and receiving antenna to be tilted to install according to the adjustment angle calculated by the antenna beam direction, uses the narrow beam, high gain inter-satellite emission and receiving antenna and uses convolution coding as channel coding. By the visibility analysis and calculation of communication field of view, the inter satellite link channel analysis and allowance calculation and the coverage analysis of field simulation of inter satellite communication using STK software, the results show that the design can ensure to meet the visibility of inter satellite communication, the inter satellite link channel allowance to meet the requirements of normal communication. The design is suitable for the long distance communication, and it is applicable to small satellites and other LEO satellites.

Keywords: inter-satellite links communication; long distance; small satellite; communication field of view

0 引言

近年来, 低轨小卫星编队飞行星座凭借其好、快、省的优势, 已成为国内外航天领域研究的热点。为了有效地利用编队飞行中的每颗小卫星的信息来完成一颗“虚拟大卫星”所要完成的复杂航天任务, 小卫星之间要进行大量数据传输、交换、处理等, 因此编队飞行小卫星之间必须建立可靠的星间链路, 通过星间链路把多颗小卫星互联在一起, 形成一个以卫星为交换节点的空间通信网络, 因此星间链路通信是小卫星编队飞行的关键技术之一, 其性能的好坏直接决定由编队卫星组成的“虚拟大卫星”能否高效可靠地完成空间任务^[1-3]。

卫星星间链路的研究工作在国内外开展的比较早, 已经在国际上得到了较为广泛的应用, 主要用于跟踪与数据中继卫星系统、军事通信系统、中低轨道通信卫星网络系统以及海洋和地面观测卫星系统等。我国关于星间链路的研究虽然起步较晚, 但是近年来随着小卫星技术的发展, 我国卫星应用和航天技术发展提出对卫星编队系统的要求, 中国航天科技集团、中科院下属所及国内许多大学都积极开展卫星编队飞行星座系统项目研究, 对星座的星间通信链路也开展研究试验^[4]。

传统的同一轨道平面内的星间链路由于基本保持不变的相对位置, 轨内星间链路的星间距离、方位角和俯仰角变化很

小, 且小卫星星座的星间通信距离一般在几十公里到几百公里距离, 仅需要使用固定波束星间收发天线即可实现星间通信。但随着小卫星远距离编队飞行的应用, 星间通信距离也相应地增大(1~5千公里), 由此带来了星间通信信号衰减急剧加大, 星间通信视场受到球面轨道的影响导致星间通信链路的视场逐渐变窄, 甚至中断等问题, 传统的星间链路设计已经不能满足远距离星间链路通信的需求。本文基于现有小卫星星间链路系统设计, 针对上述问题, 提出了一种改进系统设计, 有效地解决了远距离星间通信时遇到的上述问题。

1 传统星间链路设计及其局限性

传统星间链路设计时, 同一轨道面内前后飞行的两颗卫星(A星和B星)的星间链路系统分别配备一套星间发射设备(包括一台星间发射机、一副星间发射天线)和一套星间接收设备(包括一台星间接收机、一副星间接收天线)。A星星间发射机通过星间发射天线调制发射星间传输信息, B星星间接收机通过星间接收天线接收解调星间传输信息^[5]。

由于A星的一X面安装星间发射天线, 天线电轴法向与卫星-X轴平行, B星的+X面安装星间接收天线, 天线电轴法向与卫星+X轴平行, 因此当两星距离较近时, 球面轨道在两星之间近似为直线, 近距离星间通信时, 两星之间视场不受影响。

但随着两颗星之间星间通信距离的增大, 会出现通信链路信号逐渐减弱甚至不能正常接收解调信号的现象、以及通信链路视场会受到球面轨道的影响导致星间通信链路视场变窄甚至

收稿日期: 2017-12-17; 修回日期: 2018-01-14。

作者简介: 何 杉(1985-), 男, 江西南昌人, 硕士, 工程师, 主要从事航天器通信系统设计方向的研究。

中断的情况, 即星间发射天线波束不能覆盖星间接收天线波束。

因此星间通信距离的增大, 不仅影响了星间链路通信信号强弱, 还影响了两星之间星间发射、接收天线的通信共视视场。传统的星间链路系统设计已经不能满足远距离星间通信的需求。

2 星间链路系统改进设计

针对传统星间链路系统设计在远距离星间链路通信时存在的问题, 提出了一种改进系统设计^[6], 主要包括 3 个方面: 1) 将与卫星 +X 轴和 -X 轴平行的星间发射、接收天线按照预先计算的指向调整角度调整星间发射、接收天线的安装方位, 从而使星间发射天线、接收天线波束电轴法向分别相对于卫星的 +X 轴和 -X 轴方向偏置固定角度, 重新构建星间通信链路, 使星间通信视场恢复; 2) 星间发射天线、接收天线采用具有波束窄、增益高的天线, 以补偿远距离通信时信号能量的衰减; 3) 采用卷积编码作为信道编码方式, 在星间发射设备上对信息进行卷积编码, 在星间接收设备上对信息进行维特比译码, 降低接收设备的解调门限和接收解调误码率, 提高信道的链路余量, 系统设计框图分别如图 1 和 2 所示。

图 1 为星间发射、接收天线的系统设计框图, 其中 A 星为星间发射系统, B 星为星间接收系统。系统设计时, 分别调整 A 星星间发射天线和 B 星星间接收天线在星体上的安装方位, 使 A 星的星间发射天线波束法向和 B 星的星间接收天线波束法向与星体 +X 轴和 -X 轴的法向夹角为 β 角度, 重新构建星间通信链路。

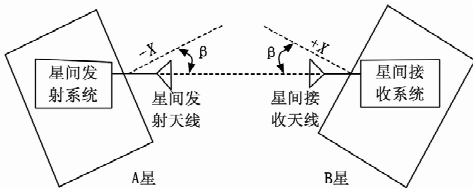


图 1 星间链路系统设计框图

图 2 为星间发射系统和星间接收系统的系统设计框图。图中 A 星星间发射系统对传输信息进行卷积编码、扩频调制、成型滤波、载波调制、上变频和功率放大后给星间发射天线辐射输出; B 星星间接收系统通过星间接收天线接收到星间射频信号后, 经低噪声放大、下变频、解调解扩和维特比译码后恢复出传输信息。

在小卫星体积空间小、质量和功耗受限等因素制约的前提下, 使用伺服控制机构或者相控阵天线来控制星间天线指向实现星间链路通信将受到严重的制约, 但通过将星间发射、接收天线按照指向调整角度进行倾斜安装、采用窄波束、高增益的星间发射、接收天线以及采用卷积编码作为信道编码方式等系统设计即可实现满足两星远距离星间通信视场可见且正常接收解调信号的需求, 又不受其它因素的制约。

3 星间通信视场分析

星间通信视场可见需要星间发射天线波束覆盖星间接收天线波束, 由于星间通信距离的增大, 星间通信视场会受到球面轨道的影响导致星间通信链路视场变窄甚至中断的情况, 根据第 2 节的设计, 需要计算出在一定距离范围内, 星间天线指向

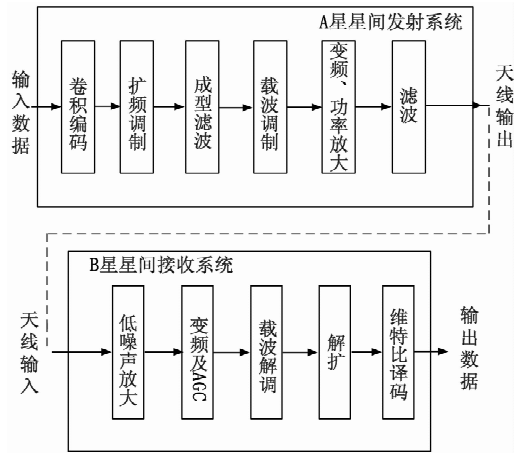


图 2 星间链路系统设计框图

调整的角度 β , 以确保星间发射天线波束视场能够准确覆盖星间接收天线波束视场。本节针对星间天线波束指向调整角度进行了理论计算和分析。

根据第 2 节的系统设计, 分别调整 A 星星间发射天线和 B 星星间接收天线在星体上的安装方位, 使 A 星的星间发射天线波束法向和 B 星的星间接收天线波束法向与星体 +X 轴和 -X 轴的法向夹角为 β 角度, 如图 3 中黑色粗线覆盖区域为星间发射天线沿 A 星星体 -X 轴倾斜 β 角度和星间接收天线沿 B 星星体 +X 轴倾斜 β 角度之后, 两天线波束之间的可见视场。图 3 中 α 为 A 星星间发射、B 星接收天线的波束宽度, β 为 AB 星星间发射、接收天线电轴法向从平行于卫星 +X 轴和 -X 轴方向到与 AB 星星间连线之间的转动角度, θ 为 A 星、B 星之间所夹弧的圆心角度。R 为卫星轨道半长轴 (A 星、B 星轨道高度相同), r 为地球半径, h 为卫星飞行高度。d 为 AB 星之间直线距离。

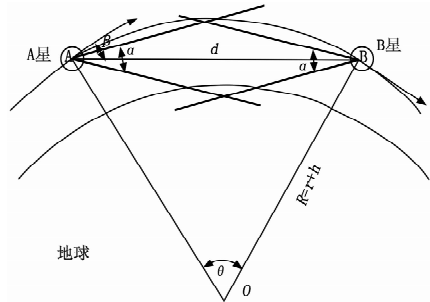


图 3 改进设计后远距离星间通信视场覆盖

由于 A、B 星在轨飞行轨道近似为同一轨道面的圆轨道, 因此 A 星、B 星的 X 轴法向正切于卫星轨道面, 且通过弦切角定理得知, 倾斜角度 β 等于它所夹的弧所对的圆心角度数 θ 的一半, 计算公式如下:

$$\beta = \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

其中: 圆心角度数 θ 可以通过公式 2 计算得到, 公式中 R 为卫星的轨道半长轴、d 为 AB 星之间的星间直线距离。

$$\frac{\theta}{2} = \arcsin\left(\frac{d/2}{R}\right) \quad (2)$$

因此通过对两颗星之间星间天线波束指向调整角度 β 的计

算公式的推导, 可知两星之间星间天线的指向调整角度 β 仅需要事先知道两颗卫星之间的星间直线距离 d , 以及卫星的轨道半长轴 R , 即可通过公式 (1) 和公式 (2) 计算得到。

由于星间发射和接收天线采用固定波束天线, 天线波束指向角度的调整只能通过调整天线在星体上的安装方位来实现, 即通过对星间发射天线沿星体 $-X$ 轴倾斜 β 角度和对星间接收天线沿星体 $+X$ 轴倾斜 β 角度进行安装, 即可实现星间通信视场的可见。

4 星间通信链路分析

为解决远距离星间通信所带来的信号衰落变大问题, 本设计采用了高增益的星间发射、接收天线, 以及采用了卷积编码作为信道编码方式, 以保证星间链路通信信道余量满足通信要求。本节对整个星间通信链路进行了链路余量计算和分析。

星间通信链路是指从星间发射信源到星间接收信宿的整个通信路径: 从星间发射信源开始, 传输信息通过编码和调制由星间发射机功率放大后经由信道到达星间接收机进行解调和译码出传输信息后结束于星间接收信宿。图 4 给出了一个典型的由星间发射端到星间接收端的星间通信链路模型图。其中星间链路的传输损耗主要包括 3 个部分: 空间损耗、介质损耗和解调损耗。其中空间损耗主要包括 3 个部分: 自由空间传播损耗、极化损耗、发射和接收天线指向损耗, 介质损耗主要包括: 发射馈线和无源部件损耗、接收馈线损耗^[6]。

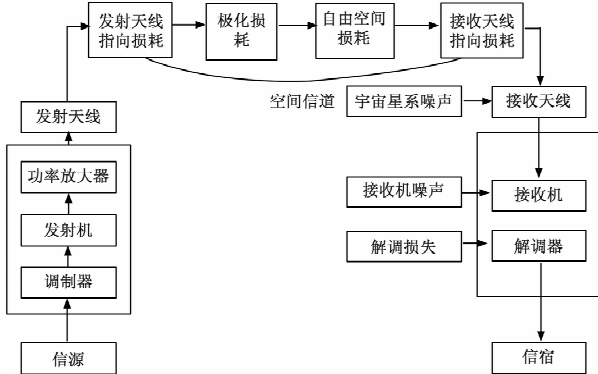


图 4 星间通信链路模型图

本设计中星间通信链路工作频段为 X 频段, 星间通信距离为 5000 公里, 调制和编码方式采用二进制相移键控 (BPSK) 调制和卷积编码方式编码。在满足误码率要求 $P_e = 10^{-6}$ 时对应解调所需 E_b/N_0 的最小理论要求值为 10.5 dB 的情况下进行了链路余量分析。

星间发射 EIRP 通信方程可表示为:

$$EIRP = P_F + G_F - L_F \quad (3)$$

其中: P_F 为星间发射机输出功率, G_F 为星间发射天线增益, L_F 为发射馈线和无源部件损耗。

接收信号的载噪功率谱密度比 (C/N_0) 通信方程可表示为:

$$C/N_0 = EIRP - L_{SS} - L_P + (G/T)_{SS} - k \quad (4)$$

其中: $(G/T)_{SS}$ 为星间接收天线增益与接收系统等效噪声温度之比, L_{SS} 为自由空间传播损耗, L_P 为极化损耗, k 为玻尔兹曼常数。

星间通信链路余量 (M) 通信方程可表示为:

$$M = C/N_0 - 10\lg(R) + G_C - L_{Dem} - (E_b/N_0)_{Require} \quad (5)$$

其中: R 为信息码速率, G_C 为编码增益, L_{Dem} 为解调损失, $(E_b/N_0)_{Require}$ 为理论解调 E_b/N_0 值。

按照上述公式 (3) ~ (5), 对星间通信链路进行具体计算如表 1 所示。

表 1 星间通信链路计算表

| 参数名称 | 单位 | 典型值 |
|-----------------------------|----------|--------|
| 轨道参数 | | |
| 最大传输距离 d | km | 5000.0 |
| 卫星发射参数 | | |
| 载波频率 F | MHz | 8000 |
| 发射天线增益 G_F | dBi | 17 |
| 发射功率 P_F | W | 2 |
| | dBW | 3.0 |
| 发射馈线和无源部件损耗 L_F | dB | 2 |
| 星上发射 EIRP | dBW | 18.0 |
| 信道参数 | | |
| 指向误差损耗 | dB | 0 |
| 自由空间传播损耗 L_{SS} | dB | 184.8 |
| 极化损失 L_P | dB | 0.5 |
| 接收参数 | | |
| 接收天线增益 G_{SS} | dBi | 17 |
| 接收馈线损失 L_S | dB | 1 |
| 接收机噪声系数 I_S | dB | 2.5 |
| 天线噪声温度 T_S | K | 50 |
| 接收系统等效噪声温度 T_{SS} | K | 364.4 |
| | dBK | 25.6 |
| 接收 G/T 值 $(G/T)_{SS}$ | dB/K | -9.6 |
| 接收信号强度 | dBm | -121.3 |
| 数据恢复 | | |
| 玻尔兹曼常数 k | dBW/Hz/K | -228.6 |
| 接收载噪功率谱密度比 (C/N_0) | dBHz | 51.7 |
| 码速率 R | bps | 2048 |
| 未编码所需 $(E_b/N_0)_{Require}$ | dB | 10.5 |
| 编码增益 G_C | dB | 4 |
| 解调损耗 L_{Dem} | dB | 3 |
| 系统余量 M | dB | 9.1 |

由表 1 可知, 在星间发射机输出功率 2 W、星间发射天线增益 17 dBi、星间发射 EIRP 18 dBW、星间接收天线增益 17 dBi、星间接收 G/T 值为 -9.6 dB/K 以及星间传输信息码速率 2 048 bps 情况下, 计算得到整个星间链路余量为 9.1 dB, 满足通信余量大于 3 dB 的要求, 星间接收机接收信号强度为 -121.3 dBm, 大于星间接收机接收灵敏度 -124 dBm。

因此通过采用高增益星间发射、接收天线, 以及采用卷积编码作为信道编码方式, 可以满足远距离星间通信的要求。

5 星间通信视场仿真分析

针对第 2 节中提出的天线安装方位改进设计以及第 3 节中对星间通信视场和天线指向调整角度的理论计算分析, 本节使用 STK 软件进行了星间通信视场仿真覆盖性分析, 以验证天线指向调整角度理论计算的正确性^[7]。

A 星、B 星仿真条件如下: 1) 卫星运行轨道为太阳同步轨道; 2) 卫星轨道高度为 700 km, 倾角为 98.27°; 3) 卫星

间相对距离为 5000 km; 4) 卫星间发射天线、接收天线波束宽度为 5°; 5) A 星为星间链路系统中的星间发射卫星, B 星为星间接收卫星。

5.1 仿真设置

利用 STK 软件对两星星间链路通信视场可见性进行了仿真分析, 仿真设置如下:

1) 在 STK 软件中创建仿真场景, 创建场景对象卫星 SatA、SatB; 对 SatA 和 SatB 进行轨道参数设置, 仿真时间设置为 1 Dec 2017 00: 00: 00—2 Dec 2017 00: 00: 00 (UTCG), 坐标系选择 J2000;

2) 分别给 SatA 和 SatB 添加传感器对象 (Sensor) 星间发射天线 ATTEN1、星间接收天线 ATTEN2; 天线半波束角度 (Cone Angle) 设置为 2.5°; 指向类型为指定轴的固定方式 (Fixed in Axes), 方位方式为方位角—仰角 (Az—El), 可根据天线 ATTEN1、ATTEN2 在 SatA 和 SatB 上的安装位置设置天线俯仰角。

5.2 星间通信视场仿真

1) 根据传统星间链路设计, A 星的一 X 面星间发射天线电轴法向与卫星一 X 轴平行, B 星的+X 面星间接收天线电轴法向与卫星+X 轴平行, 设置天线 ATTEN1 在 SatA 上方位角 (Azimuth) 为 180°, 俯仰角 (Azimuth) 为 0°; 设置天线 ATTEN2 在 SatB 上方位角 (Azimuth) 为 0°, 俯仰角 (Azimuth) 为 0°。

在 STK 中调整 A 星与 B 星之间的相对距离, 通过仿真得到: 当 A 星、B 星之间的相对距离达到 616.84996 km 时, 星间天线的仰角 (半波束角) 已经为 -2.5°, 即已经到星间天线波束的边缘, 可见视场变窄, 如表 2 和图 5 所示。如果 A 星与 B 星之间的相对距离进一步增大, 则 A 星与 B 星的星间通信可见视场则会中断。

表 2 A 星和 B 星之间相对位置关系

| Time (UTCG) | Azimuth/deg | Elevation/deg | Range/km |
|--------------------|-------------|---------------|------------|
| 2017-12-1 0:00:00 | 180 | -2.5 | 616.84996 |
| 2017-12-1 0:01:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |
| 2017-12-1 0:02:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |
| 2017-12-1 0:03:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |
| ... | ... | ... | ... |
| 2017-12-1 23:56:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |
| 2017-12-1 23:57:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |
| 2017-12-1 23:58:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |
| 2017-12-1 23:59:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |
| 2017-12-2 0:00:00 | 180 | -2.5 | 616.849961 |

2) 根据远距离星间通信链路的应用, 星间通信距离可达 1~5 千公里, 根据第 3 节中星间天线的指向调整角度计算公式, 计算出天线波束法向与两星连线夹角对应表如表 3 所示。

表 3 天线波束法向与两星连线夹角对应表

| 两星连线距离/km | $\theta/(^{\circ})$ | $\beta/(^{\circ})$ |
|-----------|---------------------|--------------------|
| 5000 | 41.41 | 20.70502 |
| 4000 | 32.86 | 16.4301 |
| 3000 | 24.495 | 12.24744 |
| 2000 | 16.26 | 8.130181 |
| 1000 | 8.1097 | 4.054846 |

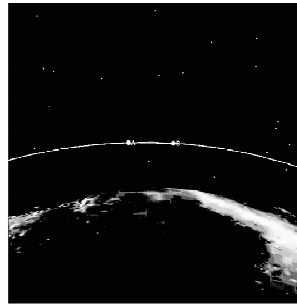


图 5 A 星与 B 星相对距离达到 616.84996 km 时可见视场仿真

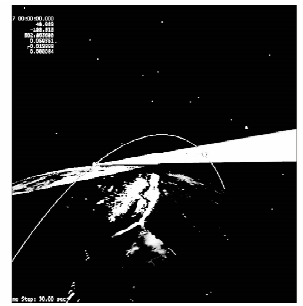


图 6 A 星与 B 星相对距离达到 5000 km 时可见视场仿真 (指向角度调整后)

本节仿真以两星之间相对距离 5000 公里为例, 因此指向调整角度 β 设置为 20.70502°。在 STK 中设置天线 ATTEN1 在 SatA 上方位角 (Azimuth) 为 180°, 俯仰角 (Azimuth) 为 20.70502°; 设置天线 ATTEN2 在 SatB 上方位角 (Azimuth) 为 0°, 俯仰角 (Azimuth) 为 20.70502°, 以调整星间天线的指向角度, A 星与 B 星可见视场仿真如图 6 所示。由图 6 可见, A 星与 B 星的星间通信视场重新为可见状态。

5.3 仿真结果

通过上述仿真表明, 采用传统星间天线的安装方式, 星间通信视场随着星间距离的增大逐渐变窄, 但根据不同的星间距离来计算、调整星间天线的安装指向角度, 即可实现从不调整指向角度前的视场不可见状态重新恢复到视场可见状态。通过本仿真验证了第 3 节中计算天线指向调整角度方法的合理可行, 在实际工程应用中, 通过对天线指向调整角度的计算, 并将此角度用于星间天线在星体上的安装方位的调整即可, 工程实现简单、实用性强。

6 结束语

本文针对远距离星间通信时, 传统星间链路设计方案的局限性和不足提出了改进设计, 并对改进设计进行了理论计算和仿真分析验证, 验证结果表明: 远距离星间通信时, 采用按照预先计算的指向调整角度调整星间发射、接收天线的安装方位; 采用窄波束、高增益星间发射、接收天线以及采用卷积编码作为信道编码方式的设计, 可以解决远距离星间链路通信时, 两星之间的通信视场及链路余量问题。本文立足于现有小卫星星间链路系统进行的改进设计, 其设计方法不仅适用于低轨小卫星编队飞行星座, 对于其它中低轨道航天器进行远距离星间链路通信系统设计也具有参考和借鉴意义。

参考文献:

[1] 吴国强, 孙兆伟, 赵丹, 等. 编队小卫星星间通信系统的发展和趋势 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39 (11): 1700-1701.
 [2] 熊群力, 姜康林. 航天编队飞行星座的星间通信 [J]. 无线电通信技术, 2004, 30 (1): 1-2.
 [3] 左莉华. 小卫星测控通信技术现状及发展思考 [A]. 2011 年小卫星技术交流会论文集 [C]. 2011.
 [4] 陈佳宝. 低轨道编队小卫星星间链路设计分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
 [5] 梁俊明. 卫星通信系统星间链路设计研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
 [6] 孙蕊. 面向微小卫星编队的星间链路一体化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
 [7] 丁溯泉, 张波, 刘世勇. STK 在航天任务仿真分析中的应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.