

LEO 卫星接入 TDRSS 的可行性分析与仿真

曾德贤^① 董绪荣^② 李睿^①

^①(装备指挥技术学院研究生院 北京 101416)

^②(装备指挥技术学院 北京 101416)

摘要: 该文讨论了使用固定天线和中低发射功率的 LEO 卫星接入到跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS), 并通过跟踪与数据中继卫星(TDRS)来实现空-地数据传输的可行性。文中给出了 LEO 卫星与 TDRS 进行通信需满足的前提条件, 提出了通过计算机仿真来计算 LEO 卫星与 TDRS 全天通信时间和通信业务量的一般思路 and 具体实现方法, 为论证具有固定天线的 LEO 卫星接入 TDRSS 的可行性提供了依据。

关键词: 低轨道; 中继卫星; 业务量; 数据传输

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0772-04

Feasibility Analysis and Simulation of LEO Satellite Accessing to the Tracking and Data Relay Satellites System

Zeng De-xian^① Dong Xu-rong^② Li Rui^①

^①(Department of Postgraduate, The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

^②(The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: This paper discusses the feasibility of LEO satellite of fixation antenna and low or middle power accessing to the TDRSS and realizing space-ground data transmission through TDRS. The precondition of communication between LEO satellite and TDRS are given, then the general idea and method of computing the data throughout in bits and on day are provided by computer simulation, this method provides bases to test the feasibility of LEO satellites of fixation antenna accessing to the TDRSS.

Key words: Low Earth Orbit (LEO); Tracking and Data Relay Satellite (TDRS); Traffic; Data transmission

1 引言

近年来, 随着卫星通信事业的迅速发展, 传统的静止轨道 (Geosynchronous satellite, GSO) 卫星系统由于轨道高, 传输路径长, 信号时延和衰减都非常大, 已不能满足市场需求, LEO 卫星通信系统成为未来卫星通信发展的主要方向^[1]。人们越来越多地开始使用 LEO 卫星来完成空间研究、卫星气象、卫星地球探测等各种空间科学任务, 这推动了卫星与地面用户之间的数据传输的研究。

卫星通信中一个急需解决的问题就是地面段和空间段的数据传输问题。最常见的数据传输方式是每颗卫星分配一个地面站, 当卫星过顶时对其进行跟踪并接收数据^[2]。但 LEO 卫星离地面近, 相对地球站的运动速度快, 因此, 地球站与卫星交换信息的通信时间短。当卫星与地面站不可见时, 大量数据只能在卫星上暂存, 时效性差, 而且大量的存储设备使星上的载荷能力减弱。为了延长地球站与 LEO 卫星之间的通信时间, 可利用 TDRS 来实现中低轨卫星与地面站之间的数据转发^[3]。

考虑到使用方向性天线对卫星重量、功耗和复杂度的要求, 传统的小卫星一般使用宽波束的固定天线与地面站直接

进行通信^[2]。本文讨论了使用固定天线和中等发射功率的 LEO 卫星接入到跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS), 通过 TDRS 来实现空地数据传输的可行性。由于 LEO 卫星与 TDRS 之间仍然不能保持全天不间断的通信, 因此, 全天通信时间和业务量是系统的重要参数^[4], 它与卫星的 EIRP, G/T 值, 信息传输速率, 链路损耗等有关。本文给出了 LEO 卫星与 TDRS 可通性的判断依据, 并提出了通过计算机仿真来计算 LEO 卫星与 TDRS 实时通信的时间和全天通信业务量以论证该方案可行性的方法。

2 可通性判断

研究 LEO 卫星通过 TDRS 实现与地面站之间转发数据, 就要涉及到 LEO 卫星与 TDRS 这样两种运行在不同轨道上的卫星之间的通信问题。因此, 首先要判断 LEO 卫星与 TDRS 之间的可通性, 即判断两卫星之间是否可以实现正常通信, 判断可通性可以按以下步骤进行。

2.1 相互可见

卫星 A 和卫星 B 在某一时刻的空间位置关系如图 1 所示。设卫星 A 和卫星 B 在地心惯性坐标系中的位置坐标分别为 (x_A, y_A, z_A) 和 (x_B, y_B, z_B) , r_A 和 r_B 分别为卫星 A 和卫星 B 的地心矢量, ρ 为卫星 B 指向卫星 A 的矢量, d 为地心

到两卫星之间连线的距离。考虑到大气层对卫星通信之间的影响,需要设计一个通信的最低高度 h_0 , 一般 $h_0 \approx 220\text{km}$ 。设地球半径为 R , 则当 $d > R + h_0$ 时, 两卫星相互可见。

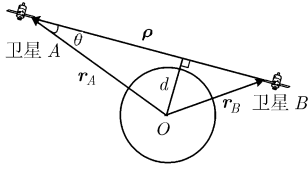


图1 用户星与中继星的空间位置关系

2.2 相互覆盖

假设两个卫星 A 和 B 的天线指向矢量位置关系如图2所示。其中 D_A , D_B 是两颗卫星在 ECF (Earth-Centered Fixed, 地心固连坐标系) 坐标系中的位置矢量, P_A , P_B 是星载天线指向矢量, P_{AB} 是卫星 A 指向 B 的矢量, $\theta_{0.5A}$ 、 $\theta_{0.5B}$ 分别为卫星 A 和 B 天线的半功率波束宽度。

$$\begin{cases} P_{AB} = D_A - D_B \\ P_{BA} = D_B - D_A \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \cos \alpha = \frac{P_A \cdot P_{AB}}{|P_A| |P_{AB}|} \\ \cos \beta = \frac{P_B \cdot P_{BA}}{|P_B| |P_{BA}|} \end{cases} \quad (2)$$

若同时满足 $\alpha < \theta_{0.5A}/2$ 和 $\beta < \theta_{0.5B}/2$, 则卫星 A 和卫星 B 可以相互覆盖。

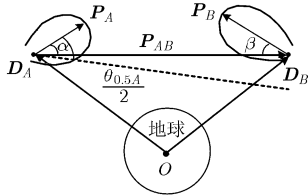


图2 星载天线指向模型示意图

2.3 载噪比

载噪比就是接收系统输入端的载波功率与噪声功率之比值,它是确定一条卫星通信链路传输质量的最主要指标,也是判断链路可通性的重要标准。载噪比可以表示为^[5]:

$$C/N = \frac{P_t G_t(\theta) G_r(\phi)}{k(T_R + T_I)BL} \quad (3)$$

式中 C 为接收信号功率, P_t 是 LEO 卫星的信号发射功率, θ 为发射天线在接收天线方向上的离轴角, $G_t(\theta)$ 为发射机在角度 θ 方向上的天线增益, ϕ 为接收天线在发射天线方向上的离轴角, $G_r(\phi)$ 为接收机在角度 ϕ 方向上的天线增益, k 为玻尔兹曼常数 ($1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$), T_R 为反向链路热噪声的等效噪声温度, T_I 为互调噪声的等效噪声温度, B 为接收机带宽, L 为全部传输损耗(包括自由空间传输损耗、馈线损耗、

天线跟踪误差损耗、极化误差损耗等)。设载噪比的门限值为 $[C/N]_{th}$, 在 $[C/N] > [C/N]_{th}$ 的时段内, 认为两星之间可以通信。

可通性 3 个条件的判定顺序依次为: 判断两卫星是否相互可见、是否相互覆盖、载噪比是否满足要求, 这是由于考虑到后面的条件与前面的相比, 对可通性的限定更为严格, 因此在进行计算机仿真时, 若前一个条件不被满足就不必再进行后面条件的判断而直接认为两卫星之间不可通, 从而达到减少计算程序的负担和程序运行时间的目的。

3 仿真分析

3.1 仿真程序的原理

由于 LEO 卫星相对于 TDRS 的位置是随时间不断变化的, 因此, 要计算两卫星的通信时间, 首先要将时间离散化, 在每个时间采样点上可认为两卫星的相对位置是固定的, 根据一定的初始参数计算出该采样点上卫星之间的相对几何关系, 判断是否满足上述正常通信的条件。记录每次的通信时间, 在整个时段内对其进行累加, 最终就得到了整个仿真时间内总的通信时间。图3为仿真程序的流程图。

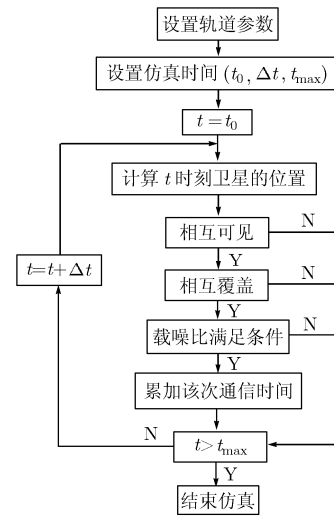


图3 仿真流程图

3.2 仿真程序的输入

仿真程序输入为 LEO 卫星网络中各卫星的初始轨道参数, 包括轨道高度、轨道倾角、真近点角、升交点赤经等。除了设置卫星的轨道参数外, 还要按照要求的精度选取合适的仿真步长 Δt , 设定总的仿真时间 t_{max} 以及仿真开始时刻 t_0 。一旦设定了卫星的初始轨道参数, 就可以计算出卫星在任意时刻的位置^[6, 7]。利用卫星绕地球运行的轨道方程、卫星在某一时刻的位置方程、近地点坐标系到地心惯性坐标系的转换矩阵以及轨道平面惯性坐标系与地心惯性坐标系的转换关系, 可得卫星在地心惯性坐标系中的位置。

3.3 仿真场景的设定

仿真中假设 LEO 卫星轨道高度为 600km(半径 6978.137 km), 由开普勒第三定律可得轨道周期为 96.687 min, 轨道倾角 28.5° , 其它参数如下: 卫星为自旋稳定式, 轴线沿地心和卫星连线的方向指向天顶; 发射功率为 3W; 天线为圆极化定向天线, 指向沿地心和卫星连线的方向背离地心, 半功率波束宽度为 30° ; 工作频率: S 波段(2.2~2.3GHz); 跟踪与中继卫星位于西经 41° 的地球同步轨道面上, 各项参数如下: G/T 为 8.9dB/K; 圆极化天线, 天线半功率波束宽度为 13° , 天线在初始时刻指向地心。

3.4 仿真结果分析

3.4.1 LEO 卫星与 TDRS 的可见时间段 取仿真采样间隔为 1min, 图 4 描述了 LEO 卫星 TDRS 之间的距离随时间的变化情况, 当两者之间距离较小时, 表明轨道的升节点或下降点在中继星星下点附近位置。图 5 描述了 LEO 卫星对 TDRS 的可见情况。

对照图 4 和图 5 可以发现, 当轨道的升节点或下降点在中继星星下点附近时可见时间最长。

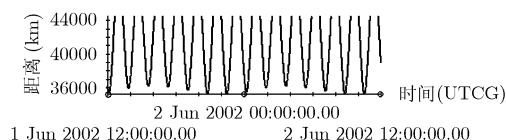


图 4 LEO 卫星与 TDRS 之间的距离随时间的变化

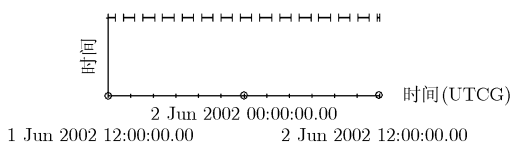


图 5 LEO 卫星对 TDRS 的可见时间段

3.4.2 两卫星可互相覆盖的时间段 图 6 和图 7 分别给出了 TDRS 天线以及 LEO 卫星天线的偏轴角随时间的变化情况。

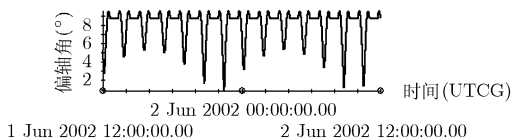


图 6 TDRS 天线偏轴角随时间的变化

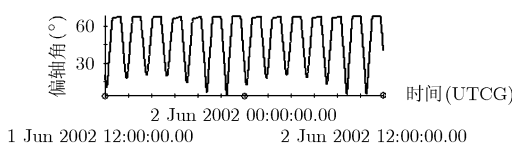


图 7 LEO 卫星天线偏轴角随时间的变化

根据前面的分析可知, 当 TDRS 和 LEO 卫星的连线与 LEO 卫星天线轴线的夹角小于 LEO 卫星天线半功率波束宽

度的一半时, 证明 TDRS 进入 LEO 卫星的覆盖范围内, 若此时 LEO 卫星也处于 TDRS 的覆盖范围内, 则两卫星符合相互通信的前提条件。

图 8 描述了 LEO 卫星与 TDRS 的天线相互指向符合要求, 即两卫星可互相覆盖的时间段, 它是在两卫星相互可见的基础上对相互通信所做的进一步限制。

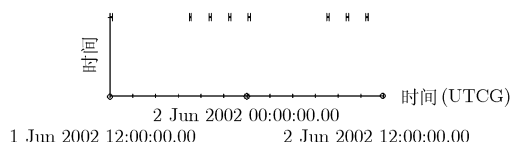


图 8 LEO 卫星与 TDRS 可相互覆盖的时间段

从图中可以看出该 LEO 卫星每天与 TDRS 可相互覆盖次数为 8 次, 每次平均持续 622.710 s。

表 1 所示是当 LEO 卫星的半功率波束宽度从 30° 增大到 90° 时, 两者相互覆盖时间的变化情况。

表 1 不同半功率波束宽度下两星相互覆盖的时间段

半功率 角度 ($^\circ$)	最短 时间段(s)	最长 时间段(s)	平均 时间(s)	累计 时间(s)
50	1135.149	1454.149	1306.730	18294.223
70	1468.567	2084.389	1991.768	27884.750
90	1817.060	2758.305	2687.251	37621.511

可见, 当卫星的半功率波束宽度增大时, LEO 卫星与 TDRS 相互覆盖的时间将延长。但由于半功率波束宽度和传输速率是相互制约的, 因此如果半功率波束宽度过大的话, 天线增益将下降, 接收信号的强度减弱, 所支持的最大传输速率将减小, 因此对半功率波束宽度必须进行恰当的选取。

3.4.3 载噪比随时间的变化 图 9 给出了 TDRS 接收到 LEO 信号的载噪比随时间变化的情况。

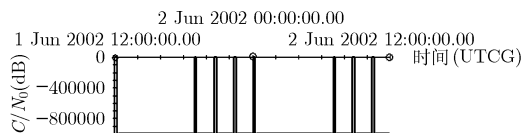


图 9 载噪比随时间的变化

由上图可知, LEO 与 TDRS 的通信在一天中大部分时间载噪比小于门限值, 只有几段时间的载噪比满足要求。

3.4.4 通信时间 综合考虑 LEO 卫星与 TDRS 的可见性、相互覆盖以及载噪比的限制, 可得到 LEO 与 TDRS 在一天内的通信次数以及总的通信时间, 表 2 给出了每次通信的起止时间采样点, 通信次数为 8 次, 总的通信时间长达 87.42 min。

为了进行比较, 通过仿真, 对 LEO 卫星与 TDRS 所覆

表 2 LEO 与 TDRS 在一天内的通信情况

通信次数	1	2	3	4	5	6	7	8
起始时间点	12:02:00	18:59:40	20:41:06	22:22:51	00:07:25	07:04:06	08:44:24	10:27:04
中止时间点	12:12:00	19:06:40	20:52:06	22:34:51	00:15:25	07:12:06	08:56:24	10:39:04

表 3 LEO 与 TDRS 在一天内历次通信业务量

通信次数	1	2	3	4	5	6	7	8
持续时间(s)	635	453	743	776	578	536	765	759
传输速率(Kbps)	145.144	146.150	166.878	157.036	156.170	156.783	149.451	153.603
业务量(Mbit)	92.166	66.205	123.990	121.859	90.266	84.035	114.330	116.584

盖的某一地面站(11.213° W, 26.187° S)直接通信的时间进行了计算,它们一天内的通信次数有 3 次,实时通信的时间仅为 4.67 min。

3.4.5 业务量 在仿真中,以 LEO 卫星与 TDRS 刚刚可以相互覆盖时支持的通信速率作为该次通信的速率进行通信,在对全天各次通信的业务量进行计算,最后得到全天的通信业务量。表 3 是 LEO 与 TDRS 在一天内历次通信业务量。

仿真结果证明,在该假设条件下,LEO 与 TDRS 的全天通信业务量为 809.435Mbit。在通信速率具有自适应能力的情况下,通信过程中卫星能够自动检测链路的信噪比并以当时可能的最大通信速率进行通信,通信业务量还将进一步增加。

4 结束语

本文提出了具有固定天线的中等发射功率的小 LEO 卫星通过 TDRS 接入 TDRSS,实现空地实时数传的可能性,给出了 LEO 卫星与 TDRS 可通性的判断依据,并编写了仿真程序来完成对星地实时通信时间以及全天业务量的计算。仿真证明,与传统的数传方式相比,利用 TDRS 作为中继可大大延长 LEO 卫星与地面站实时通信的时间,同时,在恰当选取 LEO 卫星天线半功率波束宽度的情况下,也能够满足全天通信业务量的要求。

仿真中,只考虑了 LEO 卫星与一颗位于地球同步轨道的 TDRS 通信的情况,而实际上,随着 TDRSS 技术的发展,可以通过中、低轨道 TDRS 甚至 TDRS 星座进行数据传输,这将进一步延长实时通信的时间。同时,根据传输速率同半功率波束宽度之间的约束关系,通过对最优化算法的研究来选择最佳的半功率波束宽度,可实现全天业务量的最大化。因此,具有固定天线的 LEO 卫星接入 TDRSS,实现空地数传是完全可能的。

参 考 文 献

- [1] Raines R A and N J Davis. Personal communications via low Earth orbit satellite communication networks. Proc.of the MILCOM95, San Diego, CA, 1995, Vol 3:1229-1233
- [2] Horan S, Minnix T O, and Vigil J S. Small satellite access of the space network. Proc. Int. Telemetry Conf., San Diego, CA, 1999: 1173-1182
- [3] Dunham J B and Long A C. Onboard orbit estimation with tracking and data relay satellite system data. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*.1983, 6(4): 292-301.
- [4] Ryan W E, Han Li, and Quintana P A. Design of a low-orbit-to-geo-stationary satellite link for maximal throughput. *IEEE Trans. on Communications*. 1997, 45(8): 988-996.
- [5] 吕海寰,蔡剑铭,甘仲民. 卫星通信系统[M]. 北京: 中国邮电出版社, 1994: 19-89.
Lv Hai-huan, Cai Jian-ming, and Gan Zhong-min. Satellite Communication System[M]. Beijing: The Posts and Telecommunications Publishing House of China, 1994: 19-89.
- [6] 任萱. 人造地球卫星轨道力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1988: 178-187.
Ren Xuan. Orbital Mechanics of Satellite[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1988: 178-187.
- [7] Bate R R. 航天动力学基础[M]. 吴鹤鸣, 李肇杰译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990: 201-245.
Bate R R. Transtated by Wu He-ming, and Li Zhao-jie. Fundamentals of Astrodynamic[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautic Press, 1990: 201-245.

曾德贤: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为卫星导航与精密定位方法。

董绪荣: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星导航与精密定位方法。

李 睿: 女, 1979 年生, 博士生, 研究方向为空间通信与信息系统。