

基于低轨星座的星地路由技术研究

张晓娜, 张亚生, 何 辞

(中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081)

摘要: 针对低轨 (LEO) 卫星通信系统卫星与信关站之间的馈电链路频繁切换, 且星载设备处理能力受限的特点, 提出基于软件定义网络 (SDN) 的星地一体路由架构, 星地路由计算是研究的重点; 地面控制中心结合卫星运动的规律性, 周期性计算各颗卫星对信关站的覆盖时间; 采用最大覆盖时间准则选取切换卫星, 计算切换时间进行切换预测, 并将计算结果注入星上, 到达计算的切换时间激活注入的星地路由; 仿真结果表明, 与信关站发出切换请求后再实时进行星地路由计算的标准星地路由协议相比, 基于切换预测的星地路由协议在丢包率上有明显的优势, 减少切换过程对星地路由造成的影响。

关键词: LEO 卫星; 信关站; 切换预测; 丢包率

Research on Routing Between Satellite and Gateway Station Based on Low-Orbit Constellations

Zhang Xiaona, Zhang Yasheng, He Ci

(The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: There is frequent handover of links between Low Earth Orbit (LEO) satellite and gateway station. In addition, equipment on the satellite has limited processing capacity. In view of the question above, this paper raises a routing protocol between satellite and gateway station based on SDN (Software Defined Network). Routing calculation is the focus of this paper. Considering the law of satellite operation, control center on the earth calculate the coverage time of every satellite. The satellite which covers the gateway station for the longest time is arranged to establish connection with the gateway station instead of the original satellite. And then the time of handover can be predicted. Then the routing between satellite and gateway station is transmitted to the satellite. When it reaches the predicted handover time, the routing transmitted to the satellite is triggered. According to the simulation result, compared with the routing protocol that calculates the routing between satellite and gateway station after handover, the routing protocol raised in this paper can rebuild routing quickly. It has a distinct advantage in packet loss rate. It reduces the impact of handover on routing between LEO satellite and gateway station.

Keywords: LEO satellite; gateway station; handover prediction; packet loss rate

0 引言

LEO 卫星网络是通信网络的重要组成部分, 地面通信网络只能覆盖陆地上的有限区域, 对于海洋, 山区以及两极地区的覆盖较难实现。而 LEO 卫星可以实现对于全球的完整的连续的覆盖, 系统通信的传输时延更小, 实时性高; LEO 卫星发射功率低, 便于终端小型化和多样化, 通信成本更低; LEO 卫星节点的抗毁能力比较强, 即使有部分卫星节点被毁, 通信系统仍能维持使用; 卫星的空间部署比较灵活, 可以搭载火箭进行卫星发射, 甚至可以实现一箭多星^[1]。因此, 作为最有应用前景的卫星移动通信系统, 本文重点针对 LEO 卫星通信系统星地路由技术展开研究。

LEO 卫星网络路由技术承担数据传输任务, 是卫星通信系统的重要技术组成。由于服务业务种类的快速增加,

LEO 卫星网络的传输压力越来越大, LEO 卫星网络的路由面临诸多挑战。LEO 卫星网络路由技术包括星间路由和星地路由。星间路由实现卫星之间数据传输路径的选择。目前, 星间路由技术已有较多研究, 按照解决 LEO 卫星星座网络拓扑结构快速变化问题的不同方式, 当前的星间路由算法划分为系统周期分割法 (虚拟拓扑)、覆盖区域分割法 (虚拟节点) 以及动态拓扑更新法三大类^[2]。

但是目前对于星地路由设计的研究相对较少。本文聚焦于星地路由研究, 即研究卫星与信关站之间的路由设计。星地路由面临如下挑战: LEO 卫星轨道处于较低的高度, 卫星处于较快的运行速度, 卫星网络拓扑时刻处于变化中。比如经典的 LEO 星座 Iridium 星座, 卫星和地面信关站之间处于快速的相对运动中, 相对运动速度约为 7 km/s, 针对地面信关站而言每颗卫星的可视时间只有 9 分钟。由此可见, 对于地面信关站而言, 与其建立连接的卫星切换速度非常快^[3]。卫星系统星地路由切换所引起的路由重构会对数据传输造成以下几方面影响:

1) 数据丢失: 在信关站与前一卫星断开连接转而切换到下一颗卫星时, 仍然缓存在前一卫星中的数据包会

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-05-08。

作者简介: 张晓娜 (1995-), 女, 河北沧州人, 在读硕士研究生, 主要从事 IP 协议方向的研究。

通讯作者: 张亚生 (1969-), 男, 硕士, 研究员, 主要从事卫星 IP 网方向的研究。

丢失, 数据业务这种对数据丢失比较敏感的业务对这种情况容忍度较低。

2) 延迟抖动: 星地路由切换过程会导致长的时延以及延迟抖动, 语音和视频业务对时延相对比较敏感, 因此会受到比较大的影响。

3) 网络信令开销: 当星地路由切换发生时, 需要为数据传输重新建立路径, 而 LEO 卫星的频繁切换特性必将导致大量的重路由, 进而产生很大的信令开销。

因此, 为了网络的可靠运行, 减少网络信令开销。本文根据卫星运行的周期性规律, 计算各颗卫星对信关站的覆盖情况, 进行馈电链路切换预测, 尽量减小由于馈电链路切换而造成 LEO 卫星通信系统的业务传输性能下降。

1 LEO 卫星通信系统组成

LEO 卫星通信系统一般由和用户段、空间段、地面段构成, 如图 1 所示。

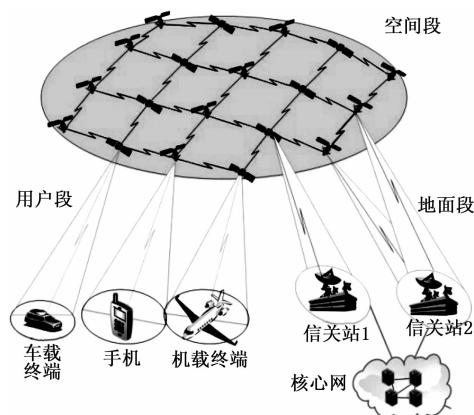


图 1 LEO 卫星通信系统组成

1) 用户段: 用户段由各种用户构成。地面用户终端种类繁多, 如车载终端、机载终端、手机等, 各种终端向卫星网络发起各种业务请求。终端一般位于卫星天线形成的某一波束中, 其与移动通信卫星间的链路称为用户通信链路。

2) 空间段: 空间段主要指太空环境中运行着的 LEO 卫星星座网络, 每颗卫星都是其中的一个节点, 卫星之间通过星间链路进行数据与信令的传输。在空间段中, LEO 卫星轨道高度为 500—2 000 km。单颗卫星覆盖域直径为数千米, 经典的 Iridium 星座和全球星系统均为数十颗卫星覆盖全球^[4]。本文所研究的 LEO 卫星星座网络中, 卫星不再只是中继转发功能, 也具备了星上处理的能力, 包括星上再生和星上交换。

3) 地面段: 地面段设备包括信关站和地面网络控制中心。信关站负责进行地面网和卫星网之间的连接, 是地面网与卫星网用户之间通信的重要连接部分。信关站主要完成地面与卫星之间业务信息交互、控制信令等任务。在通信过程中, 信关站需要始终保持对星可见, 在卫星与信关站之间俯仰角低于一定的限制数值, 或者信关站接受信号强度较弱需要切换时, 信关站发出切换请求, 采用合适的切换准则从当前覆盖该信关站的卫星中选择切换卫星^[5]。

2 LEO 卫星系统星地路由的挑战与需求

同地面网络相比, LEO 卫星网络具有很多独特的地方, 比如切换频率高, 长时延, 链路不对称, 星上处理能力受限等。考虑到以上因素, 不能将地面路由协议直接应用到 LEO 卫星通信系统星地路由计算中。在诸多 LEO 卫星系统特点带来的挑战下, 对星地路由提出了相应的设计需求。

1) 星地切换频繁: LEO 卫星轨道高度低, 卫星与信关站之间处于高速的相对运动中, 对于信关站而言, 每颗卫星的可视时间非常短, 信关站要始终保持对星可见 (使用定向天线), 则切换的速度非常快。本文星地路由研究是在基于 Iridium 星座的 LEO 卫星通信系统环境下进行的, 根据 Iridium 的经典参数可大致计算出, 信关站对每颗卫星的可视时间只有 9 分钟, 也即星地路由切换频率非常高^[6]。

本文中针对低轨卫星频繁进行星地切换的特点, 需要采用合适的切换准则从候选切换目标卫星集合中选择切换卫星。而且由于信关站接入卫星发生了改变, 原有的星地路由也会发生改变, 为了减少频繁切换造成的传输中断和数据丢失, 需要进行切换预测, 提前计算星地路由。

2) 星载处理能力受限: 星载设备需要考虑发射难度以及运行成本等问题, 同时还要考虑设备的发射功率这一限制条件, 因此星上设备的运算能力、存储容量都不能沿袭地面设备的标准。

为了降低协议的逻辑控制的复杂度, 本文方案设计了基于 SDN 的星地一体路由架构, 将网络的配置和管理等协议集中部署于地面信关站, 完成控制与转发的分离, 降低星上处理负荷。

3) 网络流量变化: 在卫星网络中, 卫星节点覆盖地球表面, 地域、人口分布等问题会导致星地路由中的流量分布不均匀问题^[7]。因此, 路由协议应具有流量负载均衡功能, 避免因出现链路拥塞现象降低网络性能。

3 基于 SDN 的路由架构

针对 LEO 卫星通信系统星上设备运算能力、存储容量受限的特点, 为了降低协议的逻辑控制的复杂度, 本文设计了基于 SDN 的星地一体路由架构, 将网络的配置和管理等协议集中部署于地面信关站, 完成控制与转发的分离, 降低星上处理负荷。路由架构主要包括路由计算、路由注入和路由切换三部分, 如图 2 所示。

1) 路由计算: 路由计算包括星间路由计算和星地路由计算, 本文侧重于研究星地路由计算。地面控制中心结合卫星运动的规律性, 周期性地计算各颗卫星对信关站的覆盖时间。采用合适的卫星切换准则选取切换卫星, 计算切换时间进行切换预测。路由计算部分是本文提出的路由架构的核心部分, 在第 4 节中进行详细介绍。

2) 路由注入: 将集中计算后的路由注入到低轨卫星的星载交换机上, 并指导路由切换。

3) 路由切换: 当到达路由计算得到的切换时间时, 激活星上注入的路由, 自动进行星上转发表的更新, 完成路

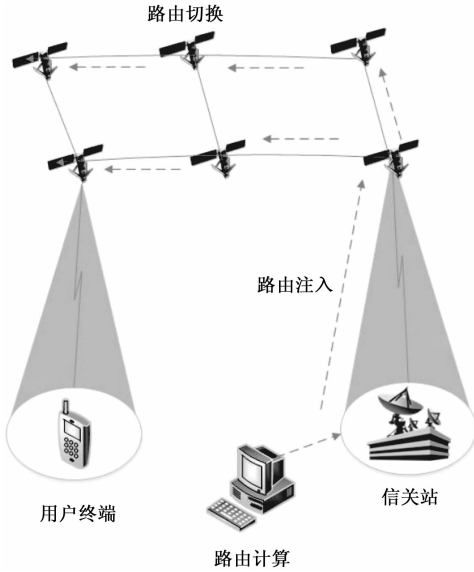


图 2 低轨路由协议架构

由切换。

4 星地路由计算

星地路由计算涉及两个方面：星地覆盖规律计算和切换卫星选取。星座中的卫星始终处于运动中，地面控制中心需要周期性地星座覆盖规律计算，判断是否存在单个地面站被两颗或多颗卫星同时覆盖的情形，如图 3 所示，若存在则采用合适的切换准则从多个覆盖卫星中选取切换卫星，进行切换预测。

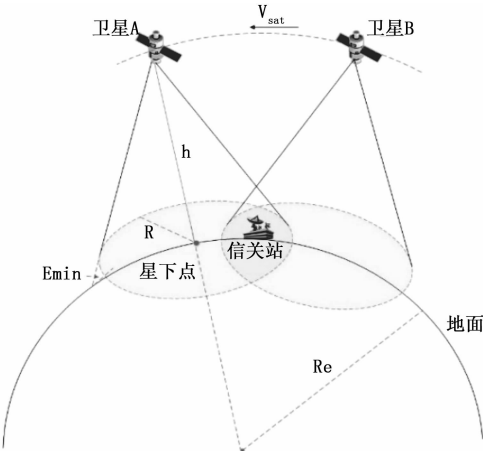


图 3 星座覆盖情况

4.1 星地覆盖情况计算

低轨卫星系统相对地面站进行高速移动，一次通信可经历多次星地切换，因此需要对低轨卫星的单颗星覆盖时间、和整个低轨卫星系统对地面站的覆盖规律进行准确的分析，为低轨卫星和信关站间路由计算提供支撑^[8]。

卫星对地覆盖需要考虑星下点轨迹和覆盖半径。星下点定义为卫星与地心连线和地球表面的交点。如图 3 所示。 Re 为地球半径， h 为轨道高度，最小仰角 E_{min} 定义了卫星覆盖面积的边界。

本文基于 Iridium 星座进行星座覆盖规律计算，由于 Iridium 星座卫星间拓扑结构固定，可根据某颗已知卫星的星下点轨迹，推算所有卫星的星下点轨迹。假设参考经线为 0° ，初始时刻 $t=0$ 时卫星 $L_{1,1}$ 的右升轨道与参考经线重合 ($\lambda_0=0$)，星座覆盖规律计算的流程如图 4 所示。

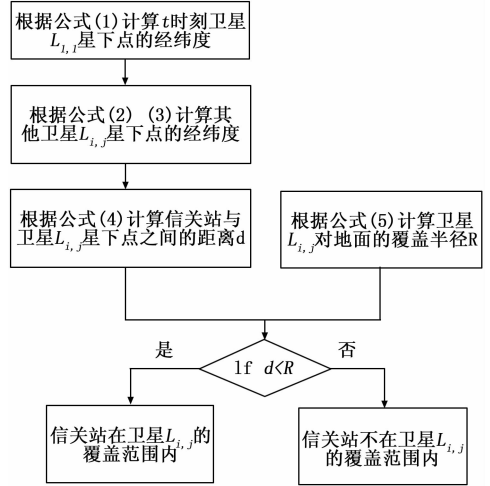


图 4 星座覆盖规律计算流程图

1) 在时刻 t 卫星 $L_{1,1}$ 星下点的经纬度坐标 (λ_s, φ_s) ：

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_s = \lambda_0 = \tan(\cos i * \tan \theta_s) - \omega_e t + \\ \left\{ \begin{array}{l} -180^\circ, 180^\circ \leq \theta_s \leq -90^\circ \\ 0, -90^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ \\ 90^\circ, 90^\circ \geq \theta_s \geq 180^\circ \end{array} \right. \\ \varphi_s = \sin^{-1}(\sin i * \sin \theta_s) \end{array} \right. \quad (1)$$

其中： λ_0 是右升节点相对于参考经线的经度； $\theta_s = \frac{2\pi}{T} * t$ 是 t 时刻卫星在轨道平面内与右升节点之间的角距； T 为星座轨道参数； ω_e 是地球自转角速度。

2) 卫星 $L_{i,j}$ 的星下点经度 $\lambda_{i,j}$ ：

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{i,j} = \lambda_{i,1} + \lambda_{1,j} \\ \lambda_{i,1} = \lambda_s + i * \Delta\Omega + \left\{ \begin{array}{l} 0, \lambda_s + i * \Delta\Omega \leq 180^\circ \\ -360^\circ, \lambda_s + i * \Delta\Omega > 180^\circ \end{array} \right. \\ \lambda_{1,j} = \lambda_{1,1} \pm \left\{ \begin{array}{l} -180^\circ, \cos\theta * \cos\left(\frac{2\pi}{T} * t\right) < 0 \\ 0, \cos\theta * \cos\left(\frac{2\pi}{T} * t\right) \geq 0 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2)$$

$\lambda_{i,1} \geq 0$ 时土取+， $\lambda_{i,1} < 0$ ，土取-

表 1 铱星参数列表

高度/km	北京坐标	轨道周期/min	最小仰角	轨道倾角	轨道面数目 NL	轨道面卫星数目 ML	铱星角速度 VL	地球自转角速度 ω_s	覆盖半径/m
780	北纬 40° ，东经 117°	100.45	8.2°	86.4°	6	11	$1.042843 * 10^{-3}$	$7.292 * 10^{-5}$	$2.218 * 10^6$

其中: i 代表轨道面 i 内的卫星, $\theta = \text{mod} \left(\frac{2\pi}{T} * t + 2 * j * \Delta\omega_f, 360 \right)$ 是 t 时刻 $L_{i,j}$ 卫星在轨道平面内与右升节点之间的角距, $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{NL}$ 是轨道平面间的固定平面偏移。

3) 卫星 $L_{i,j}$ 的星下点纬度 $\varphi_{i,j}$:

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} \sin^{-1} \sin(\varphi_s + 2j * \Delta\omega_f), & i = 2n + 1 \\ \sin^{-1} \sin(\varphi_s + (2j - 1) * \Delta\omega_f), & i = 2n \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\Delta\omega_f = \frac{2\pi}{ML}$, 每个轨道平面内 ML 颗卫星以 $\Delta\omega_f$ 角度等间隔分布。

4) 信关站和星下点之间的距离:

$$d = R_e * \cos^{-1} [\sin\varphi_e \sin\varphi_{i,j} + \cos\varphi_e \cos\varphi_{i,j} \cos(\lambda_e - \lambda_{i,j})] \quad (4)$$

其中卫星 $L_{i,j}$ 的星下点经纬度 $(\lambda_{i,j}, \varphi_{i,j})$, 信关站经纬度 (λ_e, φ_e) 。

5) 卫星对地面的覆盖半径:

$$R = R_e * \left\{ \frac{\pi}{2} - E_{\min} - \sin^{-1} \left[\frac{R_e * \sin \left(\frac{\pi}{2} + E_{\min} \right)}{R_e + h} \right] \right\} \quad (5)$$

其中: h 为轨道高度, E_{\min} 为最小仰角。

本文选用 Iridium 系统星座进行卫星覆盖规律计算, Iridium 系统是典型的低轨卫星通信系统, 其轨道参数如表 1 所示^[9]。基于 Iridium 系统按照上述计算方法仿真得到北京地面站的部分星历图, 如表 2 所示。

仿真计算结果显示北京地面站将在 360~480 s 和 900~960 s 时间段内存在被两颗卫星覆盖的情况, 在 960~1 020 s 时间段内存在被三颗卫星同时覆盖的情形, 需要采用合适的切换准则从多颗覆盖卫星中选择切换卫星。

4.2 切换卫星选取准则

由表 1 北京站覆盖情况可知, 星座存在着对信关站的多重覆盖, 切换时需要在多颗覆盖卫星中做出选择, 而采用不同的卫星选取准则时, 会使得系统性能的差异较大。在星地路由设计中, 馈电链路切换可采用的卫星选取准则主要有以下 5 种准则^[10]。

最长覆盖时间准则: 根据开普勒三定律, 任意时刻星座中每颗卫星的位置是可预测的。信关站通过星历计算出各颗卫星覆盖时间, 当原卫星不再覆盖信关站时, 从备选服务卫星中选择另一颗覆盖时间最长的卫星进行切换。最长覆盖时间准则结合星座运行的规律性, 减少了控制中心的计算量。

最大仰角准则: 也称为最近卫星准则。该准则为信关站选择当前时刻与信关站之间仰角最大的卫星。但由于 LEO 卫星的高速运行, 各颗卫星与地面站之间的仰角出在随时的变化之中, 因此控制中心需要连续计算每时刻每颗卫星与信关站之间的仰角, 计算量非常之大, 对设备的计算能力提出了很高的要求。

最强信号准则: 从本质上来说, 接收到信号才能实现

表 2 北京地面站的星历图部分计算结果

时间/秒	覆盖统计				说明
	覆盖地面站的卫星号	星下点经度	星下点纬度	地球站到星下点距离	
0-60	$L_{4,1}$	120	32	$8.5 * 10^5$	单星覆盖
60-360	$L_{4,1}$	119	36-50	$4.8 * 10^5 - 1.2 * 10^6$	单星覆盖
360-480	$L_{4,1}$	119.9	54-57	$1.5 * 10^6 - 1.9 * 10^6$	多星覆盖
	$L_{4,0}$	119.9	21-25	$2.0 * 10^6 - 1.6 * 10^6$	
480-900	$L_{4,0}$	119-120	28-50	$1.3 * 10^6 - 1.15 * 10^6$	单星覆盖
900-960	$L_{4,0}$	121	53	$1.5 * 10^6$	多星覆盖
	$L_{4,10}$	121	20	$2.1 * 10^6$	
960-1020	$L_{4,0}$	121	57	$1.9 * 10^6$	多星覆盖
	$L_{4,10}$	121	24	$1.7 * 10^6$	
	$L_{3,10}$	91	40	$2.14 * 10^6$	

通信, 因此在最强信号准则中, 信关站选择接收到最强信号的卫星建立星地路由。

最小负荷准则: 信关站选择负荷最轻的卫星建立链路。该准则实现卫星星座中各颗卫星的负荷较为公平地分配, 防止有些卫星与多个信关站建立连接, 而有些卫星处于空闲状态情况的出现。

最短传播路径准则: 在该准则下, 数据传播路径最短的卫星可以与信关站建立连接。根据准则名称可知, 数据传播的距离最短。那么其传播延时是所有准则中最小的。但是与最大仰角准则面临同样的问题, 卫星和信关站的距离处于连续变化之中, 需要实时计算各颗卫星与信关站之间的距离, 计算量较大^[11]。

为了减少信关站与卫星之间的切换频率, 并利用已知的卫星运行的规律性实现较小的计算量, 本文选择最长覆盖时间准则。当发现地星仰角低于最小仰角时, 信关站发出切换请求, 开始进行馈电链路切换。由于信关站的接入卫星发生了改变, 等到检测到切换请求后再实时进行路由计算, 则用户将会感觉到明显的中断。因此本文结合卫星运动的规律性, 根据 4.1 节计算各颗卫星覆盖时间, 根据最长覆盖时间准则选取切换卫星, 计算切换时间进行切换预测, 并将计算结果注入星上, 到达计算的切换时间激活注入的路由, 从而实现快速重路由, 尽量减少由于链路切换而造成的数据丢失和延迟抖动, 实现通信过程的服务质量保证。

5 仿真实验

为了更好地分析本文星地路由协议的性能, 将其与在星地链路切换后再进行路由计算的标准星地路由协议进行了比较。性能的评价要考虑很多因素, 在此着重分析两种路由由算法的丢包率性能。

本文基于 Iridium 卫星通信系统进行仿真分析, 其轨道参数如表 1 所示; 两种路由协议的传输性能仿真结果如图 5、图 6 所示。