

清 华 大 学

综 合 论 文 训 练

题目： 低轨道卫星网络路由算法优化研究

系 别： 信息学院

专 业： 计算机科学与技术

姓 名： 姜东槿

指导教师： 杨 荒 助理研究员

2020 年 5 月 25 日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)。

签 名： 姜 隽 导师签名： 杨 光 日 期： 2020.06.12

摘 要

本文研究低轨道卫星间链接网络 (ISL) 中,可以有效利用网络资源,同时限制链接切换的发生。本文中的路径分配方法是利用可预测的低轨道卫星系统的位置变化和地面终端的地理位置以及通话持续时间的统计信息。

实验在 STK(Satellite Tool Kit)软件,使用 MatLab 画出结果。为了分析所提议的算法的性能,进行了模拟试验。实验在虚拟环境时间 AM05:00 - AM09:00(4 个小时)包括 8 个轨道每个轨道有 10 个卫星的 Walker 星座下,假设可连接切换可能概率 $P_t = 0.5$ 下进行试验。

将分析与比较实验中发生链接切换数结果和因切换导致的被断通话的时间结果。这些有效的结果与提高 QoS (Quality of Service) 有密切的关系。

关键词: 低轨道卫星网络; 切换; 链接切换; Walker 星座

ABSTRACT

This thesis, investigates the low-orbit satellite interlink network(ISL), which can make use of network resources effectively, and limit the occurrence of link switching. The path allocation method in this thesis is to use statistical information on the location change of the predictable low-orbit satellite system and the geographical location and duration of the ground terminal.

Using the STK (Satellite Tool Kit) software simulate, draw the results using Matlab. Simulated tests were carried out to analyze the performance of the proposed algorithm. AM05:00 – AM09:00 (4 hours). Includes eight orbit under Walker-Connection constellation, which has 10 satellites per orbit, assuming that a connectionable handover could be a probability $P_t=0.5$ for testing.

The results of the link-switching and the time result of the cut-off will be analyzed and compared with the results of the comparison experiment. These valid results are closely related to the enhancement of QoS.

Key-Words: LEO(Low Earth Orbit),Handover,Link-handover,Walker-constellation.

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 低轨道卫星网络	2
1.2.1 铱星卫星星座	2
1.2.2 Walker 卫星星座	3
1.3 国内外相关研究结果	4
第 2 章 低轨道卫星网络模式	6
2.1 低轨道卫星网络简介	6
2.2 切换	7
2.2.1 切换技术实现	8
第 3 章 设计动态选路	10
3.1 设计网络拓扑	10
3.2 重新设置路由要素	11
3.2.1 路由时间	11
3.3 动态选路	11
3.3.1 动态选路的条件	12
3.3.2 动态选路步骤	13
第 4 章 试验结果及总结	15
4.1 实验设计	15
4.2 试验结果分析与比较	16
4.2.1 卫星接近次数的变化	16
4.3.2 卫星接近时间之和	16
4.2 研究结论	17
4.3 研究展望	17
插图索引	18
参考文献	19

致 谢	21
声 明	22
附录 A 外文资料的书面翻译	23

第 1 章 引言

1.1 研究背景及意义

随着产业的高度化，人类的活动范围的扩大，无论地位和时间，服务的提供技术都在提高。特别是为了弥补地面移动通信服务的缺点，为了将全世界捆绑为一个通信圈站，正在试图利用卫星。由于卫星通信网的东宝城、光域城、线路设置的灵活性、内在海星等卫星固有的特性，有望在未来的超高速信息通信基础上发挥重要作用。特别是低轨道卫星（LEO, Low Earth Orbit）与现有的静态轨道卫星（GEO, Geostationary Orbit）不同，位于较低的轨道上，电波延迟时间小，发送信号所要求的功率低，可以进行个人手机服务。因此，利用低轨道卫星的新通信系统的研究开发正在以发达国家为中心展开。低轨道卫星通信系统由数十或数百个卫星组成，以服务整个地球。这些卫星沿着两极轨道急速移动。为了从地面网组成独立的卫星通信网，卫星拥有卫星间的链接（ISL, Inter-Satellite Link），为了维持这种持续变化的相对卫星位置，并调整天线的方向。此时轨道运行相互反对的接头（seam）区域和轨道交叉发生的极（pole）区域之间的 ISL 因非常快的相对位置变化而永久或临时断开（switch-off）。这种卫星的位置和 ISL 的连接模式变化使得低轨道卫星网的连接结构持续变化。卫星网持续的连接结构变化会导致为提供对正在进行的呼叫的连续性而导致大量的手球（Handover），增加网络上的信号及处理负担。另外，如果找不到足够资源的新途径，那么手上的过度就会失败，正在进行中的弧会被切断。这在服务质量（QoS, Quality of Service）方面比新一期的阻断（call block）更严重。

根据一定速度规定的轨道移动的卫星移动和根据网络的连接结构变化而发生的低轨道卫星网上的手提电脑与因不规则终端的移动而发生的地面数控网络上的手语有所区别。因此，在低轨道卫星网中，为了减少对正在进行中的弧的加权值，会不会减少手球的失败率，利用可预测的卫星移动特性，在连接设置初期选择适当的路径，控制手球的发生的研究实现了。这增加了因不足的链接容量而导致的手球失败和正在进行中的截断几率，不能有效地使用整个网络。另外，其他研究还提出了在多合一低轨道卫星网中，连接的链接手球发生次数最小化，满足终端延迟的 QoS 要求的路径分配方法。本论文有效地使用了整个网络，提出了限制链接手稿发

生的路径分配方法。

建议的方法是可以预测的低轨道卫星的位置变化,从地面终端的位置信息和符号的服务时间的概率分布,获取为了避开链接手球的 ISL 的最低要求维持时间,并考虑到这一点,利用虚拟的拓扑设置连接路径。为了分析建议的技术性能,进行了模拟试验,将平均链接手球数、申圭浩的阻断概率、进行中的善意切断概率、以及网络的利用率与现有的技法进行对比分析。

1.2 低轨道卫星网络

卫星星座是一组作为系统一起工作的人造卫星。与单一卫星不同,一个星座可以提供永久的全球或近全球覆盖,这样无论何时,地球上任何地方至少都可以看到一颗卫星。人造卫星通常被放置在一组互补的轨道平面中,并连接到全球分布的地基站。他们也可以使用卫星间的通讯。

卫星星座不应与卫星群混为一谈,这些卫星群以几乎相同的轨道(见卫星编队飞行),卫星程序和卫星舰队相距甚远,它们是连续发射的卫星群。独立运行的同一制造商或操作者。

1.2.1 铱星卫星星座

铱星卫星电话是将 66 颗卫星送入宇宙轨道,起到基站作用的天上的卫星电话网。铱星这个名字是原子编号为 77 号的铱星卫星电话,是将 66 颗卫星送入宇宙轨道,起到基站作用的天上的卫星电话网。铱星卫星整体呈带翅膀的三角柱状。像这样的 66 颗卫星登上太空,起到基站的作用,从而构筑卫星电话网。地球上任何地方,如果想使用卫星电话,无论何时何地,至少要有一个以上的卫星显示。所以,我们设计卫星的轨道,让 66 颗卫星无论何时都保持适当的间隔,均匀地配置。

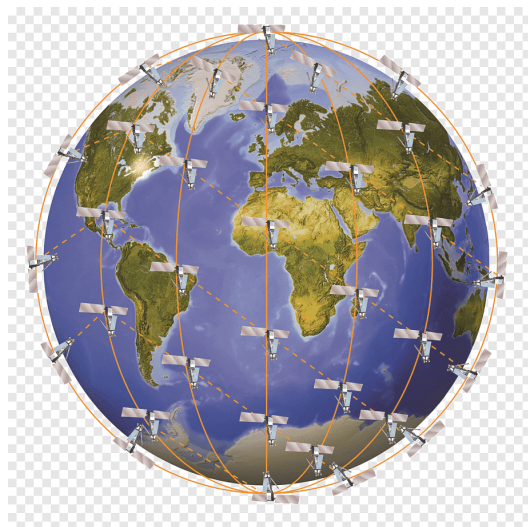


图 1.1 铱星卫星星座

铱星卫星在高度约 780 千米的 6 个圆形轨道表面各配置 11 颗卫星。包括备用卫星在内,一个轨道面有 12 颗卫星以 30 度为间隔运行,而这种轨道面有 6 个以 60 度为间隔环绕地球。因此,地球上任何地方都能看到至少一颗卫星。一颗卫星可负责半径 2,200 公里的地方。另外,在南、北极地区,静止轨道卫星的可视高度较低,因此,在北部俄罗斯或南美末端地区,经由静止轨道卫星的通信比较困难,但铱星卫星电话在南、北极地区也具有同样的品质。接收电波的卫星为使电波传达到目的地的对方,与附近最近的 4 颗铱星卫星连接。每个卫星与另外 4 个卫星进行通信,然后继续以这种方式进行通话,构成卫星的通信网络。由于地面的线路网完全不经过,不管是海、维冈、山,只要看到天空,都可以进行通信。基站被摧毁的战场或灾区,都可以进行通讯。为了实现铱电话和普通电话的通信,还另外设置了 10 多个关卡局 (Gateway)。每个关卡国负责连接近地卫星和地面通信网。

1.2.2 Walker 卫星星座

一般有大量的星座可以满足特定的任务。通常星座的设计使卫星具有相似的轨道,离心率和倾斜度,因此任何扰动对每颗卫星的影响几乎相同。这样一来几何可以不进行过多的站位持续,从而减少燃料的使用,从而增加卫星的寿命。另一个考虑是,轨道平面上的每颗卫星的发射保持足够的分离,以避免在轨道平面交叉点上发生碰撞或干扰。圆轨道很受欢迎,因为卫星处于恒定高度,需要恒定的强度信号来通信。这个 Walker 三角洲模式符号与约翰·沃克提出的有关。另一个广受欢迎的星座类型是接近极地的 Walker Star,该星座被铱星所使用。在这里,卫星处于

接近极地环行轨道, 直径约 180 度, 在地球的一边向北移动, 另一边向南移动。全铱星中的活性卫星形成 $86.4^\circ : 66/6/2$ 的 Walker Star, 即每两架飞机重复一次。Walker 对星星和 Delta 使用相似的记号, 这可能会让人迷惑不解。这些恒定高度下的圆形轨道有时称为轨道外壳。

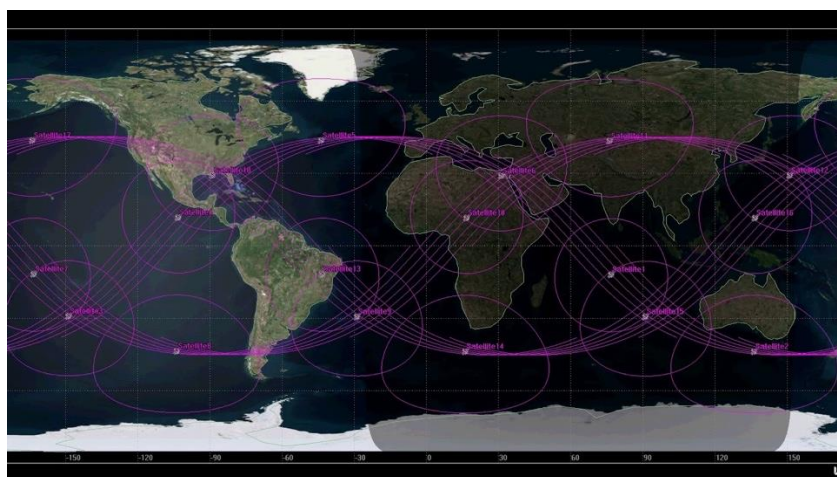


图 1.2 Walker 卫星星座

1.3 国内外相关研究结果

已经研究过为了减少连线切换(Link Handover)的发生,优先网络路由安排(routing)上距离链接中断时间最长的 ISL。但是直到中断链接的时间最长的 ISL 的优先选择,将会导致特定链接的流量偏重化。这会因增加不足链接的容量切换失败而导致提高进行中的通话被断概率,这使整个网路不能有效使用。

另外其他论文已经研究过一种基于 QoS 的路由方法,在满足 QoS 要求的同时,使每个连接的链路切换次数最小化办法。为了描述网络拓扑结构,以及由于连通性变化而导致的连接重路由尝试的最小化,采用图论的方法,引入了一种新的星间链路度量,称为生存期。除了基于 QoS 的路由策略,在多个约束下找到最佳可行路径,例如提出了一种分布式 QoS 路由策略,根据特定的 QoS 需求,在选择的路径数目之间进行选择。

在本论文中,笔者建议采用可以有效使用全部网,限制转接器生成的路径分配器法。提议的技法是考虑在可预测的低轨道上改变星性位置,地面终端的位置信息,以及对户的服务时间的概率分布,利用链接 Hando Bur 灰皮的 ISL 最小要求维持时间。为了分析提议的技法的性能,进行了模拟试验,将平均链接手数,新硅湖的差断

概率,进行中人湖的切断概率,以及网的利用率与现有的技法进行了比较分析。

本论文的结构如下。首先在 II 章中记述本论文中考虑的网络模式。关于 III 章中提议的路径安排方法的表述。在 IV 场通过模拟来评价提议的技法的性能,最后在 V 场下得出结论。

第 2 章 低轨道卫星网络模式

低轨道卫星系统是指多个卫星构成的可以进行实时信息处理的大型的卫星系统。技术上,低地球轨道上的物体位于地球表面高度 160 至 2000 公里 (99 至 1200 英里) 之间。任何低于这个高度的事物都会因轨道的衰变而迅速坠入大气层,或者燃烧起来,或者在表面发生碰撞。在这个高度上的物体也有一个轨道周期(即它们绕地球运行一次的时间)在 88 到 127 分钟之间。为了保持低地球轨道,物体必须具有足够的轨道速度。对于 150 公里以上的物体,必须保持每秒 7.8 公里的轨道速度。这比进入轨道所需的逃逸速度略低,即每秒 11.3 公里。尽管 LEO 的引力并不比地球表面明显逊色(约 90%),但轨道上的人和物体却处于不断自由落体状态,从而产生了失重感。

2.1 低轨道卫星网络简介

本论文中的低轨道卫星的(constellation satellite)是由跟卫星网图 1 (Iridium) 相似的两极 8 个轨道,绕轨道运行的总的 80 个卫星组成的(Walker)低轨道卫星网络星座。

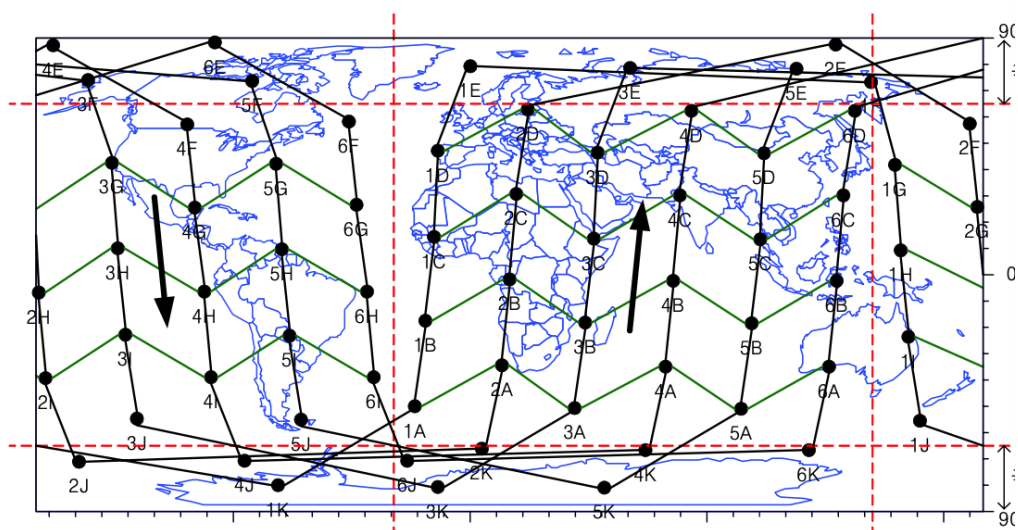


图 2.1 LEO 卫星网络的 ISL 拓扑快照

小组卫星移动非常迅速,约 110 分钟绕地球一周,在地面的某地点可以到达特定的卫星临时位置,最长时间约为 10 分钟。每个卫星根据不同位置拥有两个轨道内的 ISL (Intra-orbit ISL) 和一个或两个轨道间的 ISL(Inter-orbit ISL)。如果位于高纬度地

方,则暂时停止使用轨道间的 ISL。低轨道卫星的服务领域可以按照取自地面终端和卫星之间的通信连接的上下向连接(UDL, Up/Down Link)的 Spotbeam(spotbeam) 判别。Spotbeam 可以按照天线指向方法判别 SFF 和 EFF。SFF (Satellite Fixed Footprint) 是固定卫星领域, EFF (Earth Fixed Footprint) 是固定地面领域。

SFF 是随着卫星的移动,服务领域也以同样的速度移动,而 EFF 是卫星的 Spotbeam 向着地面特定位置移动。本论文中考虑的低轨道卫星网假定使用 SFF。

2.2 切换

移动通信终端与有线终端相比具有的最大特点就是用户可以边移动边使用服务。由于在家外也可以在必要时随时随地使用服务的便利性,无线用户数量早已超过了有线用户数。用户在移动的同时,仍能使用该服务,原因是无线网络提供手持式服务。通信中的无线终端在不丢失收发数据的同时,通过连接中的基站/cell 连接到其他基站/cell,并连续进行通信,使用者可使用终端。

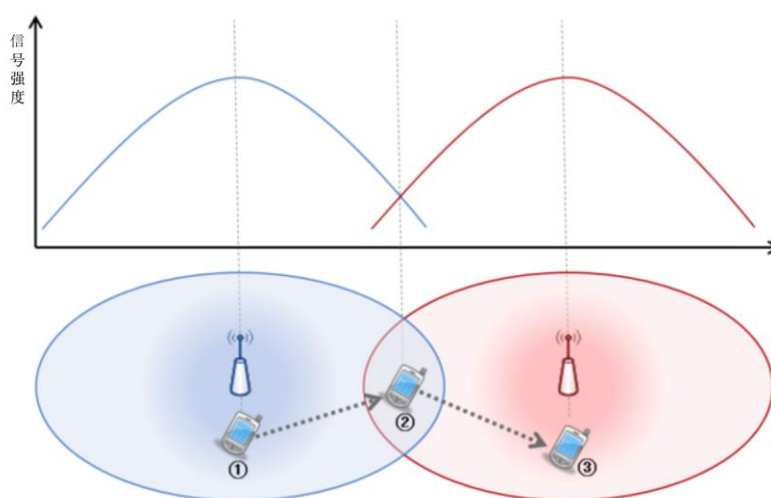


图 2.2 切换的原因

终端天线可以在宽大的带宽上探索多个频率频道,因此探索周边的多个单元,一般(如果不是受 access 控制或拥挤控制而无法连接)接收信号强度最大。使用者移动或因 shadowing 等,从现在连接的 serving cell 接收信号的强度变小,从邻居 cell 接收信号的强度变大的话,就会发生手持式连接。为此,在终端设定 eNB 和 RC 连接时,

eNB 会通过构型信息来报告终端上有什么发生事情时接收信号的强度。手机终端正在测定服务 cell 和邻居 cell 的接收信号强度,一旦发生相关发生事情,就会通过测试报告信息向 eNB 报告这些信号强度,eNB 则通过终端报告。

Measurement Configuration	eNB → UE	Specify measurements to be performed by the UE
Measurement Report	UE → eNB	Indication of measurement results
Handover Decision	Source eNB	Decision on the target cell and the type of handover (X2 handover or S1 handover)
Handover Preparation	Depends on Handover Type	Forwarding path preparation
Handover Execution		Data forwarding
Handover Completion		Path switching

图 2.3 切换过程

2.2.1 切换技术实现

本切换技术的目的在于提供一种低轨卫星通信系统的切换方法,提供由卫星信关站创建活跃表来保存卫星系统中的用户关联信息,根据该信息,切换用户端目标卫星在目标中预留源波中相同频点的信道资源以供切换用户使用。可以确定卫星切换的资源预留时刻及切换执行时刻。在切换执行时刻,执行卫星间切换。低轨卫星通信系统切换方法,包括以下步骤

第一在卫星信关站中建立活跃表,用于记录各用户当前状态及用户所关联的卫星信息

第二卫星信关站根据用户当前位置信息、用户当前关联卫星波束覆盖范围及用户所关联卫星的移动速度,确定切换资源预留请求时刻及切换执行时刻

第三到达资源预留请求时,卫星信关站向目标卫星发送资源预留请求消息,其中包含切换用户信息,目标波信道资源信息及切换执行时。

第四目标卫星根据资源预留请求消息中目标波束信道资源,判断波束信道资源是否空闲。

第五若目标卫星波束信道资源空闲,则为切换用户预留波束信道资源,并向信关站发送资源预留成功消息;切换执行时刻,目标卫星执行透明模式切换,基于波束信道资源与用户进行通信,信关站更新活跃表;

第六若目标卫星目标波束中无波束信道资源,但存在其它可用信道资源,为切换用户预留其它可用信道资源,并发送切换通知消息至信关站;信关站发送切换通

知消息至用户；切换执行时刻，切换用户执行波束内切换，目标卫星基于目标波束内信道资源与切换用户进行通信，信关站更新活跃表；

第七若目标卫星目标波束中无可用信道资源，则用户进入资源预留缓冲区；若切换执行时刻到达前，当前波束存在空闲信道资源，则为切换用户预留资源；到达切换执行时刻，若已为切换用户预留切换资源，切换用户执行切换，信关站更新活跃表；否则，切换失败。

第 3 章 设计动态选路

卫星切换和连接切换一旦发生,卫星网必须与在一个卫星内只经历 UDL 变化的 Spotbeam 切换不同,为提供正在进行的持续连接服务,应在传输卫星之间设定包含新 ISL 的路径。

这种的重新排路径算法导致切换如果没用充分的资源就断在进行中的通话。因此,为了有效利用资源和提供高质量的服务,网络路由必须减少这些切换引起的路径重新排路径 (rerouting)的情况。另外,连接切换与卫星切换和 Spotbeam 切换不同,在分配期路径时选择适当的 ISL 构成路径,因此可以限制 Handover 的发生。本章介绍对在初期路径分配时选择适当的 ISL 构成路径,以限制链接切换的产生的途径分配方法。

3.1 设计网络拓扑

在本论文中,低轨道卫星网是表示卫星的正点 S_i 的集合 S 和 ISL 的干线 L_{ij} 的集合以

L 构成的图表 G 做模特。

$$\begin{aligned} G &= (S, L) \\ S &= \{s_i \mid 1 \leq i \leq n\} \\ L &\subseteq \{l_{ij} = (s_i, s_j) \mid s_i, s_j \in S, i \neq j\} \\ f(l_{ij}) &\rightarrow \phi_{ij}, \phi_{ij} \geq 0 \end{aligned}$$

图 3.1 网络拓扑设计

这里 n 是构成卫星网的卫星数, ϕ 是线的属性值。从图表 G 中连接到顶点的线数是等于一个卫星所具有的 ISL 数量。轨道内 ISL L_{ij} 只有在 S_i 是 S_j 的前卫星或后卫星的情况下才存在,轨道间的 ISL L_{ij} 是 S_i 和 S_j 处于可视距离和两个卫星的维度都 $\pm 65^\circ$ 情况下才存在。不同位置的卫星为 2~4 个 ISL 和地面终端和通信而拥有一只 UDL。

3.2 重新设置路由要素

3.2.1 路由时间

通话的连接路径是卫星切换或链接切换发生改变或连接路径,或发生通话的结束为止。即,从初期的路径设定时间到通话结束时间时间间隔剩余通话持续时间(residual call duration time) t_r ,因原地和目的地卫星的移动发生的卫星切换的时间叫 t_s (satellite handover time),还有发生链接切换时间叫 t_p (link handover time),任意通话发生正在使用的路径状态变化时候需要重新安排路径的时间叫 t_c (connection rerouting time), t_c 是采取三个时间中最短的时间。

$$t_c = \min\{t_s, t_r, t_p\}$$

图 3.2 重新安排路径时间

没结束通话的情况网需要重新设置路由。因为为了任意通话构成多个 ISL 所以路径 p 的链接切换时间路径是构成 p 的 ISL 中采取最短的持续时间。

$$t_p = \min\{t_l \mid l \in p\}$$

图 3.3 链接切换时间

ISL 的维持时间 t_l 分为轨道内 ISL 的维持时间和相邻轨道之间的 ISL 维持时间。相邻的两个卫星相对位置在一定的轨道内,ISL 始终存在,持续时间无限。但是相邻轨道之间的 ISL 的持续时间会随着卫星的位置变化而变化,因此卫星的移动速度,在轨道内上卫星的位置,极域的纬度等卫星间会没有互相连接的当时 ISL 持续时间为 0。

3.3 动态选路

$$\pi = p \mid \min\{\phi_p \mid p \in P\}$$

图 3.4 路径费用

这里的 ϕ_p 是路径的费用, $P = \{p \mid t_s \leq t_p\}$ 是构成各路径的 ISL 的持续时间大于卫星切换的延长时间或以相同的链接构成的路径集合。

$$t_r = \min \{ t_s, t_c \}$$

图 3.5 重新安排路径时间

此时通话终止时不需要连接路径的再分配路径,所有连接路径的再分配都是会导致卫星切换的。但是卫星切换时,即使选择比简易更长的切换路径,也不会在切换路径前发生信号终止,因此,目前使用的切换路径的使用终止原因为卫星中断。但是,与从地面端晚期的地理位置信息和卫星移动信息中可以知道的卫星切换或链接切换的发生时间不同,通话的持续时间在分配路径时不能提前知道。

3.3.1 动态选路的条件

动态选路算法技法利用可预测的 ISL 连接模式变化和地面终端位置信息,以及通话持续时间的统计信息进行链接。动态选路算法的目的是,防止利用可预测的 ISL 信息,地面的用户端信息和通话时间的统计因链接切换发生重新设置路由。因此,将减少对避免链接切换超所需的 ISL 持续时间的过高评价,以便在路径选择上更多地利用 ISL。链接切换的可能概率 p_t (Link Handover probability) 限制了链接切换的发生程度。 Residual call duration time 是平均 μ 的指数分布。residual call duration time 时间大于链接切换的概率是如下。

$$P[t_r > t_l] = e^{-t_l/\mu}$$

图 3.6 持续通话时间大于链接切换时间的概率

所以满足可链接切换的概率的 ISL 的最小持续时间 L_t 是如下

$$l_t = -\mu \log(p_t)$$

图 3.7 满足可链接切换的 ISL 中最小持续时间

画出可链接切换的概率和 ISL 的最小持续时间 L_t 间的关系试如下

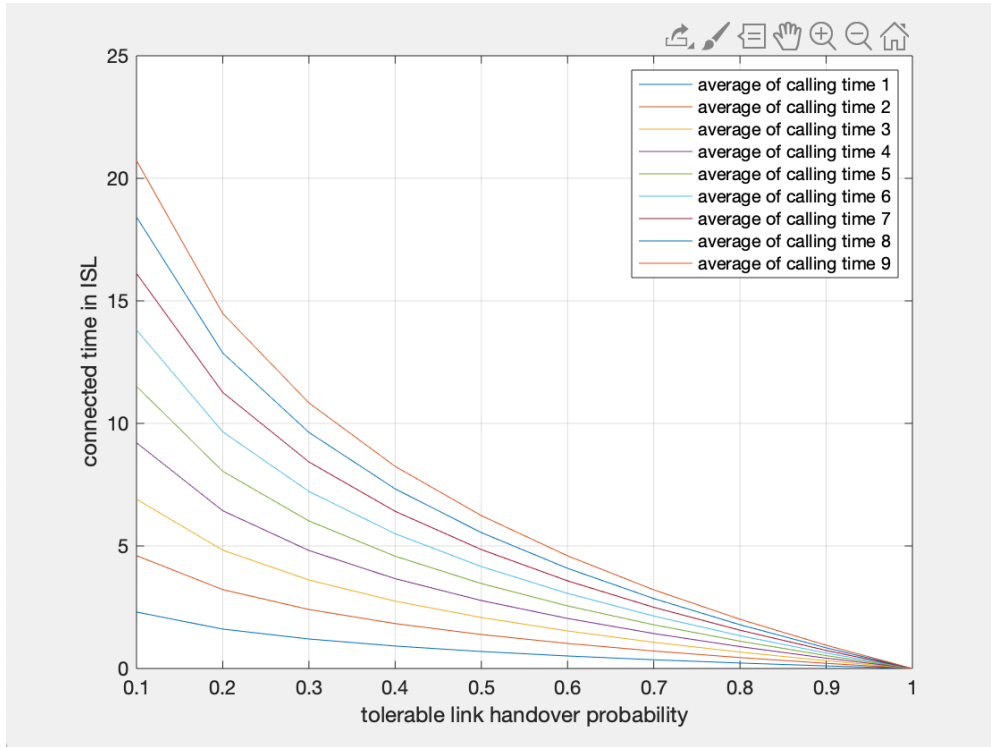


图 3.8 各个的 P_t 值相应的 L_t 值

上式中构成各路径的 ISL 的持续时间大于或等于最小持续时间的 ISL 的路径集合。因此,如果采用动态选路,连接再重新网络路由时间如下。

$$t_c = \min \{t_s, t_r, t_p\}.$$

图 3.9 重新安排路径时间

3.3.2 动态选路步骤

利用动态选路的路径安排将通过以下步骤进行。

第一设计一个网络拓扑 $G=(S,L)$ 。

第二 ISL 集合 L 中复制, 取得 L' 。

第三利用图 12 的满足可链接切换的 ISL 中最小持续时间计算最小持续时间 L_t 。

第四在 L' 中删除满足如下的条件的线。

$$t_l < \min\{l_t, t_s\}$$

图 3.10 小于图表 12 或卫星切换时间的持续时间

第五计算 L' 中的各个线的费用。

第六把 L' 代入进去原来的 G 后，生成 G'=(S,L')。

以后发生切换的时候使用 G' 来计算。动态选路将比 t_l 持续时间更短的 ISL 从卫星网的 ISL 星座中去除。去除这些 ISL, 对所有终端都有不同的执行和不同的执行时间。即, 根据终端的地理位置和剩余通话持续时间, 各终端利用不同的虚拟 G' 设定路径。

允许转网的概率将影响网提供的 QoS 和网资源的有效利用。因此, 允许转接链切换的概率 p_t 应考虑以下事项后进行选择。

- QoS 要求
- 流量的种类
- 平均通话持续时间
- 发送端和接收端的地面终端的位置(纬度, 经度)
- 发送端和接收端之间的距离

第 4 章 试验结果及总结

4.1 实验设计

软件：Window 10 下 STK(Satellite Tool Kit 10.1)

星座：Walker-constellation

卫星：10

轨道：8

测试时间：AM05:00 - AM09:00(4hours)

Pt= 0.5

为了设计虚拟宇宙环境在 Window 卫星工具箱软件（Satellite Tool Kit）实验进行。

因为要实验最基本的星座所以采用 Walker 星座但是为了更明显和能看旷达的结果调整卫星数和轨道数，8 个轨道每一个轨道里 10 个卫星循环。测试时间是 4 个小时因为虽然一个卫星需要转地球 1 周的时间是平均 1 个半小时但是地球也自转和会发生的误差所以实验时间是 4 个小时。本章中的链接切换的可能概率 Pt(Link Handover probability)是 0.5 因为链接切换的可能概率是 0 到 1 间的固有价数所以实用化中间的数 0.5。

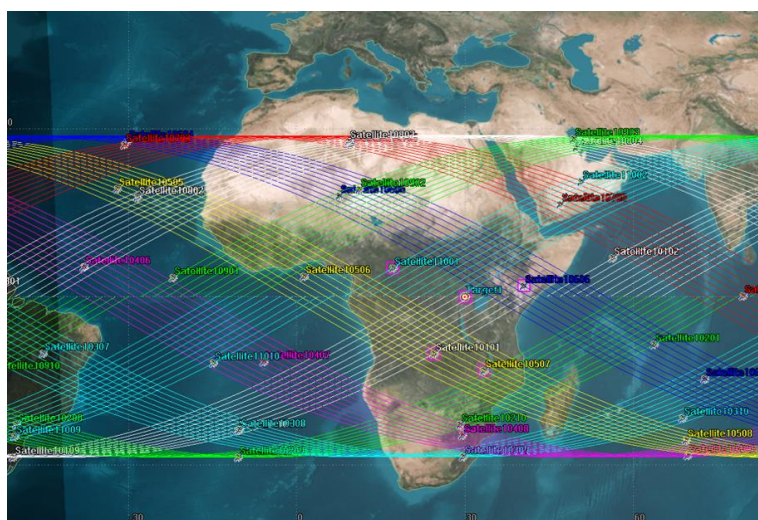


图 4.1 虚拟卫星网络星座拓扑

4.2 试验结果分析与比较

4.2.1 卫星接近次数的变化

切换是 Qos(Quality of Service)的最大因素于是如果多次发生卫星接近的变化，会通话被断或者降低 Qos。如下是画图 Qos 的最大因素切换的变化。

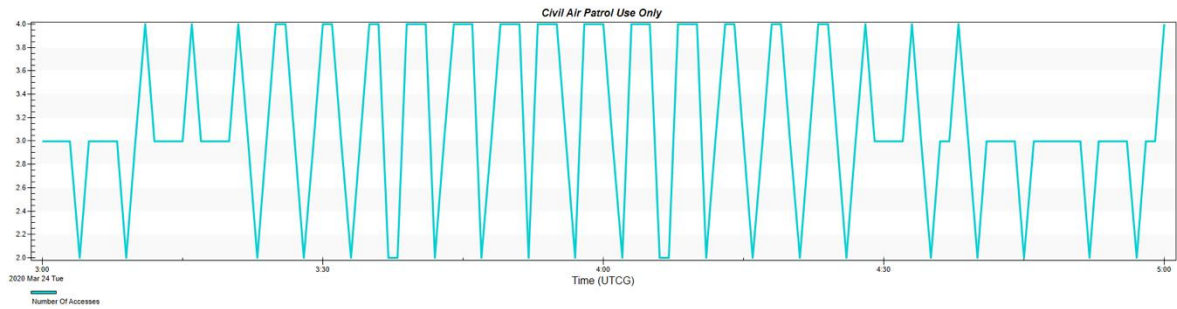


图 4.2 初期卫星接近次数的变化

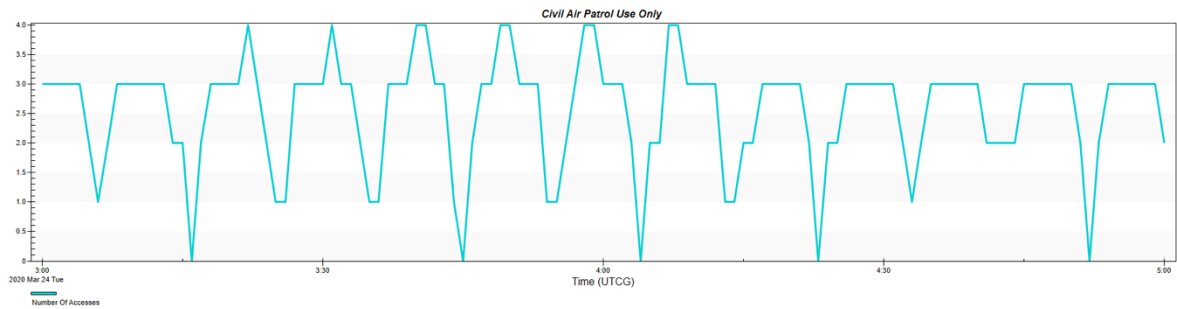


图 4.3 后期卫星接近次数的变化

4.3.2 卫星接近时间之和变化

Global Statistics			

Min Duration	2	24 Mar 2020 04:59:24.585	24 Mar 2020 05:00:00.000
35.415			
Max Duration	2	24 Mar 2020 04:49:50.809	24 Mar 2020 04:58:59.010
548.201			
Mean Duration			418.700
Total Duration			15491.893

图 4.4 初期卫星接近时间之和

Global Statistics			
Min Duration	1	24 Mar 2020 04:06:28.670	24 Mar 2020 04:08:05.299
96.629			
Max Duration	2	24 Mar 2020 04:42:52.739	24 Mar 2020 04:51:36.990
524.251			
Mean Duration			412.339
Total Duration			18555.246

图 4.5 后期卫星接近时间之和

初时 2 个小时内卫星接近次数有很活泼的变化。多次卫星接近次数的变化导致会降低 QoS。后期 2 个小时内卫星接近次数变化减少了。减少的卫星接近次数导致提供高通话质量。这图标显示通过降低卫星接近的变化，提高 QoS。

4.2 研究结论

本文研究中，主要分析了在利用低轨道卫星网络路由中通过除掉小于计算最小持续时间 L_t 的卫星间的线提高 QoS(Quality of Service)。利用动态选路的路径安排将通过以下步骤进行。首先设计一个网络拓扑 $G=(S,L)$ 。第二 ISL 集合 L 中复制，取得 L' 。

利用图 12 的满足可链接切换的 ISL 中的最小持续时间计算最小持续时间 L_t 。

然后删除满足小于图表 12 或卫星切换时间的持续时间。最后计算 L' 中的各个线的费用。然后把 L' 放进去原来的网络拓扑 G 结果生成 $G'=(S,L')$ 。

发生切换的时候使用 G' 来计算。 G' 构成的这些 ISL, 对所有 UE 都有不同的执行和执行时间。 G' 构成的 ISL 将影响网提供的 QoS 和网资源的有效利用。

4.3 研究展望

具有高效传输性能,小型化,轻量化,低廉费用等的低轨道卫星正在成为提供全球宽带网络服务的新一代网络系统。以 18 年为标准,全球互联网普及率为 51.2%, 发展国家为 45.3%,发达国家为 80.3%,仍存在网络边缘化地区。特别是在人口密度和收入水平低,地形难以建立通信网络的地区,作为提供宽带网络服务的通信手段,低轨道卫星应用价值非常高。利用低轨道的特点就是与地球的距离很近,因此可以获得清晰的影像。利用这些手段发射的多个侦察用低轨道卫星,目前在 38 个国家拥有 752 个侦察卫星,在利用情报收集的国防领域出现必要性,预计数量今后会更快增加。

插图索引

图 1.1	铱星卫星星座	3
图 1.2	Walker 卫星星座	4
图 2.1	LEO 卫星网络的 ISL 拓扑快照	6
图 2.2	切换的原因	7
图 2.3	切换过程	8
图 3.1	网络拓扑设计	10
图 3.2	重新安排路径时间	11
图 3.3	链接切换时间	11
图 3.4	路径费用	11
图 3.5	重新安排路径时间	12
图 3.6	持续通话时间大于链接切换时间的概率	12
图 3.7	满足可链接切换的 ISL 中最小持续时间	12
图 3.8	各个的 P_t 值相应的 L_t 值	13
图 3.9	重新安排路径时间	13
图 3.10	小于图表 12 或卫星切换时间的持续时间	14
图 4.1	虚拟卫星网络星座拓扑	15
图 4.2	初期卫星接近次数的变化	16
图 4.3	后期卫星接近次数的变化	16
图 4.4	初期卫星接近时间之和	16
图 4.5	后期卫星接近时间之和	17

参考文献

- [1] A Suboptimal Routing Algorithm for Massive LEO Satellite Networks .Yilun Liu, Lidong Zhu National Key Laboratory of Science and Technology on Communications University of Electronic Science and Technology of China Chengdu, China 2018.
- [2] Structural Properties of a Low Earth Orbit Satellite Constellation–the Walker Delta Network . Chia-Jiu Wang Department of Electrical and Computer Engineering University of Colorado at Colorado Springs P.O.Box 7150 Colorado Springs, CO 80933,1993 .
- [3] Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies . Yongtao Su, Yaoqi Liu,Yiqing Zhou, Jinhong Yuan, Huan Cao, and Jinglin Shi ,2019.
- [4] A routing algorithm for connection-oriented Low Earth Orbit (LEO) satellite networks with dynamic connectivity Hu˘seyin Uzunaliog˘lu^a, Ian F. Akyildiz^b and Michael D. Bender^c ^a Bell Laboratories, Lucent Technologies, 101 Crawfords Corner Road, Holmdel, NJ 07733, USA
Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA
Department of Defense, 9800 Savage Road STE 6512, Fort Meade, MD 20755-6512, USA
Wireless Networks 6 (2000) 181–190
- [5] Improvement and queuing analysis of the handover mechanism in the high-speed railway communication . Zufang Dou, Suoping Li Jaafar Gaber & Xiaokai Chang Telecommunication Systems volume 73, pages 383–395(2020)Cite this article .
- [6] Wireless Personal Communications Bluetooth and other Technologies]WILLIAM H.Tranter, Brian D.Woerner, Jeffery H.Reed, Theodore S.Rappaport, Max Robert, 2000 .
- [7] <https://en.wikipedia.org/wiki/Erlang%28unit%29>
- [8] Staged Deployment of Communications Satellite Constellations in Low Earth Orbit Olivier de Weck, Richard de Neufville, and Mathieu Chaize Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139,2004
- [9] Detection and Processing of Bistatically Reflected GPS Signals From Low Earth Orbit for the Purpose of Ocean Remote Sensing Scott Gleason, Stephen Hodgart, Yiping Sun, Christine Gommenginger, Stephen Mackin, Mounir Adjrad, and Martin Unwin, 2005
- [10] Topological Design and Routing for Low-earth Orbit Satellite Network Hong-seng Chang, Byung-Wan Min, Chang-Gun Lee, Chong-Sang Kim, Sang-Ryul Min, 1995
- [11] Handover Queuing Strategies with Dynamic and Fixed Channel Allocation Techniques in Low Earth Orbit Mobile Satellite Systems Enrico Del Re, Senior Member, IEEE, Romano Fantacci,

Senior Member, IEEE, and Giovanni Giambene, Member, IEEE, 1999

- [12] Footprint handover rerouting protocol for low Earth orbit satellite networks Huseyin Uzunalioglu, Ian F. Akyildiz, Yelena Yeshac and Wei Yenda Bell Labs Advanced Technologies, Lucent Technologies, 101 Crawfords Corner Road, Holmdel, NJ 07701, USA
b Broadband and Wireless Networking Laboratory, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, USA, 1999
- [13] Different Queuing Policies for Handover Requests in Low Earth Orbit Mobile Satellite Systems Enrico Del Re, Senior Member, IEEE, Romano Fantacci, Senior Member, IEEE, and Giovanni Giambene, Member, IEEE A Connection Admission Control Algorithm For Low Earth Orbit Satellite Networks Huseyin Uzunalioglu Network Planning Solutions Bell Labs Advanced Technologies Lucent Technologies Holmdel, NJ 07701, USA JeffW.Evans Network Appl. and Integ. Lab ITTL/CND, 1999
- [14] ROUTING IN LEO-BASED SATELLITE NETWORKS Vidyashankar V Gounder Computer Science Program University of Texas at Dallas Richardson, TX 75083-0688 vidshan@utdallas.edu Ravi Prakash Computer Science Program University of Texas at Dallas Richardson, TX 750830688 ravip@utdallas.edu Hosame Abu-Amara Wireless ATM Planning NORTEL Networks Richardson., 1999
- [15] Modeling and Performance Study of Inter- Satellite Optical Wireless Communication System Aida Hasfiza Hashim, Farah Diana Mahad, Sevia M. Idrus and Abu Sahmah M. Supa'at, 2010
- [16] A predictive QoS routing scheme for broadband low Earth orbit satellite networks O.Ercetin, S.Krishnamurthy, Son Dao, L.Tassiulas, 2000.
- [17] Traffic Load Balancing Low-earth Orbit Satellite Network Yun Sik Kim, Young-Ho Bae, Youngjae Kim, and Chul Hye Park Korea Telecom Wireless Communication Research Laboratory 17 Woomyun Sucho Seoul, Korea, 1998

致 谢

本题目在选题及研究过程中得到杨荒老师的推荐和指导。对国留学生的来说，我一开始就害怕用中文写论文，但在杨荒老师的帮助下，逐渐了解了研究的基本原理，终于才能完成了一篇论文。感谢杨荒老师。

此外，还有要感谢其他帮我的各位老师，在论文编写中提供大力支持和帮助，这帮助给我能过完成写论文的动力。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名： 姜 隽 日 期： 2020.06.12

附录 A 外文资料的书面翻译

Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies

摘要

本文旨在对宽带低轨卫星通信系统中的关键问题进行全面的综述。首先介绍了系统的网络结构，这是整个系统的基础。具有 ISL 的天基 LEO 系统需要少量的地面网关，是研究的重点。在该系统中，卫星星座的设计对覆盖率等关键系统性能具有重要影响。介绍了两种常见的狮子座星座，沃克三角星座和恒星星座。给定卫星星座，卫星应采用适当的波束覆盖方案，在全世界范围内提供无缝覆盖。提出了一种宽波束和点波束混合覆盖方案，其中 LEO 为大面积覆盖提供宽波束，为高速数据访问提供多个方向点波束。此外，为了解决 LEO 与 GEO 之间的干扰协调问题，宽带 LEO 系统需要设计专门的覆盖方案。为了保护地球通信，低轨卫星如果对地球造成干扰，就应该关闭。在这种情况下，为了为被关闭的低轨卫星覆盖的用户提供服务，可以采用渐进变桨法和覆盖年龄扩展法。最后，LEO 的覆盖性能也与资源管理方案密切相关。宽带 LEO 系统的全球资源管理复杂，数据量大，需要采用两级管理结构。利用这种结构，采用具有强大存储和处理能力的网络管理中心（NMC）进行一级管理，制定基于整个系统所有信息的策略。然后利用能力有限的卫星基站对 NMC 生成的策略进行实时响应。

Abstract

This article aims to provide a comprehensive overview for key issues in broadband LEO satellite communication systems. First of all, the network architecture is introduced, which is the basis of the whole system. The space-based LEO system with ISL, which requires a small number of ground gateways, is the focus. In this system, the satellite constellation design is important with impact on key system performances such as coverage. Two popular LEO constellations, the walker Delta and Star constellations, are

introduced. Given satellite constellations, proper beam coverage schemes should be employed at satellites to provide seamless coverage all over the world. A hybrid wide and spot beam coverage scheme is presented, where the LEO provides a wide beam for large area coverage and several steering spot beams for high-speed data access. Moreover, special coverage schemes should be designed in broadband LEO systems for the interference coordination between LEO and GEO. To protect GEO communications, LEO satellites should be turned off if they cause interference to GEO. In this case, to provide services for users covered by the turned-off LEO satellites, a progressive pitch method and a coverage expanding method can be employed. Finally, the coverage performance of LEO is also closely related to resource management schemes. The global resource management for broadband LEO systems is complicated, involving a large amount of data, and a two-level management structure should be employed. Using this structure, an NMC with powerful storage and processing capabilities is employed to carry out the first-level management, making strategies based on all information collected from the whole system. Then satellite base stations with limited capabilities are employed to respond to the strategies generated by NMC in real time.

介绍

尽管通信和网络技术发展迅速，但要在任何时间、任何地点连接任何用户，还有很长的路要走。在第四届世界互联网大会上发表的《2017 年世界互联网发展报告》显示，全球互联网普及率仅为 51.7%，这意味着地球上仍有一半的人口没有接入互联网。例如，在偏远地区，

南北极和欠发达的乡村，由于建设成本高，难以通过地面网络提供电信服务。此外，在高速列车和飞机等特殊情况下，由于小区间的高移动性和频繁切换导致的高丢包率，使得地面无线通信网络提供的服务质量（QoS）较差。在这些情况下，卫星通信以其丰富的射频资源、大的覆盖范围、长的通信距离、快速的部署、少受地面网络的干扰等诸多方面的优良性能，引起了人们的广泛关注。卫星通信在电视广播、远程通信、救灾等方面发挥着不可或缺的作用[1, 2]。最近，第三代伙伴关系项目（3GPP）standards group 已经对卫星通信网络的使用进行了编码，以便未来的空间和地面综合通信网络能够用于支持第五代（5G）网络工程[3]。为了满

足 5G 在大吞吐量和全球连接方面的需求，卫星通信为扩展和实现地面网络提供了宝贵的资源[4-6]。毫无疑问，卫星通信将迎来下一代无线通信的新高潮。

根据卫星与地球表面的距离，卫星系统可分为地球静止轨道（GEO）、中地球轨道（MEO）和低地球轨道（LEO）卫星系统[2]。

地球观测卫星通常部署在地球赤道上方约 36000 公里处。由于 GEO 具有相对地球位置固定、覆盖范围广、延迟时间几乎恒定等优点，成为卫星运营商为实现其商业卫星通信系统而部署的最受欢迎的系统[2]。近年来，随着移动互联网的飞速发展，人们对利用 GEO 卫星提供高速数据接入产生了极大的兴趣。已经部署了多个地理高通量卫星（HTS）通信系统，如国际海事卫星组织全球快线（Inmarsat Global Xpress）、Viasat、IPStar 和中国卫星 16 号。然而，GEO-HTS 通信系统面临着诸多问题。第一个原因是延迟大和信道衰减造成的用户体验差。其次，它不利于高纬度地区的移动通信，尤其是用户设备的仰角（用户卫星与地平线的夹角）太小，不应忽视地形的遮挡。此外，轨道资源和频率资源的稀缺限制了系统的覆盖范围和容量。最后，卫星发射和使用的成本非常高。

MEO 卫星位于 2000 公里到 20000 公里之间，比 GEO 卫星离地球近得多[2]。虽然 MEO 卫星通信的传播延迟比 GEO 卫星短，但需要更多的 MEO 卫星来连续覆盖该区域。与 LEO 卫星通信系统相比，MEO 系统需要更多的发射功率来克服路径损耗和其他衰减的大气条件。著名的 MEO 通信系统包括 Odyssey、Inmarsat-P 和 O3b[2]。2014 年，为了服务于“其他 30 亿”（O3b），O3b 系统作为典型的 MEO-HTS 系统由谷歌推出，为地面蜂窝系统提供中继传输和回程服务。

与 GEO 和 MEO 不同，LEO 卫星通常位于 500-2000 公里的轨道上。由于其相对较低的延迟、路径损耗以及生产和发射成本，LEO 对业界非常有吸引力。世界上第一个全球低轨通信系统是铱系统，由分布在 6 个轨道平面上、距地面 780 公里的 66 颗低轨卫星组成，主要提供语音和低速率数据服务[2]。其他商业 LEO 通信系统是 Galileo，拥有 48 颗卫星，其轨道高度约为 1400 公里，ORBCOMM 有 36 颗卫星位于 700 至 750 公里之外。他们试图向地面用户提供天基卫星电话或互联网服务。随着人们对无缝宽带通信需求的增加，全球低轨卫星通信系统作为全球卫星通信系统集成的重要组成部分，再次被推到了极致

对于低轨卫星通信系统，有两种基本的网络结构。一种是地面网络结构，卫星的转发器是透明的。任何两个用户之间的数据传输都必须通过地面网关。因此，为了实现全球覆盖，需要在全世界范围内部署大量的地面基础设施。另一种是天基网络体系结构，由空间子网和地面子网组成[2]。在这种体系结构中，卫星之间有星间

链路，只需要少量的网关，特别适合于网关站点不易获取的情况。同时，如果星载处理（OBP）作为卫星的再生有效载荷，用户终端之间的数据传输（UTs）可以直接通过卫星，而只有那些用户之间的数据传输

而像互联网这样的地面网络需要通过 isl 和馈线链路路由到网关。这种单跳通信方案进一步降低了馈送链路的容量要求和网关数量。

在本文中，我们将重点讨论基于空间的网络体系结构。如图 1 所示，该系统分为空间段、地面段和用户段。在空间段，具有 OBP 有效载荷的卫星椭圆通过 isl 连接。OBP 有效载荷使卫星能够实现空中接口协议，例如物理层协议，甚至包括媒体访问控制（MAC）和无线链路控制（RLC）协议的第 2 层。因此，卫星充当空间基站，为用户提供无线电接入。地面部分包括网关和网络管理中心（NMC）。网关由天线、基带处理单元、路由器和核心网络实体组成。它可以同时与多个可见卫星建立馈线链路。所有网关都由虚拟专用网（VPN）连接，并由 NMC 控制。NMC 是整个卫星通信系统的运行、管理和控制中心。网络管理中心最重要的任务是无线资源调度和网络规划。NMC 根据用户的位置分布、QoS 要求和信道条件，通过动态调度帧、频率和带宽、发射功率和波束控制来优化无线资源分配。最后，用户段包含各种 ut，包括各种移动和固定终端。

为了使用低轨卫星系统在地球上提供无缝覆盖，选择合适的卫星星座非常重要。

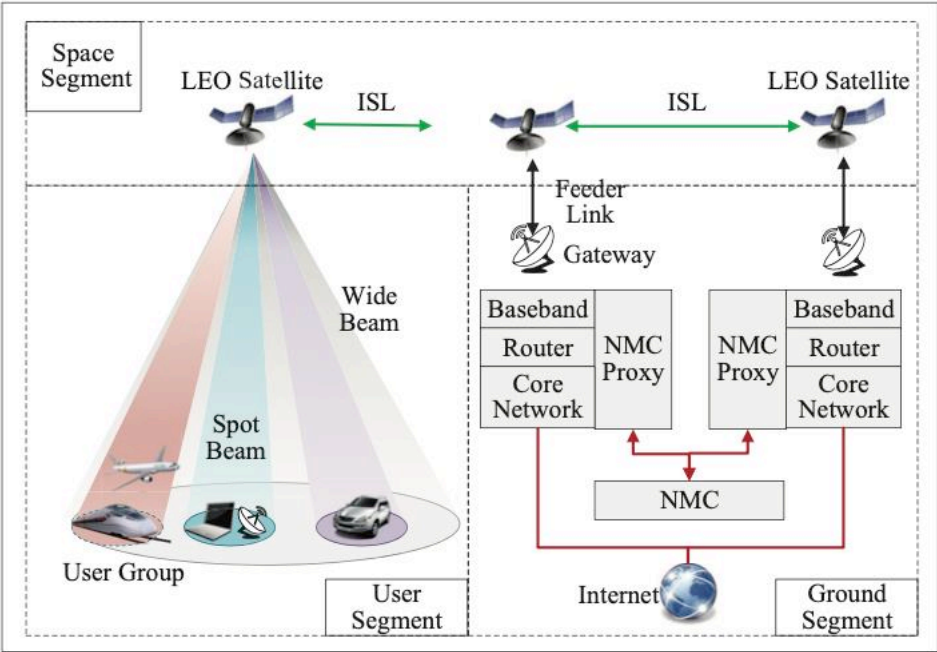


图 A.1.1 宽点光束覆盖拓扑

星座设计是决定低轨卫星通信系统性能的关键因素之一。星座的要素包括轨道类型、轨道高度、轨道数目、每个轨道上的卫星数目以及不同轨道平面之间的卫星相位因子[11]。目前，有两个流行的低轨卫星星座，圆形轨道几何的 Walker Delta 星座和圆形近极轨道的 Walker 星座（图 2）。

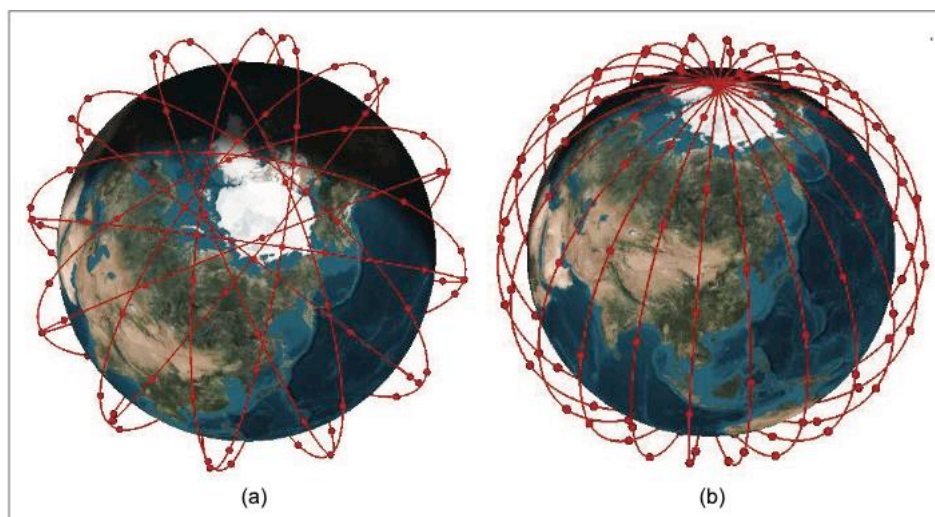


图 A.1.2 用于 LEO 卫星系统的 Walker 星座图：a) Delta 星座；b) star 星座。

Walker-Delta 的优点是它可以调整轨道的倾角，改变关注区域的重叠覆盖。例如，可以减少极点的重叠覆盖，而增加赤道的重叠覆盖。但它的缺点之一是，由于卫星之间的相对位置不断变化，无法与相邻轨道平面上的其他卫星建立稳定的 ISL。相比之下，对于步行星来说，所有的卫星都会有规律地从南极移动到北极或相反的方向。因此，每颗卫星都可以很容易地在同一平面上和相邻平面上与其相邻的卫星连接。这种轨道特性简化了空间网络的设计。然而，它在“轨道接缝”和高纬度地区存在一些覆盖问题，需要仔细考虑。

图 3 显示了我们从极点观测到的具有近极轨道的沃克星在赤道平面上的投影。箭头代表卫星的移动方向。可见，卫星的运动分为两部分：上升轨道和下降轨道[2]。在同一方向上的两个相邻轨道（即，前向轨道）之间的经度差值表示为 $\Delta 1$ 。两轨道在不同方向（即逆行轨道）之间形成一条轨道缝，两轨道之间的经度不同值为 2。

首先，轨缝的一个主要问题是频繁切换。注意，卫星在前进轨道上的相对运动是固定的。但在轨道接缝处，卫星在逆行轨道上的相对速度是一颗卫星的两倍。因此，UT 的移交变得更加频繁。例如，如图 3 所示，假设 UT1 位于两个轨道平面上的卫星之间的重叠区域。由于两个平面上的卫星在同一方向上移动，卫星间的切换

依次从卫星 A1 到 B1, 然后到 A2。但是, 由于卫星在逆行轨道上的相对双倍速度, 在同一时间段内, UT2 在轨道缝覆盖区域内的卫星间切换呈现出从 D2 到 C1 再到 D1 的较快趋势。因此, 希望通过将 Π_2 减小到小于 $2r$ 来减小接缝区域, 其中 r 是卫星波束的覆盖半径, 以便 UT2 可以在不需要合适的切换策略的情况下从卫星 d2 无缝切换到所述 meo 轨道。该方案避免了逆行轨道卫星间的乒乓切换, 降低了系统的掉话率。

此外, 高纬度地区的重叠覆盖也是 Walker 星群的一个严重问题。所有的轨道面都在地球的两极相交, 在那里发生了多重覆盖。考虑到有些卫星可能使用相同的频率, 绕极卫星越多, 卫星间的干扰就越严重。然而, 这些领域的用户通常很少。为了减少同频干扰, 节省能量, 通常在极区附近采用波束关断和导通策略。在星座设计的基础上, 系统采用的覆盖方案是另一个需要关注的问题。一般来说, 有两种流行的方案: 点波束覆盖和混合宽点波束覆盖[2, 7, 12]。点波束覆盖方案: 点波束覆盖方案在当前的低轨卫星通信系统中得到了广泛的应用, 其中每个低轨卫星提供多个点波束覆盖其服务区域。梁的布置可以是不同的形式。例如, 铱系统每颗卫星使用 48 个点波束, 共有 3168 个点波束在地球表面形成蜂窝覆盖[2, 7]。此外, 在 OneWeb 系统中, 每个卫星椭圆形成 16 个椭圆全光束, 并排列成一行。无论光束模式是什么, 光束在地球上的轨迹都随卫星轨道而移动。

尽管该方案简单, 但由于单个点波束的覆盖面积相对较小, 因此波束间的切换非常频繁。例如, 在铱系统中, 光束的足迹半径仅为 450 公里, 卫星的移动速度高达 7 公里/秒[3], 这会导致每 60 秒点光束之间的切换, 并可能严重降低用户体验。此外, 由于点波束的模式是固定的, 无论用户位置的分布如何, 这种覆盖方案都会导致无线资源的巨大浪费。

混合宽点波束覆盖方案: 混合宽点波束覆盖方案的主要思想是, 每个低轨卫星为整个服务区域提供一个宽波束, 并为采用数字波束形成 (DBF) 技术的用户提供多个转向波束 (图 4)。

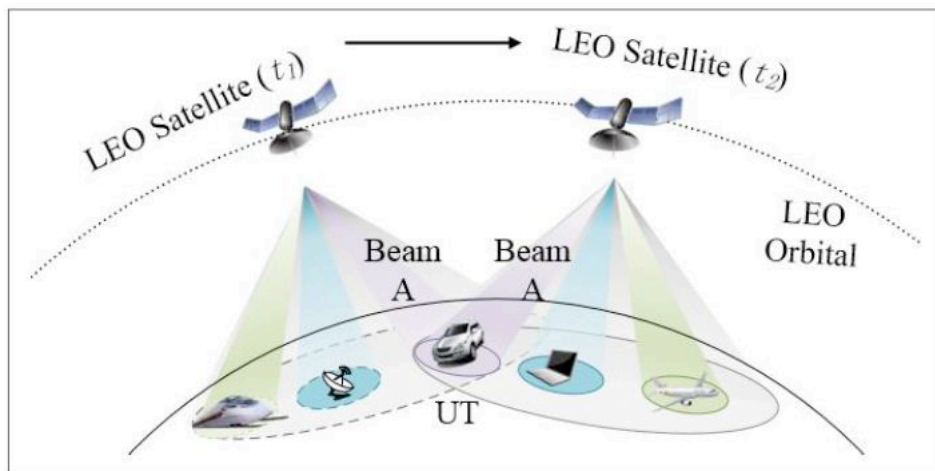


图 A.1.3 宽点光束覆盖拓扑

点波束总是被引导到用户,也就是说,它的足迹在 **SAT ELITE** 的移动期间大致固定。聚光光束的功率可以设计得比宽光束的功率高得多,这使得传输用户数据的调制和编码技术更加高效。通过精心设计,聚光光束的容量通常可以达到每秒数百兆比特。另外,由于聚光灯不是固定的,而是面向用户的,所以系统容量可以根据用户的需求来利用。宽波束固定,适用于控制信号的传输。请注意,由于切换只发生在任意两个卫星的宽波束之间,因此由于宽波束的大覆盖,切换的次数显著减少。切换过程如图 4 所示。假设 **UT** 在时间 t_1 由点光束 **A** 提供。当卫星移动到时间 t_2 的位置时,点波束 **A** 能够根据其位置的知识被引导到用户。当卫星移动到更远的地方时,用户会到达宽波束的边缘。如果从宽波束接收到的信号强度低于阈值,则触发切换过程,并且相邻卫星将建立一个新的点波束来为 **UT** 服务。尽管混合方案比点波束覆盖方案有许多优点,但其运行机制是复杂的,这反映在 **UT** 的接入过程中。当 **UT** 接通电源并访问系统时,它首先根据存储在其存储器中的启发式信息(例如, **ephemeris**) 查找当前可见卫星的位置。在与目标卫星的宽波束同步后, **UT** 接收来自宽波束的广播信息,发起随机接入,并将其位置报告给卫星上的空间基站。空间基站可以利用位置信息来引导建立指向 **UT** 的点波束指向。然后,可以通过信令将点波束参数,如频率、带宽和分配的时隙等报告给 **UT**。最后, **UT** 调整自身以适应分配的信道,并在点波束中开始数据传输。注意, **UT** 应支持宽波束和点波束中的信号和数据传输。此外,随着卫星的快速移动,为了保持数据的传输,卫星应该不断地调整其点波束指向 **UT**。所有这些操作增加了 **UT** 和空间基站的复杂性。根据国际电联的无线电规定, **NGSO** 卫星系统不得对 **GEO** 卫星造成不可接受的干扰,不得在固定卫星业务和广播卫星业务中要求 **GEO** 卫星系统的保护。在国际电联文件所列的频带内,地球静止轨道卫星轨道可见的地球表面任意点的有效功率通量密度 (**EPFD**) 不得超过规定的限值。同样,在上行链路中,由于 **GEO** 卫星的处理能力对干扰相当敏感,因此需要小心地管理 **LEO** 到 **GEO** 的上行链路干扰[8]。解决方案之一是将地球同步卫星与低轨卫星进行协调。参考文献 (9) 提出了 **GEO** 卫星系统和 **NGSO** 卫星系统的频谱共存策略,不仅解决了干扰问题,而且提高了谱效率。

OneWeb 采用渐进式节距方法，其中聚光光束在

图 4 混合宽点波束覆盖方案。

不同纬度以避免对地球同步卫星的强烈干扰。如图 5b 所示，当低轨卫星椭圆 A 位于赤道上方、地球同步轨道卫星正下方时，应将其关闭。为了保证卫星的无缝服务，低纬度的 B 等近邻低轨卫星可以调整卫星姿态，使点波束的方向能够覆盖赤道附近的用户。同时，低轨卫星用户还应调整天线倾角，确保用户、低轨卫星和地球同步轨道卫星不在同一方向。这样可以有效地减少低轨卫星系统对地球同步卫星的干扰。随着纬度的增加，点波束逐渐回到原来的投影方向，地面用户的天线 θ 角将倾斜到足够的角度，这样天线就不会指向地球静止轨道卫星。

在低轨卫星通信系统中，除了采用逐级变桨法外，还可以采用不同的干扰协调方法（即覆盖扩展法）实现混合宽点波束覆盖。在不丧失一般性的情况下，考虑一个简单的场景，一个地球同步卫星和一个轨道平面。如图 5c 所示，五颗低轨卫星 A、B、C、E 和 F 在地球同步轨道卫星的波束内。由于用户天线的指向性，可以忽略其余外围 LEO 卫星用户对 GEO 的干扰。因此，只有 A、B 和 E 三颗卫星覆盖区域的一部分用户才可能影响地球观测卫星。

考虑到混合宽点波束覆盖，覆盖扩展方法的主要思想是扩展宽点波束以覆盖相邻卫星的服务区域。当一颗卫星的服务区域与相邻卫星完全重叠时，可以将其关闭，以避免干扰 GEO。如图 5c 所示，卫星 A 位于 GEO 卫星正下方，其用户的上行传输将对 GEO 造成严重干扰。通过扩大低轨卫星的宽波束覆盖范围，B、E 卫星的宽波束可以完全覆盖 A 卫星的服务区域。因此，卫星 A 可以关闭，因为 B 和 E 可以安全地为其用户服务。由于卫星的定期移动，一旦设计了协调方案，NMC 就可以自动动态地配置卫星。在使用覆盖扩展方法时，应仔细考虑相邻波束重叠引起的频率干扰。这种内部干扰可以通过频率复用和频谱资源的动态分配来解决。

从本质上讲，渐进式变桨法和覆盖扩展法都具有相同的原理，即在主卫星关闭之前将用户转移到相邻卫星上。

宽带低轨卫星通信系统具有四个方面的资源：时间、频率、功率和空间。点束覆盖方法的资源分配已经在许多实际的卫星系统中得到发展，如铱星和全球星。例如，铱系统使用从地面蜂窝网络学习的频率重用方法。对于混合宽点波束覆盖方法，由于

包括宽光束和有限数量的点光束。

通常情况下,资源分配与卫星星座设计和覆盖方案有着密切的关系,这在前面已经解释过。然后需要为宽波束和点波束分配频率资源。由于每个空间基站的宽波束都承载着控制信令,因此所需的带宽很小。同时,该系统具有较宽的频带。因此,利用较大的频率复用因子可以避免卫星间重叠区域的干扰。另一方面,点波束主要负责用户数据的传输,需要较大的带宽。所幸的是,点波束在空间上是孤立的,因此可以采用较小的频率复用因子来提高系统效率,而波束之间的干扰很小。

为了实现低轨卫星系统的资源管理,需要一个两级管理模型。图 6 显示了 NMC 执行第一级管理。它通过收集和利用用户和空间基站的流量数据,管理整个网络的覆盖方法、网络规划、干扰协调和资源分配策略。例如, NMC 可以根据卫星的 QoS 策略和当前的频谱使用,为用户规划网络接入方案,从而使系统效率最大化。同时,空间基站进行二级管理。它主要对 NMC 计算出的点波束指向、卫星姿态调整、卫星关机策略进行实时响应。此外,空间基站负责为每个用户分配时隙、频率、带宽和功率控制。同时,我们还可以在空间基站中引入移动边缘计算技术,以减少延迟,提高体验。该两级计算模型充分利用了 NMC 与空间基站之间的协作关系,可以结合各自的优势,优化整个系统。

宽带低轨卫星通信是近年来一个热门话题。本文综述了低轨卫星系统的关键问题,包括系统结构、星座、覆盖模型、干扰协调方案和资源管理方法。总的来说,低轨卫星宽带通信系统的设计比 GEO 的设计具有更大的挑战性。在这方面还存在许多问题,如动态网络拓扑下的最优路由策略、多星座(特别是 GEO 系统)的协调以及用于最小化干扰的自适应频率和带宽使用。

未来,地面网和空间网将相辅相成,最终实现网络融合。它将为任何人在任何时间、任何地点提供稳定、方便、低成本的宽带接入服务。实现低轨卫星通信网络与其他网络的兼容、无缝切换、资源协调和减少网络间的干扰是我们需要进一步面对的挑战。

A Suboptimal Routing Algorithm for Massive LEO Satellite Networks

摘要

文摘—在具有 Sathelite 链路(ISL)的动态低层网络(LEO)中,通过这些线可以更好地理解代码和代码之间的联系。问题在于可以利用网络,可以利用网络覆盖网络最重要的部分。在很短的时间内,网络应用一般规律,局部网络研究就是这些问

题及其影响的结果。辛普森一家, 这个系统的改造是动力驱动, 发展这个系统的过程就是他们的工作。

Abstract

In a dynamic Low-Level Network (LEO) with inter-satellite links (ISLs), the connection between code and code can be best understood through these lines. The problem is that the network can be exploited, and the network can be used to cover the most important part of the network's. In a short period of time, so a general rule is applied on the network, and the local network study is the result of these problems and their effects. eSimplications, the fact that the transformation of this system is power-driven, and that the process of developing the system is their work.

在无星间链路的大型近地轨道 (LEO) 卫星网络中, 源节点和目的节点之间可以通过星地链路建立连接。利用卫星网络拓扑实时虚拟化算法, 假设可以感知作为拓扑相关矩阵值的星地链路的当前业务量, 该网络采用 Dijkstra 算法获得当前网络总流量的最短路径, 从而实现星座系统的负载均衡。由于卫星数量庞大, 网络拓扑结构复杂且时变, 很难在短时间内找到最优路径, 因此本文提出了一种基于网络拓扑的次优路由算法。利用源端和目的端网关的位置得到本地网络拓扑, 减少了 Dijkstra 算法建立相关矩阵所需的卫星数和网关数。通过仿真分析, 该算法的平均计算复杂度远低于全局最优路由算法, 路由的平均传播时延几乎相同。当网络负载正常时, 系统性能与全局最优路由算法基本相同。

随着新技术的发展和发射成本的降低, 低地球轨道 (LEO) 卫星网络星座的规模越来越大, 以增加系统容量, 为更多的用户提供服务。例如, OneWeb 系统有一个包含 720 颗卫星的星座计划, 而卫星的质量仅为 150 公斤[1][2]。海量星座可以增加系统容量, 实现多卫星覆盖。卫星小型化可以降低卫星研制和发射的成本, 大大提高卫星的生产速度。但由于其体积小、重量轻, 不考虑建立星间链路, 在地面网关实现交换和路由。自 1990 年以来, 学者们提出了大量的卫星网络路由算法。文献[3]将其分为空间虚拟化算法和时间虚拟化算法。空间虚拟化算法可分为覆盖域虚拟化和星座网络虚拟化。覆盖区域虚拟化将表面分成几个区域, 并分配固定的逻辑地址。文[4]中的算法将地表划分为超级小区和小区, 并考虑到距离小区最近的卫星覆盖小区。星座网络虚拟化将网络转换为一系列固定的虚拟卫星节点, 并通

过特定准则在这些节点和真实卫星节点之间存在一对一映射。文献[5]设计了一种新的天线结构来支持反向旋转接缝的布线。空间虚拟化方案隐藏了卫星的移动性，具有很强的适应性。然而，这种方案需要规则形状的星座，没有isl的空间很难实现虚拟化。时间虚拟化算法是在文献[6]中首次提出的，它利用卫星运动的周期性，将卫星网络周期划分为一系列固定的时间片，在某一状态下的卫星网络可视为具有固定的拓扑结构。文献[7]提出了一种新的 DTN 路由算法，称为 DQN，专门为准确确定性网络设计，并应用于卫星星座。时间虚拟化算法只需要知道卫星网络的拓扑结构，对星座是否有 isl 不敏感。然而，基于最短距离或最小跳数的路径计算对当前的网络拥塞等条件适应性较差。针对网络拥塞问题，文[8]提出了显式负载均衡（ELB）算法，当卫星提前知道下一跳链路负载时，选择较小负载的链路进行路由。文献〔9〕提出了最大流量最小残差算法（MFMR），合理分配链路负载，提高网络资源利用率。文献[10]在分离用户和卫星段的基础上，提出了具有负载均衡能力的跳约束自适应路由机制。负载均衡方案能有效地处理突发性网络拥塞，但需要星座的链路状态信息和信道资源利用率。文献[11]提出了 SALB 路由模型，该模型通过在每次切换开始时重置路由表，并通过有效的最短路径树算法在两次连续切换之间动态更新路由表，从而降低了路由开销。当卫星数目很大时，采用时间虚拟路由算法搜索路径是全局最优的，导致计算量大。

为了降低路由的计算复杂度，本文提出了一种新的算法，称为近似最优路由算法（ORAA）。根据源网关和目的网关的位置关系，建立 Dijkstra 算法的子相关矩阵，并根据网络流量情况实时更新矩阵值，选择最优路径进行负载均衡。该算法保留了时间虚拟化算法低延迟的优点，与理想的负载均衡解决方案的容量性能不相距甚远，大大降低了计算复杂度。

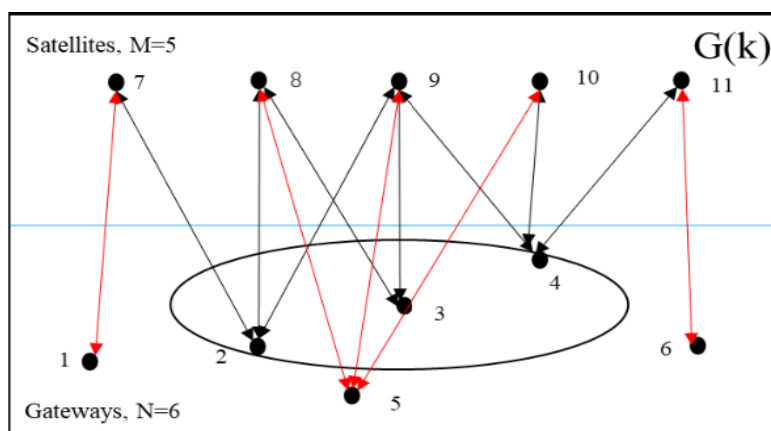


图 A.1.6 系统模式

II. SYSTEM MODEL

近似最优路由算法的思想是利用局部拓扑结构尽可能地减小相关矩阵的大小。根据源网关和目的网关的位置选择一定范围的网关，找到这些网关可以通信的卫星，重新编号，建立子相关矩阵。次相关矩阵的值由主相关矩阵求出，主相关矩阵是指所有卫星和网关构造的相关矩阵，

大小为 $(N+M) \times (N+M)$ ，其中 N 是网关总数， M 是卫星总数。路线

路径是子相关矩阵中最小的负载路径。这样，通过减小相关矩阵的大小，可以降低 Dijkstra 算法的计算复杂度。由于子相关矩阵是基于局部拓扑结构建立的，因此可能会导致某些网关无法相互通信。在这种情况下，主相关矩阵用于搜索最小负载路径。建立和维护子相关矩阵的过程如下：

例如，在图 1 中，假设网关 2 和网关 4 彼此通信。 $r=0$ 的地面搜索网关为 2、3、4，黑线表示可以通信的卫星，卫星数为 7、8、9、10、11。上述分析表明 $n=3$ ， $m=5$ 。建立的次相关矩阵的大小为 $n+m=8$ 。

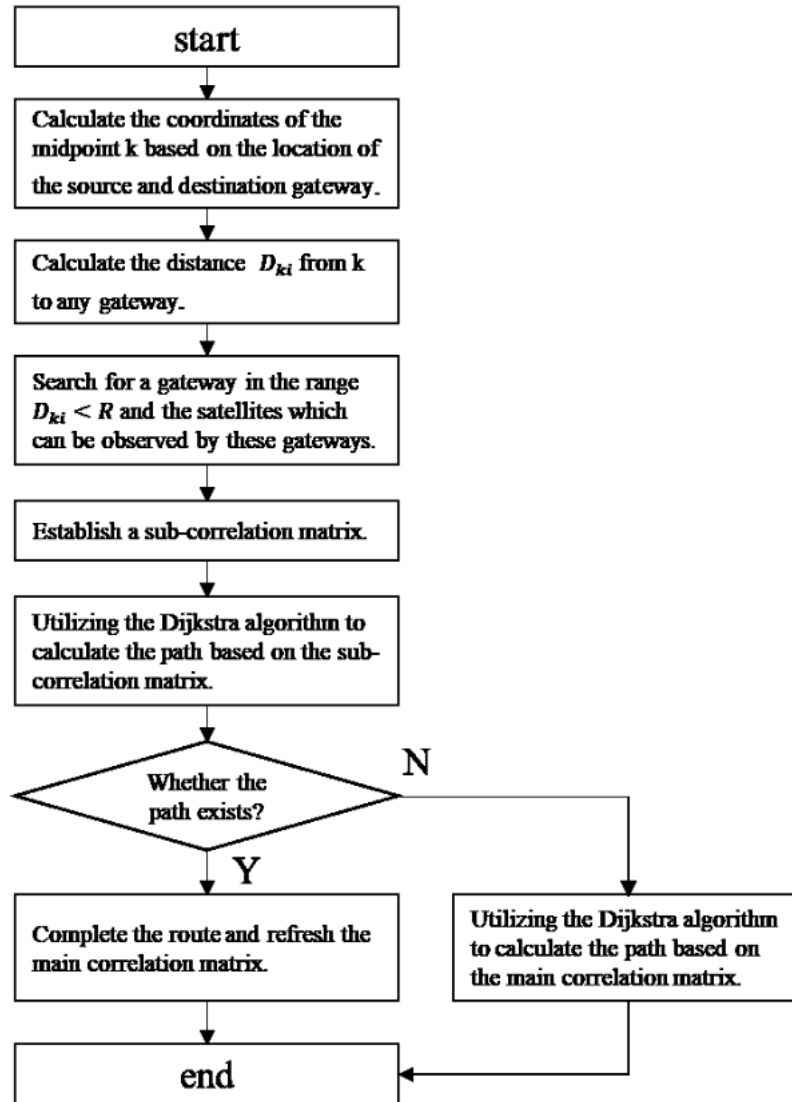


图 A.1.7 AORA 算法

子相关矩阵只与当前时间片的网络拓扑和源、目的网关的位置信息有关，可以预先计算。同时，仅使用局部拓扑信息可能会导致一些节点无法通信，增加 R 和使用主相关矩阵可以补偿这一点，这将增加卫星的计算复杂度。

A、模拟参数

本文利用 MATLAB 2014a 软件模拟了在如此短的时间内星座拓扑不变的时间片内的路由情况。我们使用的极轨星座由 720 颗卫星组成（18 个轨道平面，每个轨道平面 40 颗卫星，相邻轨道平面上 4.5° 相邻卫星），轨道高度为 1200 公里。此

外，地面上有 46 个网关，如图 3 所示。路由只是考虑卫星地面链路，假设每个网关的最大容量上行链路/下行链路为 920GbPS，总容量为 4220GbPs。

假设地面通信被划分为以网关为中心的 46 个站点（相当于网关数量）。每个区域的流量相等，并且路由到每个目标网关的流量相同且均匀分布。

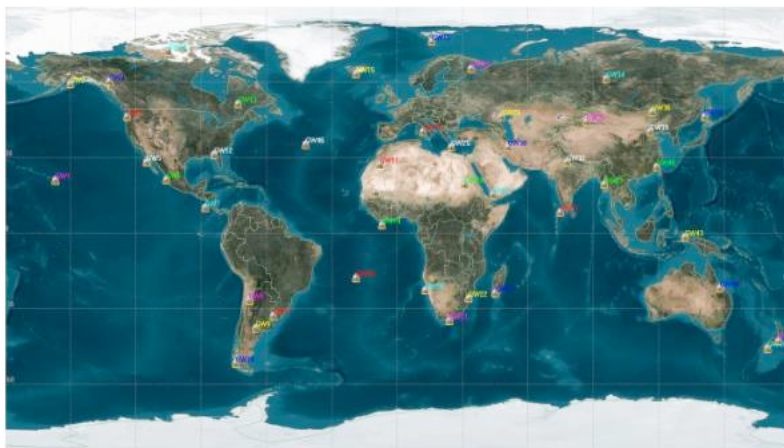


图 A.1.8 网关分配

B、计算分析

子相关矩阵的平均大小受补偿距离 r 的影响，如图 4 所示。我们模拟了全世界任意两条路线的星座计算，并计算了 AORA 的加法计算与 GORA 的加法计算之比，如图 5 所示。

对应全局最优路由算法（GORA）平均大小 $N+M=766$ ，数量为
计算值为 1.24×10^9 。结果表明

补偿距离半径为，子相关矩阵的平均大小越大，计算量越大。 $r=0$ 近似优化算法的最小计算复杂度仅为全局最优解的 13.15%。

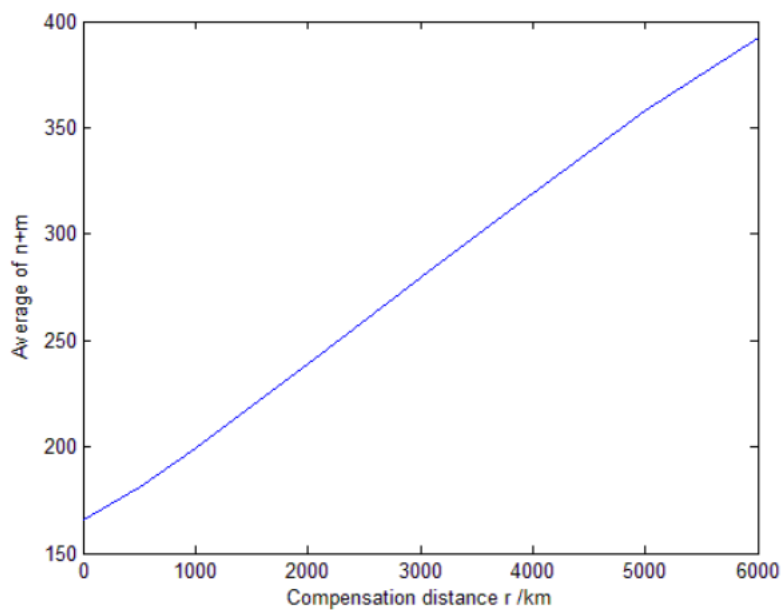


图 A.1.9 子相关矩阵的平均大小

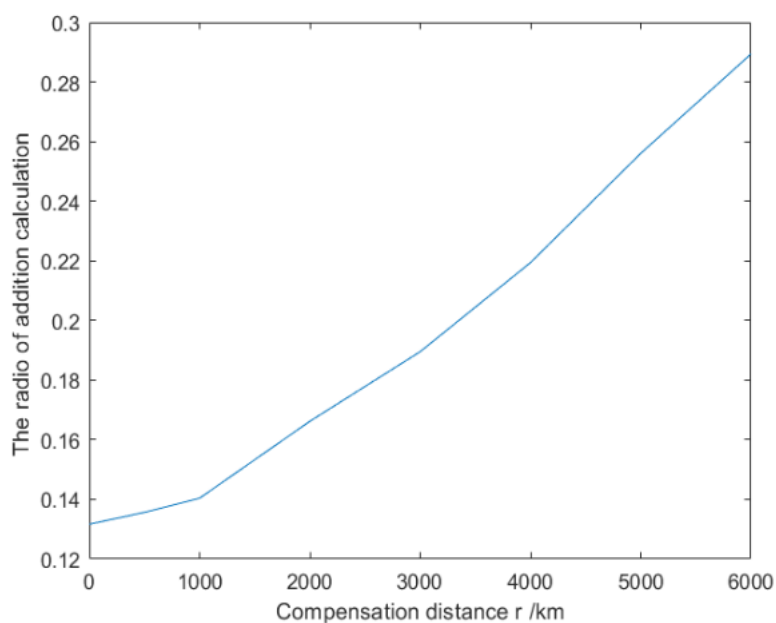


图 A.1.10 加法计算电台

C、容量和传输延迟仿真结果

仿真结果基于时间片中某一时刻的星座容量，不发生重路由。图 6 和图 7。给出了当全局最优解和补偿距离不同，地面业务量不同时，成功路由业务量与传输时延的差异。

当全局流量不超过最大星座容量时，近似最优路由算法和全局最优算法的系统容量几乎是相同的。当地面业务量为 42320Gbps 时，全局最优算法的成功传输容量为 42320Gbps。在 $R=0, 2000, 4000$ 成功传输的近似最优算法的容量分别为 42192, 42056 和 41972Gbps。不同的源网关和目的网关会产生不同的子相关矩阵，从而避免了由于使用局部拓扑结构而造成的网络拥塞。近似最优路由算法和全局最优路由算法的传输时延约为 54 毫秒，两者之间没有显著差异。

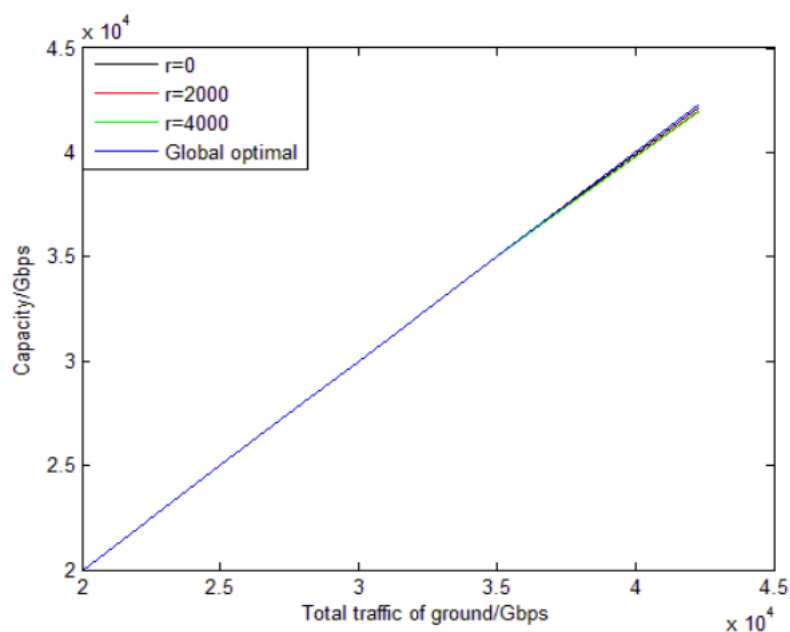


图 A.1.11 试验容量结果

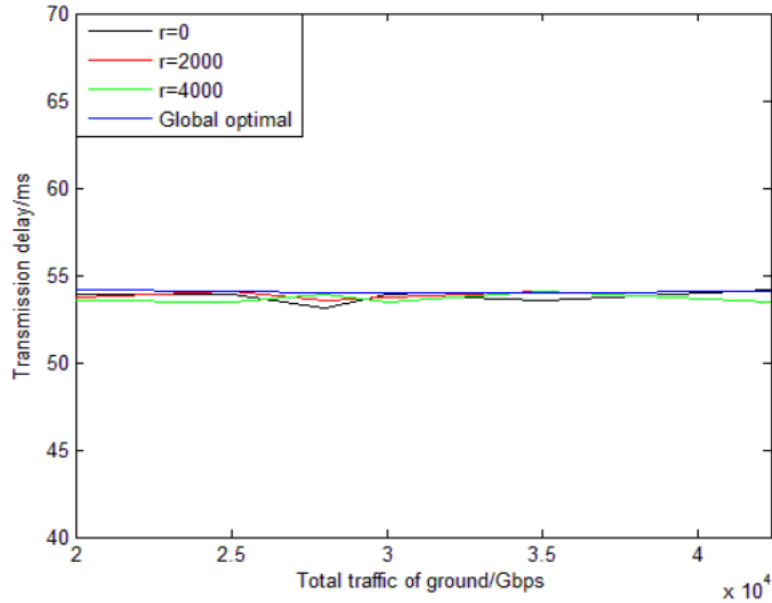


图 A.1.12 传送延迟时间的结果


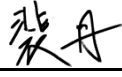

我们假设地面流量是均匀分布的，并且到每个目的地网关的流量是相同的。在这种情况下，负载平衡算法不会导致拥塞。因此，当地面总流量不超过星座容量时，传输延迟与地面总流量无关。本文提出了近似最优路由算法，并在理想的负载均衡算法下进行了仿真。该近似最优路由算法利用 Dijkstra 的局部拓扑结构，根据源和目的地网关的位置建立子相关矩阵，减少了算法的相关矩阵的大小。这降低了路由的计算复杂度。仿真结果表明，近似最优路由算法的平均计算成本为全局最优算法的 13.15%，性能与全局最优路由算法的性能几乎相同。当主相关矩阵用于补偿不可达网关时，增加补偿距离 R 将增加计算负载，但是算法的性能没有改善，并且近似最优路由算法将在没有距离补偿的情况下更好地执行。


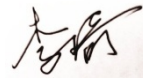
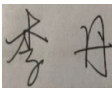
原文索引

- [1] A Suboptimal Routing Algorithm for Massive LEO Satellite Networks Yilun Liu, Lidong Zhu National Key Laboratory of Science and Technology on Communications University of Electronic Science and Technology of China Chengdu, China.
- [2] Structural Properties of a Low Earth Orbit Satellite Constellation - the Walker Delta Network Chia-Jiu Wang Department of Electrical and Computer Engineering University of Colorado at Colorado Springs P.O.Box 7150 Colorado Springs, CO 80933.

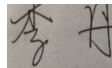
Broadband LEO Satellite Communications: Architectures and Key Technologies Yongtao Su, Yaoqi Liu, Yiqing Zhou, Jinhong Yuan, Huan Cao, and Jinglin Shi.

综合论文训练记录表

学生姓名	姜东瑾	学号	2014080043	班级	计 62
论文题目	低轨道卫星网络路由算法研究				
主要内容以及进度安排	<p>本文中,主要分析了在利用低轨道卫星网络路由中通过除掉小于计算最小持续时间 L_t 的卫星间的线提高 QoS(Quality of Service)。利用动态选路的路径安排将通过以下步骤进行。首先设计一个网络拓扑 $G=(S, L)$。第二 ISL 集合 L 中复制, 取得 L'。</p> <p>利用满足可链接切换的 ISL 中的最小持续时间计算最小持续时间 L_t。然后删除满足小于卫星切换时间的持续时间。最后计算 L' 中的各个线的费用。然后把 L' 放进去原来的网络拓扑 G 结果生成 $G'=(S, L')$。发生切换的时候使用 G' 来计算。G' 构成的这些 ISL, 对所有 UE 都有不同的执行和执行时间。G' 构成的 ISL 将影响网提供的 QoS 和网资源的有效利用。</p> <p>进度安排: 进一步的文献调研 3 周 (1.13~1.26), 设计网络拓扑 3 周 (1.27~2.16) 应用动态选路 4 周 (2.17~3.15), 聚合 3 周 (3.16~4.5) 测试输出结果 3 周 (4.6~4.26), 综合 3 周 (4.27~5.17) 论文撰写 3 周 (5.18~6.7)</p> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;"> 指导教师签字:  考核组组长签字:  2020 年 1 月 9 日 </div>				
中期考核意见	<p>该同学毕设中期整体进展顺利, 研究问题有较大的细化, 技术方案有合理的实现, 有一定的创新性, 答辩讲解清晰, 回答问题准确。</p> <div style="text-align: right; margin-top: 20px;"> 考核组组长签字:  2020 年 4 月 4 日 </div>				

<p>指导教师评语</p>	<p>论文对低轨卫星网络的路由算法进行了优化，在调研已有研究的基础上提出了优化连接持续时间的选路算法，并通过模拟试验进行了验证。论文内容充实，条理清晰，基本达到综合论文训练的要求。</p> <p>指导教师签字： </p> <p>2020年6月12日</p>
<p>评阅教师评语</p>	<p>论文研究低轨卫星网络的动态路由问题，研究问题有重要意义和应用价值。论文提出了基于链路持续时间的路由算法，并基于模拟实验验证了算法的性能。论文书写较规范，基本达到综合论文训练的要求。</p> <p>指导教师签字： </p> <p>2020年6月12日</p>
<p>答辩小组评语</p>	<p>论文达到了综合论文训练要求。答辩讲解清晰，回答问题准确。</p> <p>答辩小组组长签字： </p> <p>2020年6月14日</p>

总成绩： 84



教学负责人签字： _____

2020年6月14日