

满足用户与任务应用需求的卫星网络服务质量 QoS 需求分析^{*}

易先清 赵 阳 冯明月 罗雪山

(国防科技大学五院 C⁴ISR 国防科技重点实验室 长沙 410073)

摘 要 本文主要分析满足用户与任务应用需求的卫星网络服务质量 QoS 需求,为设计建设满足某应用需求的卫星网络提供支持。首先分析卫星网络组成结构特点与运行结构特点,再对满足用户与任务应用需求的卫星网络服务质量 QoS 关键指标—时延及时延变化进行重点分析,包括分析其产生的原因与分类、分析对卫星网络通信产生影响和改善措施等,最后以主要满足天基预警系统建设需求为目标。基于上述研究,提出基于 GEO/MEO 双层星座和地面关口站共同组成的分层协同的卫星网络系统。

关键词 卫星网络, QoS 指标, 时延, 丢包, 网络吞吐量

Analysis of QoS Requirement of Satellite Network Satisfying Applications Demands of Users and Tasks

YI Xian-Qing ZHAO Yang FENG Ming-Yue LUO Xue-Shan

(C⁴ISR Key Laboratory of Defense Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract In this paper, QoS (Quality of Service) requirements of satellite network satisfying applications demands of users and tasks are analyzed in order to support the design and construction of satellite network satisfying applications demands. At first, the characteristic of architecture and operation of satellite network is analyzed, then the key QoS indexes satisfying applications demands of users and tasks such as delay and delay varying are analyzed emphatically, including the reason and type of forming, affections to communication in satellite network, steps of improving, etc. At the end, the cooperation satellite network that is composed of GEO/MEO two-layer satellite constellations and terrestrial is proposed on the based of the design and construction requirement of space-based warn system.

Keywords Satellite network, QoS index, Delay, Delay varying, Network throughput

1 引言

尽管可以将面向地面网络服务质量 QoS 的研究推广到空间卫星通信网络,但针对由多层卫星星座与地面终端共同组成的卫星通信网络而言,其服务质量 QoS 的研究更显复杂。与地面有线网络具有相对固定的拓扑结构不同,由于卫星通信网络中的主节点—通信卫星不断移动,造成卫星链路延时和网络连接性的不断变化,从而使卫星网络具有动态的拓扑结构。卫星网络尽管与基于 QoS 需求网络路由由研究热点之一——具有动态拓扑结构的 ad-hoc 网络在组网结构上有些类似,但卫星网络中以各节点间的长延时通信为主的特有属性造成满足用户与应用不同服务质量 QoS 需求分析愈发复杂;当某卫星链路关闭时,要求进行网络路由的重计算,以维持通信节点间路径的持续连接性;通信路径的重新选择计算将增加延时抖动、信号处理负载以及工作链路阻断率。

本文主要研究从卫星网络系统结构特点与运行维护特点出发,分析包括时延及时延变化、丢包以及吞吐量等卫星通信网络服务质量 QoS 关键指标,最后结合不同用户与任务需求,以主要满足天基预警系统建设需求为目标,提出一种基于 GEO/MEO 双层星座和地面关口站共同组成的分层协同的卫星通信网络系统。

2 卫星网络系统结构与运行维护特点分析

研究卫星网络系统结构特点主要对卫星网络及其组成特

点进行分析,分析其组成结构、组成关系、功能结构特点。研究卫星网络的运行维护特点主要对卫星网络及其组成的运行规律、运行控制、运行管理特点进行分析,为卫星网络服务质量 QoS 关键指标需求分析奠定基础。

2.1 卫星网络通信组成分析

卫星网络由各种不同类型的通信节点组成,包括位于地球上空的卫星和地面上的关口站。卫星节点包括位于不同高程层次各类卫星,地面关口站则根据需求建站可能性分布在地球表面不同位置,如图 1 所示。

卫星网络由 GEO、MEO、LEO 和 HEO 星座中的一种或几种组成,即有的卫星网络由单层星座组成,如由 LEO 星座组成的铱星系统、由 MEO 星座组成的全球定位系统 GPS、由 GEO 星座组成的 Intelsat 全球通信系统等;也有的卫星网络由多层星座协同组成,如美国正在建设的 SBIRS 系统(将由 2 颗 HEO 卫星和 4 颗 GEO 卫星组成)的高轨星座与由 24 颗低轨星 LEO 组成的低轨星座共同组成。各星座又由各卫星节点组成。

卫星网络中各通信节点间通过各种无线通信链路连接,各种类型的通信链路分别具有不同的特性。这些链路主要包括星间链路 ISL_S (Inter-Satellite Links)、轨间链路 IOL_S (Inter-Orbital Links)、用户数据链路 UDL_S (User Data Links) 三类,其中星间链路 ISL_S 指卫星网络内同一星层中卫星间的通信链路,可以指 GEO 星座中的通信链路 ISL_{GEO}、MEO 星座中的通信链路 ISL_{MEO}、LEO 星座中的通信链路 ISL_{LEO}, 甚

^{*} 国防预研基金(编号:51406020401KG01)。易先清 博士,副教授,硕士生导师,主要从事 C⁴ISR 系统分析与设计、空间信息栅格等方面的研究;罗雪山 教授,博士生导师,国防科技大学体系结构实验研究室主任,总装备部军事电子信息系统综合技术专业组成员,主要研究方向为 C⁴ISR 系统、计算机建模与仿真。

至 HEO 星座中的通信链路 ISL_{HEO} 。在 MEO、LEO 星座中， ISL_s 又分为同轨星间链路 ISL_{tra} (intra-plane ISL, 指同一轨道面上邻近卫星间的通信链路) 和邻轨星间链路 ISL_{tr} (inter-plane ISL, 指邻近轨道面上邻近卫星间的通信链路)。轨间链路 IOL_s 指卫星网络中各层卫星间的通信链路, 有时也称星际链路, 包括 GEO 星座与 MEO 星座之间、MEO 星座与

LEO 星座之间, 以及 HEO 星座分别 GEO 星座、MEO 星座、LEO 星座之间可能存在的星际链路 IOL_s 。用户数据链路 UDL_s 指卫星网络中各层内任意卫星与地面关口站之间的通信链路, 地面关口站与 GEO 星座、MEO 星座、LEO 星座甚至 HEO 星座之间可能存在的用户数据链路 UDL_s 。

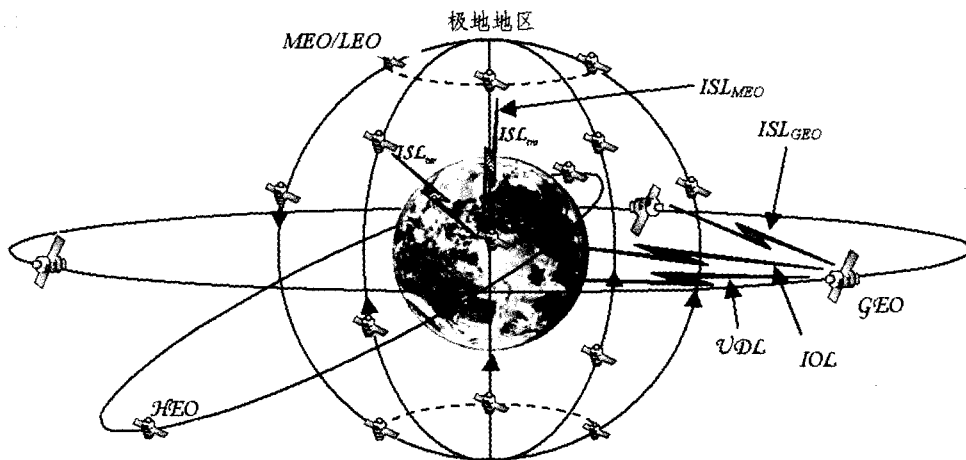


图 1 卫星网络组成结构

2.2 卫星网络组成结构与组成关系分析

早期的卫星网络或应用相对简单的卫星网络一般由单层星座组成, 这种卫星网络对技术要求和建设成本相对较低。但随着技术不断成熟与快速发展, 用户和应用要求卫星网络提高服务的容量与质量不断提高, 卫星网络向着由多层星座协同构成的方向发展, 这从美国的天基预警系统的建设过程就可看出。美国早期的天基预警系统—国防支援计划 DSP 是由 GEO 卫星组成的单层星座, 作为 DSP 的下一代替代系统—目前正在建设的由 SBIRS 系统则由 HEO、GEO 和 LEO 三层星座共同组成, 如图 2 所示。

由多层星座组成的卫星网络通过层间通信链路联系起来, 网络中具有通信处理能力的节点称为通信节点, 可以是网络中的卫星或地面节点。在卫星网络中, 上层通信节点提供对下层通信节点的通信覆盖。当上层通信节点对下层通信节点提供通信覆盖时, 为了提高有限频谱资源, 在一个节点提

供的通信覆盖域内通过不同载频的多个波束蜂窝覆盖, 或以 CDMA 的方式进行覆盖。随着上下层间的相对移动, 上层通信节点提供的这种通信覆盖域在不同的时间段会覆盖不同分组的下层节点, 因此上下层通信节点间建立的通信链路将会发生切换, 这种切换依据网络中星层间的通信覆盖域关系建立或撤销上下层星座卫星间的通信链路来实现。根据这种通信覆盖关系和网络中通信节点间链路的存在关系建立卫星网络运行组网与管理维护模式, 在运行组网与管理维护模式的基础上设计适应本卫星网络的传输协议与路由算法。

从上可以看出, 卫星网络的组成及其关系分析主要建立在卫星节点通信覆盖域覆盖关系及覆盖域内通信链路连接关系的分析上。卫星网络中通信节点提供的通信覆盖域最初以满足用户或应用需求为设计目标, 考虑的是简单的几何问题, 但考虑到受地面和空间的可用技术以及其它如辐射环境等因素的严重影响, 问题开始变得复杂。

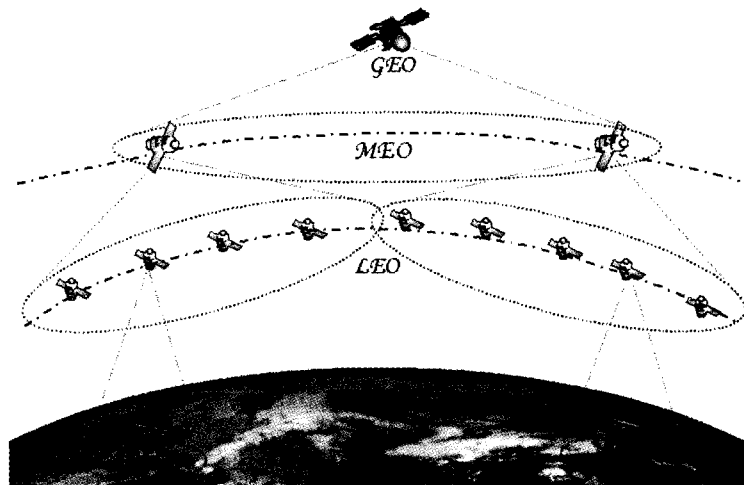


图 2 多层星座组网结构及关系

首先考虑通信覆盖的几何因素, 如图 3 所示, 设通信卫星 A 在离地心 O 距离为 r_s (即图中 OA) 的轨道上运转, 需与某

通信节点 S 进行联系时, S 对卫星 A 的仰角为 ϵ , 得到: $\cos\epsilon = [r_s \sin(\Psi)]/d$, 该式中的所有参数是卫星网络系统结构的重要输出, 先设卫星对地面均匀覆盖, 中心角 Ψ 将导出地球表面的覆盖区域。距离 d (即图中 SA) 决定了沿电波传输路径的自由空间路径损耗, 它是链路预算设计的重要因素之一。仰角 ϵ 影响天线的发射功率, 因为周围的地形和建筑物可能对电波传播构成障碍, 还有沿着通向卫星的路径的传播损耗也会遇到。频带在雨天会受到很大的衰减, 对于频带内控制的系统来说, 仰角 ϵ 是十分重要的设计因素。

这是由于仰角 ϵ 越小, 上下层通信节点间的直线距离 AS 就越长, 距离 AS 越长, 无线电波信号发生在该距离路径上的损耗就越大, 时延也越长。当下层通信节点为处于地面上的关口站时, 处于卫星传输载波波段的无线电波信号易受雨水的影响而衰减, 特别是在倾斜的无线信号路径上带来严重的信号衰减, 所以仰角 ϵ 越小, 倾斜度越大, 雨水致使无线电波信号的衰减越严重。当选择仰角 ϵ 时再考虑无线电波信号传输时的阴影效应和多径效应, 情况更加复杂。

2.3 卫星网络运行规律分析

卫星网络由各层星座协同组成, 分析其运行规律就是分析其组成部分运行规律和协同运行规律, 下面首先分析卫星网络中各组成星座的运行规律, 然后分析其协同运行规律。

不同星座的运行规律主要反映其运行轨道上, 根据相对地面移动与否分成两类: 第一类是围绕地球旋转而旋转周期与地球自转周期一致的静止轨道星座, 第二类是围绕地球旋转但与地球自转不一致的卫星星座。由于这类星座相对地面移动, 因此其运行分析更加复杂。对于这类星座, 又可以细分围绕地球做圆周运动的星座和做椭圆运动的星座。做圆周运动的星座还可以细分。

第一类星座主要由位于地球赤道上空的地球同步星 GEO 组成。由于旋转周期与地球自转周期一致, 因此从地面某点看上去它们好像静止不动, 其特点是该星座与地面相对静止, 因此与地面通信节点组网运行时具有相对固定的网络拓扑, 其传输协议与路由算法也相对简单。对于与地球自转周期一致但位于地球赤道面之外的星座则因应用受限很少关注。

第二类星座分为围绕地球做圆周运动的星座和做椭圆运动的星座。由于这类星座相对地面移动, 甚至各星座之间、星座中各不同轨道面的卫星之间也发生相对移动, 因此这类星座的运动规律相比上述第一类星座要复杂得多, 基于这类星座的传输协议与路由算法也更显复杂。

做圆周运动的星座主要针对由 MEO 卫星或 LEO 卫星组成的星座, 这类星座中的卫星围绕地球做圆周运动, 由多个这样的卫星分成一组, 分散位于同一圆形轨道面上的不同相位点上, 由多个不同的这种圆形轨道面共同组成圆轨星座。根据圆形轨道面相对地球的位置不同, 这类圆轨星座又分为星形星座、极轨道星座(或优化极轨道星座)、Walker 星座、玫瑰星座和 Ω 星座等。

2.4 卫星网络运行管理分析

根据上述卫星网络中不同星座所具有的运行特点, 结合用户或任务的不同应用目的, 可以实现卫星网络的有效运行管理, 这种运行管理最终体现在卫星网络组网传输协议与路由算法上。因此进行卫星网络运行管理分析实际上是对利用网络各星座的运行规律进行满足用户或任务需求的组网模式及其网络传输协议与路由算法设计进行分析。

无线电波传播过程中由于受地球的遮挡、通信节点间的相互移动、环境因素的干扰以及自身的相互干扰等因素的影响, 因此卫星网络不可能建立成任意两通信节点间直接连接的理想全连通网络, 这样就必须选择性地建立这些通信节点间的通信链路, 如何选择性地建立通信节点间的通信链路反映在卫星网络运行管理模式上。卫星网络运行管理在结合卫星网络运行规律的基础上以满足用户或任务的应用需求为最终目标, 进行卫星网络运行过程中各星层内的组网管理和星层间的组网管理。

2.5 卫星网络运行环境分析

进行卫星网络运行环境分析, 主要对影响卫星网络运行的各种环境因素进行分析, 以便分析其对卫星网络服务质量 QoS 指标产生的影响, 为构建满足用户或任务应用需求的卫星网络提供支持。影响卫星网络运行的环境因素多而复杂, 主要传输衰减、星蚀与日凌中断、仰角与频率变化衰减等因素。

3 卫星网络系统及其服务质量 QoS 关键指标需求分析

从卫星网络系统结构与运行维护特点出发, 进行服务质量 QoS 关键指标需求分析, 包括卫星网络时延及时延变化分析、业务流数据分组传输丢包分析、卫星网络吞吐量分析, 研究这些影响卫星网络服务质量 QoS 指标的分类与其产生的原因、对卫星通信产生的影响以及针对性的改善措施。下面主要对卫星网络服务质量 QoS 关键指标中的延时指标进行需求分析。在此基础上提出一种满足要求的基于 GEO/MEO 双层星座和地面关口站共同组成的分层协同的复合通信网络系统。

在卫星网络中, 时延指一项业务从源节点到达目的节点的平均经过时间, 源节点与目的节点位于包含地面关口站的卫星网络中, 是卫星网络最重要的服务质量 QoS 指标。卫星网络中时延也包括节点处理时延、节点排队时延、传输时延和传播时延。

3.1 时延分类与产生原因

处理时延是指(数据包)分组从某卫星节点输入端经过该节点处理后到达其输出端之间的延时。若节点的传输队列在其输出端, 则排队时延是指分组进入传输队列排队等待到被该卫星发射离开队列之间的延时。若节点的输入端有一个等待队列, 则排队时延是指分组进入该队列排队等待到进入节点开始处理之间的时延。在卫星网络中, 传播时延指存在直接通信链路的两节点卫星间信号传播时间, 依赖于两节点卫星间的可视直线距离, 在卫星网络中是产生平均时延的主要因素, 特别是在依赖同步星 GEO 或高轨星 HEO 进行通信的卫星网络中, 传播时延更是卫星网络服务质量 QoS 的主要因素。

另外, 根据同一业务流中不同分组所呈现的时延变化频率不同, 将时延分为抖动与漂移。抖动指高频率的时延变化, 而低频率的时延变化称作漂移。抖动主要是由于卫星网络中负载失衡造成数据流中相继分组的排队等候时间不同、以及因通信覆盖的原因发生星间/星际链路的切换等因素引起。漂移主要因卫星网络中卫星相对移动造成链路物理可视直线距离持续变化而引起。在卫星网络中, 根据卫星网络通信资源配置、路由/协议设计与传输业务类型的不匹配, 链路拥塞既可能引起抖动也可能造成漂移。

(1) 传播时延产生的原因

在各星座系统中, GEO 星座系统中的 GEO 卫星与地面终端之间的距离最长, 因此通信延时也最长, 双向通信时延约为 250ms, 且链路损耗也最大。在实际应用中, 地面某关口站与 GEO 卫星之间通常以一定的倾角连接, 地面到一颗 GEO 卫星的倾斜距离的典型值为 39000km, 在这样一条 GEO 链路(地面站到卫星再到地面站)上的单向时延为 $2 \times (\text{距离}/\text{速度}) = 260\text{ms}$ 。

HEO 星座中的 HEO 卫星与地面终端之间的距离变化最大, 双向传播时延处于 20~250ms 之间变化, 链路损耗也随之变化。MEO 星座系统中的 MEO 卫星与地面终端之间的双向通信时延处于 100~150ms 之间, 链路损耗也相对较小。LEO 星座系统中的 LEO 卫星与地面终端之间的通信延时最短, 双向传播时延为 25~75ms 之间, 链路损耗也最小。在一条经过光纤横贯大陆的 4000km 的典型链路中的单向时延仅比 13ms 稍大一点。

另外, 若卫星网络中存在同层星座内两卫星节点之间的星间通信链路, 或异层星座之间两卫星节点之间的星际通信链路, 也会存在信号传输时的传播时延, 其链路长度因星座组网结构不同而长短不一。如两 GEO 卫星之间的可视直线通信距离为 88000km, 为星间/星际通信链路最长者, 发生在其链路上的传播时延也最长, 单向传播时延大约为 290ms。两相邻 LEO 卫星之间的星间链路最短, 如铱星系统约为 4000km, 为星间/星际通信链路最短者, 发生在其链路上的传播时延也最短, 单向传播时延大约为 15ms。

根据以上分析可以看出, 卫星网络中产生的时延大约位于 20ms 至 600ms 之间, 其中主要因素是依赖卫星网络中两通信节点间物理可视直线距离的链路传播时延。对于由信源编码和/或压缩、信道编码、交换元件中的基带处理、帧长等组成的处理时延, 在卫星网络中一般要小于链路传播时延, 通常在 100ms 以下, 维持在 40ms 左右。

(2) 抖动产生的原因

在卫星网络中, 造成时延抖动的主要原因有两类: 一类是卫星网络中负载失衡造成数据流中相继分组的排队等候时间不同, 另一类是因通信覆盖域相对移动发生星间/星际链路的切换造成数据流中相继分组传输的时间变化。

对于第一类抖动, 又主要有如下 3 种原因可以引起卫星网络中的负载失衡, 从而造成其数据流相继分组的排队等候时间不同而产生时延抖动。第一种是基于卫星网络的路由算法存在缺陷; 第二种是卫星网络的物理拓扑结构发生预料之外的变化; 第三种是要求卫星网络服务的业务流变化超过网络正常承载能力。

① 因路由算法存在缺陷造成路由选择不合理而引起的业务传输时延抖动: 这是一个实际存在的问题, 即使存在一种有效的路由算法也很难同时适应卫星网络的动态拓扑结构与业务流量的随机多变情况。此种情况又可细分为多种情况, 如路由算法本身不合理、路由算法收敛过慢、路由算法精度不够等;

② 因卫星网络的物理拓扑结构发生预料之外的变化而引起的业务传输时延抖动: 在以卫星为主要通信节点的卫星网络中, 这是一个普遍存在的问题。卫星网络的物理拓扑结构因各种可能因素发生预料之外(指未考虑到路由算法设计之中)的变化, 如多种因素影响造成卫星整体或局部的主动或被动的暂时失效或永久故障, 由此造成卫星网络中通信资源

的失衡, 这种通信资源的失衡将最终映射到经过该网络业务流的失衡, 再加上所设计的路由算法本身就没有预计到这些情况的发生, 从而造成故障区域业务流量的拥塞, 这种情况将增加业务传输时的时延抖动;

③ 因要求卫星网络服务的业务流变化超过网络正常承载能力而引起的业务传输时延抖动: 这是一个经常发生的问题, 由于用户与应用对卫星网络通信范围与质量需求的不断增长, 要求卫星网络为不同用户与多种应用提供同时满足的通信需求, 从而造成卫星网络中业务流变化在某一时间段超过网络正常承载能力, 引起业务传输的时延抖动。此种情况也可细分为多种情况: 如卫星网络中某路径正常传输业务时, 网络中又出现优先级更高的业务需要占用该路径上某些通信链路, 从而造成原业务传输的暂停, 引起其传输的时延抖动。另外, 用户与应用针对卫星网络业务需求的变化独立于卫星网络的服务结构, 某些特定要求的业务传输可能造成卫星网络某些资源过载, 而另一些资源欠载, 从而引起其传输的时延抖动, 如长时间针对某地的视频监控将会造成某些通信链路的拥塞, 从而造成其它业务传输时的时延抖动等。

对于第二类抖动, 又主要有如下三种原因可以引起因通信覆盖域相对移动发生星间/星际链路的切换造成数据流中相继分组传输的时间变化, 从而造成其数据流相继分组等候发射的时间不同而产生时延抖动。第一种是基于上层卫星对下层通信节点(包括卫星和地面用户终端)通信覆盖域相对移动而发生的星际链路 IOL_s 的切换; 第二种是同层星座中相邻卫星间因某种原因造成的星间 ISL_s 链路的切换; 第三种是由于卫星节点或通信链路失效造成可行路径上的链路切换。

① 上层卫星对下层通信节点(包括卫星和地面用户终端)通信覆盖域相对移动而产生的星际链路 TOL_s 的切换而引起的业务传输时延抖动: 在卫星网络中, 特别是基于多层星座组成的协同复合卫星网络系统中, 由于不同星层的卫星相对地面移动的速度不同, 因此造成了异层卫星间或卫星与地面用户终端间的通信连接链路无法固定, 在某一段时间内, 满足通信链路建立条件的两通信节点(卫星或地面终端)建立直接通信链路, 随着通信节点的相对移动, 一段时间后, 通信链路建立条件被破坏, 建立的直接链路被迫断开, 发生链路断开的通信节点不得不寻找满足通信链路建立条件的其它通信节点来建立直接链路, 这样就发生了卫星网络中星际链路的切换, 这种链路切换将引起经过该链路的数据流中相继分组传输的时延抖动;

② 同层星座中相邻卫星间因某种原因造成的星间链路 ISL_s 的切换而引起的业务传输时延抖动: 在某些卫星网络中, 同层星座中相邻卫星间存在直接连接的通信链路, 这种通信链路随着星座中卫星的移动, 相互之间的物理拓扑结构将发生变化, 如物理可视直线距离变化、物理可视指向变化等, 这些变化可能造成直接通信链路的重新连接, 这种相邻卫星节点间的重新连接也将引起经过该链路的数据流中相继分组传输的时延抖动。另外, 当星座中的某些卫星移动到相对地面某些敏感区域(如极地区域、敌方防御区域等)时, 会进行主动关闭, 从而引发星间/星际链路的切换, 这也会引起经过该链路的数据流中相继分组传输的时延抖动;

③ 卫星节点或通信链路失效造成可行路径上的链路切换而引起的业务传输时延抖动: 在卫星网络中, 任何物理设备都存在物理故障率, 其中最根本的原因是卫星节点本身是一

套十分复杂的系统,且工作在难以进行故障维护的太空环境之中,受到太空环境因素或敌方因素的各种可能性损坏,因此在卫星网络中可能发生卫星节点或通信链路失效,这种失效将导致路由的重新计算,进行可行路径上链路的重新选择,该过程将造成可行路径上的链路切换而引起的业务传输时延抖动。此种情况又可细分为多种情况,如卫星本身整体或局部主动故障、卫星受太空环境因素影响的被动故障、卫星受敌方干扰或毁伤而被动造成的暂时失效或永久故障等。

(3) 漂移产生的原因

在卫星网络中,造成时延漂移的主要原因有两类:一类是卫星网络中卫星相对移动造成链路物理可视直线距离持续变化而引起的客观时延漂移,另一类是卫星网络通信资源配置、路由/协议设计与传输业务类型的不匹配引起的主观时延漂移。

对于第一类漂移,卫星网络中又主要有如下三种情况可引起链路物理可视直线距离的持续变化,从而造成其不同业务流在传输的过程中产生不同的时延漂移。第一种是同层星座内不同轨道面相邻卫星间 ISL_s 链路物理可视直线距离的持续变化;第二种是异层星座间上层卫星通信覆盖域内两通信节点间链路(包括 IOL_s 和用户数据链路 UDL_s) 物理可视直线距离的持续变化;第三种是运行在大椭圆轨道上的 HEO 卫星与卫星网络内其它通信节点间链路物理可视直线距离的持续变化:

① 同层星座内不同轨道面相邻卫星间链路物理可视直线距离持续变化引起业务传输时延漂移:在由非同步卫星组成的卫星网络中,无论网络是基于极地星座还是基于 Walker Delta 星座组成,卫星均围绕地球做相对移动,由多个非同步星组成的各轨道面存在相交或延伸相交,考虑到地球曲率因素,存在物理可视通信距离的轨道面上的两卫星间的物理可视直线通信距离将随着卫星移动发生变化。如以极地星座组成的卫星网络中,该距离将随着卫星由赤道向南或向北移动由长变短,在赤道处最长,两极处最短。变化速率随各卫星围绕地球的旋转周期不同而不同,但相对卫星网络中信号传输速率而言,这种变化是一种慢变过程。因此,反映在网络中业务流的传输上,由这种距离变化导致的信号传播时延变化,相对来说是一种时延漂移;

② 异层星座间上层卫星通信覆盖域内两通信节点间链路物理可视直线距离持续变化引起业务传输时延漂移:同样在由非同步星组成的卫星网络中,特别是在多层星座组成的复合卫星网络中,不同星层间或星层与地面用户终端间由于卫星的移动而存在相对位置移动,这种相对的位置移动将导致两通信节点直接的直线距离发生变化,当存在上层卫星通信覆盖域内上下层通信节点间的直接通信链路时,发生在这种链路的信号传播时延将随着其物理可视直线距离的变化而变化,相对卫星网络中信号传输速率而言,这种变化也是一种慢变过程,因此反映在网络中业务流的传输上,由这种距离变化导致的信号传播时延变化,相对来说便产生了时延漂移;

③ 运行在大椭圆轨道上的 HEO 卫星与卫星网络内其它通信节点间链路物理可视直线距离持续变化引起业务传输时延漂移:在由运行在大椭圆轨道面上的 HEO 卫星组成的卫星网络中,由于 HEO 卫星运行的大椭圆轨道面的某点与卫星网络中几乎所有其它通信节点的物理距离随着 HEO 卫星的运动均持续变化,甚至包括同轨相邻的两 HEO 卫星节点。当存在 HEO 卫星与其它通信节点间的物理可视直线直接通

信链路时,发生在这种链路的信号传播时延将随着其物理可视直线距离的变化而变化,且这种距离的变化并非线性增加与减少,即变化率更加复杂,反映到该链路上的信号传播时延也将跟随发生非线性变化,同样这种变化也是一种慢变过程,因此反映在网络中业务流的传输上,相对来说就产生了关于业务流传输的时延漂移。

对于第二类漂移,又主要有如下两种原因可以引起卫星网络通信资源配置、路由/协议设计与传输业务类型的不匹配,从而造成其不同业务流在传输的过程中产生不同的时延漂移。第一种是卫星网络通信资源配置与传输业务类型的不匹配;第二种是卫星网络中路由/协议设计与传输业务类型的不匹配。

① 卫星网络通信资源配置与传输业务类型的不匹配而引起的业务传输时延漂移:在卫星网络中,其组成结构与通信资源分配的初始设计一般基于满足某类特定用户或特定应用的通信需求,如天基预警系统主要用于各类预警信息的收集与传输,且对监视的区域有针对性侧重,故在卫星网络通信资源配置上也有所区别,这样当卫星网络中有基于其它应用的业务进入时,因资源配置欠缺,而导致新业务在网络中传输时通信资源长期分配不足,形成流量长期拥塞等待,从而导致经过该业务流中相继分组传输的时延漂移;

② 卫星网络中路由/协议设计与传输业务类型的不匹配而引起的业务传输时延漂移:在卫星网络中,为其设计的协议内容与路由算法一般也是基于满足某类特定用户或特定应用的通信需求,如在天基预警系统中,其网络协议/路由设计上也有所区别,这样当卫星网络中有基于其它应用的业务进入时,因协议/路由的不适应性,也会导致经过该业务流中相继分组传输的时延漂移。

3.2 时延影响卫星通信分析

在卫星网络中,分析时延对业务传输产生的影响,主要分析业务流经过某路由路径上的各项时延因素,包括节点处理时延、节点排队时延、传输时延和传播时延等,由于流经卫星网络的业务流为一随机过程,因此只能用统计学的角度分析其时延。

3.2.1 卫星网络时延建模分析

在卫星网络中,设进入卫星网络的业务分组流 s 到达率为 x_s ,在链路 (i, j) 上的分流部分为 $f_{ij}(s)x_s$,其中 $f_{ij}(s)$ 是分组流 s 在链路 (i, j) 上的分组比例, $\lambda_{i,j}$ 为链路 (i, j) 上各分组流的合成到达率,链路 (i, j) 的服务速率为 μ_{ij} ,则有

$$\lambda_{ij} = \sum_{\text{all groups on link } ij} x_s \quad (1)$$

根据 Little 定理和 Kleinrock 独立性近似,侧路径 P 上的平均总时延 T_P 可以表示如下^[9]:

$$T_P = \sum_{\text{all links } ij \text{ on path } P} \left(\frac{1}{\mu_{ij}} \cdot \frac{\lambda_{ij}}{(\mu_{ij} - \lambda_{ij})} + \frac{1}{\mu_{ij}} + d_{ij} \right) \quad (2)$$

其中 $1/\mu_{ij}$ 是链路 (i, j) 上的平均分组传输时间, d_{ij} 是链路 (i, j) 的处理时延与传播时延之和。上式括号内的第一项是等待时延,第二项是传输时延,第三项是处理时延与传播时延之和。在卫星网络中,包括排队时延、传输时延、处理时延和传播时延的网络平均总时延 T_P 对不同用户和不同应用的业务流的产生不同的影响,超长的平均总时延 T_P 除了极大影响其业务吞吐量外,有时甚至不能满足用户对网络服务质量的需求,如当通信网络中的双向时延超过 250ms 时,在链路连接窗内只有较少的时间段(如 60ms)用于数据传输,而其它时间则处于确认等待,从而降低了业务吞吐量,更为严重的

是这种超长时延难以满足用户对双向实时语音业务的通信需求,从而使该类链路不能服务此类业务。

从式(2)中可以看出:

① 路径 P 上的平均总时延 T_P 的第一项等待时延为 $(1/\mu_{ij}) \cdot (\lambda_{ij}/(\mu_{ij} - \lambda_{ij}))$, 决定于数据分组到达率 λ_{ij} 与链路 (i, j) 的服务速率 μ_{ij} , 链路 (i, j) 的服务速率 μ_{ij} 由链路两端卫星节点 i, j 之一的处理性能和链路 (i, j) 的传输带宽共同决定, μ_{ij} 越大, 在数据分组到达率 λ_{ij} 一定的情况下, 该项等待时延就越小; 在链路 (i, j) 的服务速率 μ_{ij} 一定的前提下, 数据分组到达率 λ_{ij} 越大, 该项等待时延就越大。发生在链路 (i, j) 上的该项等待时延增大, 在链路 (i, j) 的服务速率 μ_{ij} 一定的前提下, 说明数据分组到达率 λ_{ij} 就必须降低, 否则引起数据分组的溢出丢失, 从而降低了整个卫星网络的业务吞吐量。

② 路径 P 上的平均总时延 T_P 的第二项传输时延为 $1/\mu_{ij}$, 决定于链路 (i, j) 的服务速率 μ_{ij} , 而 μ_{ij} 由链路两端卫星节点 i 的处理性能和链路 (i, j) 的传输带宽共同决定, 要降低数据分组在链路 (i, j) 上的传输时延, 就必须增强卫星节点 i 的处理性能或/和提高链路 (i, j) 的传输带宽。

③ 路径 P 上的平均总时延 T_P 的第三项处理时延与传播为 d_{ij} , 实际上该项时延由卫星节点 i 的处理性能和链路 (i, j) 的传播时延共同决定, 通过有效设计、建设卫星节点 i 可以获取卫星节点 i 的高处理性能, 而数据分组在链路 (i, j) 上的传播时延则跟随链路 (i, j) 物理直线距离变化而变化, 若合理设计卫星网络星座组网结构及其路由协议与路由算法, 可以降低该项时延对整个卫星网络产生的影响。

3.2.2 时延对卫星通信产生的影响

在卫星网络中, 时延对卫星通信主要产生四个方面的影响: 第一, 时延特别是超长时延导致确认数据返回时间过长, 从而导致网络传输的效率不高; 第二, 信号经过这种时延链路传输后产生的回波在发端重叠, 特别是在语音通信中, 严重影响通信质量; 第三, 在误码率相对(地面网络)较高的卫星网络中, 长时延严重降低卫星网络的通信效率; 第四, 卫星链路上的数据传播时延, 特别是不同链路类型上变化较大时延严重影响了卫星网络传输过程中数据分组长度和数据包传输窗口尺寸的选择, 窗口尺寸是指在采用链路差错控制模式的通信系统中, 系统允许连续发送未确认帧的最大值。下面从这四个方面详细说明时延对卫星通信产生的影响。

① 数据确认信号(ACK)延迟: 在通信网络中, 为了保证数据的正确传输, 在发送端发送一组数据后需等待接收端接收并返回确认信号 ACK(接收正确时)或 NAK(接收出错时), 以确定继续发送下一相继分组还是重发上一分组。在误码率相对(地面网络)较高的卫星网络中, 这一机制尤其重要, 因此在各种卫星网络中基于链路的传输协议大都采用基于该机制的自动请求重发协议 ARQ 或其变种。但卫星网络中链路的超长时延延迟了确认信号的返回, 而发送端则只能“白白”地等待, 显然这将严重影响整个卫星网络的传输效率;

② 产生回波干扰: 在通信网络中, 任何信号的传输在信道中遇到阻抗不匹配的节点将产生反射, 当这种反射波对原信号构成影响时, 就必须对其进行抑制, 否则将严重影响通信质量。在卫星网络中, 发送节点发送的信号经过链路时延后也将在接收端产生反射, 特别是在基于卫星网络的双向语音通信中, 这种时延值将落入通话人说话的间歇值范围内(数十毫秒至数百毫秒之间), 从而严重影响语音的质量, 特别是双向语音通信的质量, 有时到达无法满足用户需求(甚至忍耐)

的程度;

③ 长时延重发严重降低网络通信效率: 在卫星网络中, 由于采用无线电波建立通信节点间的通信链路, 这种通信链路暴露在多种无线传输影响因素的太空环境中, 其链路的通信质量与地面有线链路相比较差, 如卫星链路误码率 CER 一般在 $10^{-6} \sim 10^{-11}$ 之间, 而地面通过光纤信道建立的链路误码率 CER 一般在 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 之间。这将增加卫星网络中数据传输的出错重发概率, 而等待重发需经过延期待接收端确认发送 NAK 信号之后, 重发分组后又要延时等待, 如在延时值为 260ms 的地面用户终端与 GEO 卫星之间通信时, 数据传输的帧长为 60ms 时, 大部分的时间 $(260 \times N - 60)$, N 为重发次数)则在等待或重发, 从而严重降低卫星网络的通信效率;

④ 时延及变化时延增加了通信协议设计难度: 在卫星网络中, 各通信链路上的超长传播时延, 特别是不同链路类型上时延值变化严重影响了卫星网络传输过程中数据分组长度和数据包传输窗口尺寸的选择。如卫星网络中低轨星 LEO 与地面用户终端之间的双向传播时延大约为 30ms 左右, 中轨星 MEO 与地面用户终端之间的双向传播时延大约为 120ms 左右, 同步星 GEO 与地面用户终端之间的双向传播时延大约为 260ms, 另外卫星网络中卫星节点间的其它星间/星际链路传播时延更是各不相同, 且随着卫星间的相对移动而发生变化, 这种变化使协议设计者难以选择最佳的数据分组长度, 而数据分组长度的选择对系统的传输效率将产生较大影响。另外这种时延与时延变化还增加了传输协议中数据传输窗的窗口尺寸选择难度, 特别是在链路类型较多的卫星网络中, 不同类型的链路具有不同级别的时延参数。链路物理可视直线距离变化的链路其传播时延还跟随变化, 这更使设计者在传输协议难以选择最佳的数据传输窗的窗口尺寸。窗口尺寸过小, 将增加传输等待时间; 而过大, 则增加了发数据缓冲区的容量, 给缓冲区的管理和分组排序造成困难。

3.2.3 时延抖动对卫星通信产生的影响

根据形成的原因不同, 卫星网络中主要存在因负载失衡和因链路切换分别造成的两大类时延抖动, 因负载失衡造成的时延抖动又可以由路由算法缺陷、卫星网络拓扑结构意外变化、业务流超载等因素引起, 因链路切换造成的时延抖动又可以分为由星际链路切换、星间链路切换、失效链路切换分别引起的不同形式的时延抖动。

在卫星网络中, 上述两类时延抖动可能导致:

① 分组流的收发时间超出或未能跟随双方数据传输窗口的尺寸或尺寸的变化(窗口尺寸可变时), 从而导致发送端误认为接收端没有接收到发送端发送的数据分组而进行不应该的重发, 降低网络传输效率; 若接收端确认接收出错发送 NAK 至发送端时, 接收端可能因等待重发时间超长而误认为丢包或链路中断而作异常处理, 从而导致本业务项传输的失败, 严重影响网络的传输性能;

② 通信节点接收缓冲区中的数据丢失。时延抖动将导致数据流后继分组在通信节点缓冲区排队等待的时间发生变化, 若等待时间过长, 超过设计者的设计限度(所设计的缓冲区长度)时, 将导致后续应该进入缓冲区排队等待的数据分组无缓冲区存储而不能进入, 从而导致数据分组的丢失, 严重影响网络的传输性能;

③ 收发双方在链路层上不同步而丢失数据。当卫星网络中发生因通信链路切换而导致的时延抖动时, 这种时延抖

动值很可能破坏收发双方设计所规定的比特流收发间隔,即造成收发双方数据分组中比特流收发的不同步,当这种时延抖动超过设计所规定的比特流收发间隔(即同步时隙)时,接收方可能认为该帧数据无效而丢弃,回发 NAK 至发送方来请求重发,显然这将降低整个网络的通信效率。

3.2.4 时延漂移对卫星通信产生的影响

卫星网络中主要有因卫星相对移动造成通信节点间物理可视直线距离变化而引起的时延漂移,和网络资源配置/路由协议与业务类型不匹配而产生的时延漂移两种类型。前一种时延漂移又可以由星间链路物理长度变化和星际链路物理长度变化以及 HEO 星座与其它通信节点间链路物理长度变化分别引起,后一种时延漂移又可以由卫星网络中通信资源配置与传输业务类型不匹配和路由/协议设计与传输业务类型不匹配分别造成。

在卫星网络中,时延漂移对网络中数据传输的影响要小于时延抖动的影响,这主要是因为时延漂移中的时延变化相对网络中传输的业务分组来说,是一种较慢的变化过程,除了单项业务分组可能在时延漂移之前已经传输完毕外,网络自身还可以通过其资源的灵活配置和路由算法的适应性来适应这种时延的变化,但时延漂移依然对卫星网络通信会产生下列影响:

① 卫星网络中因通信节点间的相对移动而产生其间链路的物理直线距离变化,由于卫星网络中的存在多种类型不同的链路,如星间链路、星际链路、用户链路,发生在这些不同链路上的距离变化具有不同的规律和变化率,甚至相同链路在不同的时间段还具有不同的变化率,这就增加了卫星网络资源配置和路由算法设计的复杂度,特别是漂移超过其设计服务时,会造成卫星网络中通信节点内缓冲区数据的溢出,从而导致数据丢失;

② 在发生资源争夺时,时延漂移可能会增加卫星网络中资源配置与业务传输需求之间的不协调性,从而影响整个网络的通信性能,如完成某些业务的传输需求某些通信资源的支持,而这些资源由于链路时延漂移被集中用于其它业务,此时便会发生资源的争夺,影响网络通信,这在使用资源预留控制协议(RSVP)的网络中更加明显,而在基于某类特定应用和用户需求的卫星网络中经常采用该控制协议,以确保某类应用和用户的服务质量 QoS。

3.3 卫星网络时延改善分析

针对卫星网络中由不同原因产生的各种时延及时延变化,可以通过多种途径对其进行改善,以降低链路时延及时延变化对整个网络通信性能的影响。可以从两方面展开分析:第一种途径是从发生在链路上的传播时延对网络通信性能的影响展开,另一种途径是从链路传播时延之外的时延及时延变化对网络通信性能的影响展开。下面分别分析。

对于改善发生在链路上的传播时延对网络通信性能的影响,主要在链路控制上可以采用如下技术措施:

① 采用协议仿真技术(即协议“欺骗”)。在卫星网络的信源发起站(通常为地面关口站)与卫星星座接续时由信源发起站进行协议转换,在转换的过程中,信源发起站模仿远端信宿通信节点向本站发出确认或响应信号,以避免这些信号通过卫星链路的长时延传送。这种转换仿真(或称“欺骗”)可以减少响应时间。但若将基于地面网络的 IP 协议照搬到卫星网络,这种协议仿真技术将存在问题,因此需对基于地面网络的 IP 协议进行改进,方能适应卫星网络。

② 采用回波抵消技术。在卫星网络中各通信节点采用回波抵消技术,以降低发送端发送的信号在接收端的反射,这项技术主要通过信号相位控制电路来实现,这项技术已经成熟应用于各种通信网络,特别是基于卫星网络的双向话音通信网络。

③ 采用最佳的差错控制方式。在卫星网络中,采用链路级差错控制方案,以进行链路时延补偿,但卫星网络中通常的差错控制不选用等待重发(SAW-ARQ)方式,而选择返回 N 自动重发(GBN-ARQ)、选择性自动重发(SR-ARQ)和多址选择重发(MN-SREJ)等方式。返回 N 自动重发方式在信道误码率较低($\leq 1 \times 10^{-6}$)的情况下,传输效率可达 90% 以上。选择性自动重发方式允许只重发差错的分组,而不必重发后面的正确接收的分组,因此传输效率更高。但在 HDLC 协议中,对选择性重发规定在一个循环内只能执行一次选择性重发动作,因此限制了它的使用。

④ 选择最佳的数据分组长度。为了降低卫星网络中链路超长传播时延的影响,根据通信链路的传输质量(以误码率表示),进行业务流数据分组时合理选择数据分组长度,甚至选择分组长度可变的帧格式。研究表明,在卫星链路中当使用 GBN-ARQ、SR-ARQ 或 MN-SREJ 等差错控制方式时,在误码率为 $P_e \leq 1 \times 10^{-7}$ 的前提下,最佳分组长度应取在 1000~5000 比特之间。

⑤ 选择最佳窗口尺寸。由于卫星网络中数据分组在链路上的传播时延直接影响采用差错控制方案的通信系统中连续发送未确认帧的时间间隔 Δt ,根据这种传播时延及时延变化合理选择或选择跟随时延抖动的时间间隔 Δt (即窗口尺寸),既可以充分发挥 GBN-ARQ、SR-ARQ 或 MN-SREJ 等差错控制方案的能力,又可以降低传播时延及其时延变化对整个卫星网络通信性能的影响。

以上技术措施有一些已经应用于卫星网络,如回波抵消技术、差错控制技术,但也有一些尚处于研究之中,如数据分组长度与数据传输窗口尺寸自适应跟随链路传播时延及时延变化技术,本文对此不做重点深入研究。基于本课题的出发点,我们主要从卫星网络组网结构及其路由的协议/算法方面重点展开网络时延及时延变化对卫星网络通信性能的影响,并提出相关方案与设计。

对于改善发生在链路传播时延之外的时延及时延变化对网络通信性能的影响,下面仍以天基预警系统卫星网络为例,对在卫星网络时延方面的 QoS 保证进行下列考虑。

① 采用链路冗余设计:在卫星网络中,为了降低链路时延对整个网络通信性能的影响,除了上面针对链路传播时延的改善措施外,还可通过提高网络的总体容量,以减少业务分组在通信节点中的排队等待传输的时间,另外提高网络总体容量还可以提高网络总的传输吞吐量。但为了增大网络通信容量,提高其对业务传输的吞吐量,就必须尽量增加或增大单条通信链路的可用数量或容量,其中增加单条通信链路的可用数量是指增加卫星网络中相邻通信节点间的通信链路,分卫星节点与地面用户终端之间用户数据链路 UDL_s 增加和卫星节点间星间 ISL_s/星际 IOL_s 链路增加两种情况,第一种情况可以通过增加覆盖域内的波束数来实现;第二种情况则可以通过增加卫星间的各种连接来实现,如 Globalstar 系统无星间链路 TSL_s, Iridium 系统中某卫星节点通过 4 条星间链路 ISL_s 同时与 4 个相邻卫星保持连接, Teledesic 系统中某卫星节点通过 8 条星间链路 ISL_s 同时与 8 个相邻卫星保持连接,其中 Teledesic 系统的网络通信总容量最大,用于支

持地面通信容量不断增长的 Internet 应用。对于通过增大有效带宽来增加单条链路的通信容量,则可在技术前提满足的情况下尽量使用高频率的载波信号,如星间/星际链路的载波信号频率已经达到 50GHz。

② 采用链路抗毁修补设计:导致卫星网络业务分组传输产生时延及时延变化,且这种时延及时延变化超出原设计兼容能力的另一项重要因素就是卫星链路失效,这种链路失效主要由卫星节点整体或部分设备故障导致。当出现这种情况时,为了尽量降低时延及时延变化对网络通信性能的影响,最简单且直接的方法就是恢复失效链路或寻找其替代链路,由于卫星网络运行于太空之中,修复原失效链路十分困难,因此寻找其替代链路较为可行,一种是物理替代链路,即建立一条新链路来替代,另一种是逻辑替代链路,这主要通过路由算法重新选择路径上的链路实现,这里首先介绍物理替代链路,由路由算法进行的路径上链路的重计算实现逻辑替代链路的方法后续介绍。通过建立新的物理通信链路以替换失效链路,这在解决由于某卫星节点失效后造成的周围链路失效的情况是可行的,也是十分必要的。具体为:启用视距范围内(不被地球所遮挡)间隔失效卫星间次相邻卫星节点的链路连接,以使卫星网络尽量恢复各节点间的原有的强连接特性,从而维持网络原有的高吞吐量。理由是:与基于地面有线网络的数据包传输不同,卫星网络中数据包传输以无线射频方式建立的通信链路来实现,因此卫星网络中某节点失效后,失效卫星节点间的相邻相对的工作正常的卫星节点通过改变链路参数(如增大发射功率、调整发射方向等)可以启动建立相互之间的通信链路。

③ 采用分群管理模式:为了降低卫星网络中通信资源配置与业务类型不匹配产生的时延及时延变化对网络通信性能的影响,可以从卫星网络设计目标出发进行整个网络组成结构、管理模式、通信协议与路由算法的优化设计,通过对网络中通信资源的灵活配置设计,以匹配适应不同的业务类型,从而降低链路时延及时延变化对整个网络通信性能的影响。在设计天基预警系统卫星网络时,根据其应用需求,可以采用分群管理模式,具体为:利用高层星座中的卫星通信覆盖域对下层星座中被覆盖的卫星进行分群管理,称为群管理者的上层覆盖卫星与下层各卫星建立一个在一定时间段内相对固定的独立分群,在群内完成节点间的状态收集后再由群管理者全网交换,这样既可以实现卫星网络内高效通信,又可进行网络内通信资源灵活启用。

另外,在采用分群管理模式的基础上,为了提高系统抗毁能力,再采用群首/群管理者备份机制,具体为:在各分群中,将群中距离群管理者最近的下层卫星定义为该群首选群首,次近者定义为该群第一备选群首,依此类推,……,使位于该物理群中的每颗卫星都有成为群首的机会。群首负责与群管理者之间直接通信,群首失效便启用备份群首,群管理者失效后由群首接替群管理者功能,通过该种群首确定机制,可以使卫星网络在分群实施上具有节点抗毁的能力,从而维持网络原有的高吞吐量,降低链路时延及时延变化对整个网络通信性能的影响。

④ 进行健壮抗毁路由设计:为了降低卫星网络中路由协议/算法与业务类型不匹配产生的时延及时延变化对网络通信性能的影响,除了充分利用卫星网络结构特点设计尽量满足用户或任务需求的路由协议与路由算法外,另外还需根据卫星网络的运行时所表现的相对地面网络脆弱的特点,设计健壮的、具有抗毁功能的路由协议与路由算法,以便针对卫星

网络的各种可能性失效做出自适应的路由选择,使重新选择的链路绕过失效节点或失效链路,从而避免数据分组在失效节点或失效链路处的延时等待,以尽量降低链路时延及时延变化对整个网络通信性能的影响。

总结 基于上述卫星网络服务质量 QoS 关键指标分析,我们提出一种满足用户与任务应用需求的天基预警卫星网络,这种卫星网络是一种基于 GEO/MEO 双层星座和用户地面终端的复合卫星网络,提出这种结构的卫星网络基于如下考虑:

① 卫星网络具有包括极地区域的全球性覆盖特点:采用由 MEO 和/或 LEO 组成的极地轨道星座;

② 卫星网络具有组网灵活的通信特点:采用 GEO 与 MEO 和/或 LEO 共同组成的分层协同的复合卫星网络结构;

③ 卫星网络具有路由健壮的通信特点:采用链路交叉、链路冗余、链路重建的通信结构;

④ 卫星网络具有结构相对简单的特点:采用 GEO 与 MEO 或 LEO 组成的双层复合网络结构,MEO 或 LEO 采用基于 GEO 覆盖域分群的组网结构;

⑤ 卫星网络具有高带宽、低延时的传输特点:采用宽带链路和冗余链路方法进行通信链路的设计,进行星座组网设计可以采用较少跳数优先(长距离独立传输)路由原则;

⑥ 卫星网络满足 QoS 需求和多业务需求:为了实现星座具有满足服务质量 QoS 需求和满足多业务传输能力,进行网络协议设计时可以采用多协议标签交换 MPLS;

⑦ 卫星网络具有成本相对低廉的特点:本文采用 GEO 与 MEO 组成的双层复合网络结构,主要考虑 MEO 位置相对较高,提供全球覆盖所需的卫星数相对较少。

本文主要对卫星网络组成结构特点与运行结构特点进行分析,提出卫星网络应该满足的主要 QoS 指标,并对满足用户与任务应用需求的主要 QoS 指标一时延及时延变化,分析其产生的原因与分类,分析其对卫星网络通信产生的影响,分析其改善措施等,在此基础上,以主要满足天基预警系统建设需求为目标,提出基于 GEO/MEO 双层星座和地面关口站共同组成的分层协同的复合通信网络系统结束本文研究。

参 考 文 献

- 1 Iwata A, Izmailov R, Lee D S, et al. ATM routing algorithms with multiple QoS requirements for multimedia internetworking. In: IEICE Trans Commun, E79-B, vol. 8, 1996. 999~1006
- 2 Chen S, Nahrstedt K. On finding multi-constrained paths. In: Proc IC Conf, New York, NY, 1998. 874~879
- 3 Korkmaz T, Krunz M. A randomized algorithm for finding a path subject to multiple QoS requirements. Comput Networks, 2001. 251~268
- 4 Multi-constrained optimal path selection. In: Proc. IEEE INFOCOM, vol 2, 2001. 834~843
- 5 Van Mieghem P, De Neve H, Kuipers F. Hop-by-hop quality of service routing. Comput Networks, 2002, 37(3-4): 407~423
- 6 Yuan X. Heuristic algorithms for multiconstrained quality-of-service routing. IEEE/ACM Trans Networking, 2002, 10: 244~256
- 7 De Neve H, Van Mieghem P. TAMCRA: A tunable accuracy multiple constraints routing algorithm. Comput Commun, 2000, 23: 667~679
- 8 Liu G, Ramakrishnan K G. A * Prune: An algorithm for finding K shortest paths subject to multiple constraints. In: Proc. IEEE INFOCOM, 2001, 2: 743~749
- 9 李建东. 信息网络理论基础. 西安电子科技大学出版社, 2001
- 10 Pratt T, Bostian C, Allnutt J. Satellite Communications, Second Edition. John Wiley & Sons Inc, 2003. 356~358
- 11 王亮. 带有星间链路的卫星网络路由算法研究: [博士学位论文]. 哈尔滨工业大学, 2003
- 12 刘刚. 非静止轨道卫星移动通信系统组网关键技术研究: [博士学位论文]. 电子科技大学, 2004