

# LEO-Mesh 卫星光网络容量规划

吴继礼, 赵尚弘, 李勇军, 朱子行, 李云霞, 易 鹏

(空军工程大学电讯工程学院网络工程系, 陕西西安 710077)

**摘 要:** 利用低轨卫星网格状结构光网络的空间对称性, 推导了网络流量平衡特性, 进而以最小丢包率为目标, 采用 Lagrange 乘数法对各端口容量进行优化配置. 在由  $m$  条轨道、每个轨道  $n$  颗卫星构成的 Mesh 型卫星光网络中, 轨道内端口容量与  $m$  成反比, 与对地接入端口速率比约为  $n/8$ ; 轨道间端口容量与  $n$  成反比, 与对地接入速率比约为  $m/8$ . 在初始配置下, 丢包率在  $m = n$  时取得极小值; 经优化配置之后, 各端口利用率趋于平均, 丢包率较优化前有明显下降, 且随着卫星数量增加呈持续下降趋势.

**关键词:** 卫星光网络; Mesh 网络; 容量规划; Lagrange 函数; 网络仿真

**中图分类号:** TN929.13      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2010) 12-2713-05

## Capacity Dimensioning for LEO-Mesh Optical Satellite Network

WU Ji-li, ZHAO Shang-hong, LI Yong-jun, ZHU Zi-hang, LI Yun-xia, YI Peng

(Department of Network Engineering, the Telecommunication School of AFEU, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** The data-rates of transit ports and access ports in the homogeneous Mesh network consisting of low earth orbit (LEO) satellites were deduced based on the symmetrical characteristic of the network topology. According to the traffic, the capacities of the ports were optimized by the Lagrange multiplier method to minimize the packet lost ratio. In the network constituted by  $m$  orbit-planes with  $n$  satellites each, the capacities of intra-orbit ports should be inversely proportion to the orbit number  $m$ , approximately  $n/8$  times of accessing data rates. The capacities of inter-orbit ports should be inversely proportion to the satellite number  $n$  in each orbit, approximately  $m/8$  times of accessing date rates. Before optimization, the packet lost ratio was minimum when  $m = n$ . After optimization, the packet lost ratio is reduced and keeps decreasing as the total number of satellites increases.

**Key words:** optical satellite networks; Mesh networks; capacity dimensioning; Lagrange function; network simulation

## 1 引言

在过去近 40 年间, 卫星光通信由理论到实践, 取得了一系列重大进展. 众多卫星光通信实验中, 最接近应用的当属 2008 年 TESAT 公司在德国成像侦察卫星 TerraSAR-X 和美国国防部侦察卫星 NFIRE 之间进行的激光通信实验<sup>[1]</sup>, 实验中高速相对运行的 LEO 卫星之间建立了单波道 5.625Gbps 的激光链路, 成功满足了 TerraSAR-X 的成像雷达带宽需求. Tesat 公司随后宣布, 他们所研制的相干激光通信终端 LCT/LCT-X 已经迈向商业化道路, 具有 4 对以上的年产量, 日本的下一代低轨道卫星系统 (NeLS) 和欧洲数据中继卫星系统 (EDRS) 等就是其潜在用户. 因此可以说, TerraSAR-X 和 NFIRE 之间激光通信实验的成功昭示了卫星光通信步入网络应用时代.

国内在卫星光通信方面起步稍晚, 但经哈尔滨工业

大学、电子科技大学、长春理工大学、空军工程大学等多所高校和上海光机所、长春光机所及中电集团多个研究所近年来不断努力, 已经积累了星间激光光束捕获、瞄准、跟踪 (APT) 技术, 原子滤光技术, 卫星振动抑制与隔离、多路收发等卫星光通信的关键技术, 距离工程化越来越来近. 可以预见, 卫星光通信将很快向网络化方向发展, 成为我国下一代空间信息系统的主要传输手段<sup>[2]</sup>.

在卫星光网络轨道和星座设计时, walker- $\delta$  星座在覆盖性能、链路稳定性、路由性能及故障恢复等方面具有良好的折衷, 是较为理想的选择<sup>[3,4]</sup>. 而零相位的 walker- $\delta$  星座因其特殊的相互位置关系, 在采用 Mesh 型连接时, 相邻轨道间卫星的距离、俯仰角和方位角特性对于激光束的捕获、对准和跟踪 (ATP) 有利, 并且能够避免通过极区时相邻节点左右快速互换, 星座拓扑成稳定的 Mesh 结构, 尤其适合卫星光网络组建<sup>[4-6]</sup>. 卫星光网络作为空间骨干网, 其传输能力受限于底层端口的

设计容量,一旦建成,升级空间很有限,影响网络使用和维护成本,因而需要在设计之初就慎重规划<sup>[7,8]</sup>.而容量分配与优化的基本依据是网络的流量模型.早期报道 Mesh 网络的文献<sup>[9-11]</sup>主要针对城域网中双端口的单向网络,网络所有数据包都以时隙为单位严格同步向前推进.这类网络中,旁路路由是一种简单有效的自适应路由.后期对 Mesh 网络研究集中在不规则无线接入网,重点研究各类分布式路由算法<sup>[12-15]</sup>,通过动态加权路径长度、负载、投递率等指标扩展路径开销度量,定点单播的组播优化算法,达到平衡负载、减小丢包、增加网络容量的目的.而卫星光网络的 Mesh 网络是一种双向曼哈顿街区 (Bi-directional MSN) 网络<sup>[3-6]</sup>,信号传播时延大且在持续变化,难以实现严格网同步,因而不能用基于时隙的同步网络模型进行分析;同时卫星光网络具有相对规则拓扑结构,是一种快速交换网<sup>[16]</sup>,因此 Mesh 无线接入网各类模型也不适合,更没有现成的流量模型可供借鉴.鉴于此,文章沿续文献<sup>[5,6]</sup>的工作,构造全源全汇对等 Mesh 网络,推导网络稳态流量分布与网络拓扑结构和端到端流量分布的关系,据此对各中继端口容量进行规划,平衡网络负载,提高网络的潜在效率.

## 2 LEO-Mesh 卫星光网络稳态流量分布特性

作者在文献<sup>[5,6]</sup>提出一种适于卫星光网络的零相位 walker- $\delta$  星座,整个网络构成 Mesh 状拓扑结构,如图 1 所示.图中  $m \times n$  的 Mesh 网络由  $m$  个轨道、每个轨道  $n$  颗卫星的 0 相位 walker- $\delta$  星座抽象而来,每个节点都同时是源、汇节点和中间节点.每个节点  $p(i, j)$  只与相邻的 4 个节点  $p((i \pm 1) \% m, (j \pm 1) \% n)$  相邻 (其中  $\% m(n)$  表示模  $m(n)$  同余).第一行节点  $p(i, 0)$  与最后一行节点  $p(i, n-1)$  上下相邻,第一列节点  $p(0, j)$  与最后一列节点  $p(m-1, j)$  左右相邻.

由于卫星覆盖区域广,相对地表运动速度快,提供全球移动通信业务,长期的业务请求在全网分布(空间上)具有对等性<sup>[16,17]</sup>;同时,walker- $\delta$  星座通过极区纬度不高,短期业务分布也近似均匀,进一步假设:

(1) 所有节点都是相同源节点,同时也是潜在的节点;

(2) 目的节点的分布在整个  $(i, j)$  平面内具有相同分布,即对任意源节点  $p(i_s, j_s)$ ,产生的流量到网络目的节点  $p(i_d, j_d)$  流量强度只与二者的相对位置有关,且任意两个源节点与目的节点之间数据流相互独立;

(3) 所有节点采用完全一致的路由算法.

从而,可将整个 LEO 卫星网络看成对等 Mesh 网络.下面证明任意一列所有节点沿图 1 中  $X$  方向流量相同.任选第  $i$  列节点,定义所有节点左侧沿  $X$ -方向的有向边依次为  $e_j (j=0, 1, 2, \dots, n-1)$ , 对应的入口流量

$$T(e_j) = \sum_{i_s=i-1}^{i-D_x} \sum_{j_s=0}^{n-1} \sum_{i_d=i}^{i+D_x} \sum_{j_d=0}^{n-1} l_j \lambda(i_s, j_s, i_d, j_d) \quad (1)$$

式中  $p(i_s, j_s)$  为源节点,  $p(i_d, j_d)$  为目的节点,  $\lambda(i_s, j_s, i_d, j_d)$  是  $p(i_s, j_s)$  到  $p(i_d, j_d)$  的端到端流量;  $l_j$  为  $\lambda(i_s, j_s, i_d, j_d)$  在  $e_j$  上产生的流量强度分量;  $D_x = \lfloor m/2 \rfloor$ , 为不大于  $m/2$  的最大整数.同样定义  $D_y = \lfloor n/2 \rfloor$ .  $l_j$  受路由算法影响,对相同源-目的节点,不同路由算法在  $e_j$  处产生的流量强度也不尽相同.但由于拓扑结构的对称性与流量分布对等性,据假设(2)和假设(3)有

$$l_j \lambda(i_s, j_s, i_d, j_d) = l_{j+1} \lambda(i_s, j_s + 1, i_d, j_d + 1) \quad (2)$$

并且沿  $X$  方向的流量强度分量之和最终等于源-目的节点之间的流量强度,即:

$$\sum_{j=0}^{n-1} l_j = 1 \quad (3)$$

由于网络中节点  $Y$  方向坐标之间构成以模  $n$  的加法循环群,对应于不同边  $e_j$ , 构成其流量的每一分量  $l_j$  总有  $e_{j+1}$  中的分量  $l_{j+1}$  与之对应,因此  $T(e_j) = T(e_{j+1})$ , 递推有

$$T(e_0) = T(e_1) = \dots = T(e_{n-1}) \quad (4)$$

接下来证明各列节点沿  $X$ -方向流量之和相同.定义集合  $E_i = \{e_0, e_1, \dots, e_{n-1}\}$  为第  $i$  列节点沿  $X$ -方向边集合,则通过  $E_i$  的总流量可以表示为

$$L(E_i) = \sum_{j=0}^{n-1} T(e_j) \quad (5)$$

再据式(1)、(3)得

$$L(E_i) = \sum_{i_s=i-1}^{i-D_x} \sum_{j_s=0}^{n-1} \sum_{i_d=i}^{i+D_x} \sum_{j_d=0}^{n-1} \lambda(i_s, j_s, i_d, j_d) \quad (6)$$

在正常情况下,如果不考虑丢包重传,任意一对源节点  $p(i_s, j_s)$  到目的节点  $p(i_d, j_d)$  的流量  $\lambda(i_s, j_s, i_d, j_d)$  只与端到端流量分布状况有关,而与采用的路由算法无关,并且由假设(2)有:

$$\lambda(i_s, j_s, i_d, j_d) = \lambda(i_s + 1, j_s, i_d + 1, j_d) \quad (7)$$

因此,  $L(E_i) = L(E_{i+1})$  是一个与路由算法无关,只与网络拓扑与端到端流量分布相关的量.据式(4)和式(5),得到

$$T(e_j) = L(E_i) / n \quad (8)$$

即节点在  $X$  方向流量只由网络拓扑与端到端流量分布决定.同理可得  $Y$  方向流量具有相同特性.

以上结果显示,不计丢包重传和迂回路由的情况下,对等 Mesh 网络在各节点稳态流量分布只与网络拓

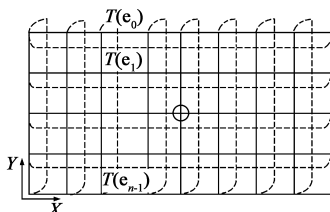


图1 LEO-Mesh卫星光网络拓扑

扑和端到端流量分布有关,而对中间节点采用的路由算法不敏感,因此端口和链路容量的配置直接决定了上层路由算法的性能和网络的潜在效率.

### 3 LEO 卫星光网络端口容量规划

如图 2,定义每个节点沿  $X+$  方向端口为  $a$ ,其余依次为  $b, c, d$ ,源(汇)端口为  $o$ .

根据前文推导,对等 Mesh 网络中各节点流量稳态分布与路由算法无关,因而假设各节点采用相同的 Manhattan 路径.在没有故障节点的 Mesh 网络中,该路径是一种高效的最短路径<sup>[18]</sup>.当前节点与目的

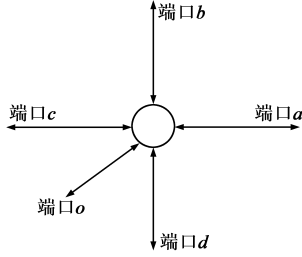


图2 网络节点结构

节点在  $X$  方向与  $Y$  方向相距跳数分别是  $x$  和  $y$  时,记路径的剩余逻辑距离为  $(x, y)$ .由于最终稳态流量对路由算法不敏感,不妨假设对所有数据包采用  $Y$  方向优先的选路策略,容易计算均匀端到端流量分布时,端口  $c$  流入  $P$  的总流量为(假设  $m, n$  为奇数)

$$T_c = \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{i=1}^{D_x} (D_x - i + 1) \lambda = n \frac{D_x(D_x + 1)}{2} \lambda \quad (9)$$

由于网络对称性,经端口  $A$  流入  $P$  的流量  $T_a = T_c$ .采用类似的方法可得:

$$T_b = T_d = \sum_{j=1}^D \sum_{i=0}^{m-1} (D_y - |j| + 1) \lambda = \frac{mD_y(D_y + 1)}{2} \lambda \quad (10)$$

依照最初假设,网络中所有节点产生以  $P$  为目的的平均流量强度  $\lambda$ ,从而有流向源(汇)端口  $o$  的总平均流量

$$T_o = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \lambda = mn\lambda \quad (11)$$

在 walker- $\delta$  星座构成的 LEO-Mesh 卫星光网络中,卫星网对地表实现全球覆盖.给定全球总的用户数,并把地表业务请求看成均匀分布,总业务流量假设为  $\kappa$ ,则端到端的数据流量与全球覆盖的卫星总数之间满足

$$T_o = mn\lambda = \kappa / mn \quad (12)$$

因此卫星节点之间端到端的流量强度  $\lambda = \kappa / (mn)^2$ ,分别代入式(9)和式(10),考虑到 LEO-Mesh 网络尺度具有  $m^2 \gg 1, n^2 \gg 1$ ,得到各端口流量

$$T_a = T_c = \kappa \frac{D_x(D_x + 1)}{2m^2 n} \approx \kappa \frac{1}{8n} \quad (13)$$

$$T_b = T_d = \kappa \frac{D_y(D_y + 1)}{2mn^2} \approx \kappa \frac{1}{8m} \quad (14)$$

由式(12)~(14)容易看出,LEO-Mesh 卫星光网络轨道间( $X$ 方向)流量反比于每个轨道卫星数  $n$ ( $Y$ 方向尺度),而轨道内流量( $Y$ 方向)反比于轨道数量  $m$ ( $X$ 方向

尺度);各中继端口流量与对地接入端口流量具有相对固定的比例关系.因网络性能主要受网络负载量(服务强度)的影响,所以在对节点端口和链路容量进行相应的配置时,各端口不可等同.在端口总传输速率恒定的约束条件下,最少数据包丢失规划的问题描述为:

$$\arg \min \left\{ T_a \frac{\rho_1^N(1-\rho_1)}{1-\rho_1^{N+1}} + T_b \frac{\rho_2^N(1-\rho_2)}{1-\rho_2^{N+1}} \right\}, \text{sub.} \left( \frac{T_a}{\rho_1} + \frac{T_b}{\rho_2} = C \right) \quad (15)$$

其中  $N$  为缓冲区容量,  $\rho_1$  为端口  $a$  的利用率,  $T_a/\rho_1$  为端口  $a$  的容量;  $\rho_2$  为端口  $b$  的利用率,  $T_b/\rho_2$  为端口  $b$  的容量,  $C$  为总传输速率.引入数乘因子  $\mu$ ,构造 Lagrange 函数,得到规划方程组:

$$\begin{cases} \frac{T_a}{(1-\rho_1^{N+1})^2} [N\rho_1^{N-1} + \rho_1^{2N} - (N+1)\rho_1^N] - \mu \frac{T_a}{\rho_1^2} = 0 \\ \frac{T_b}{(1-\rho_2^{N+1})^2} [N\rho_2^{N-1} + \rho_2^{2N} - (N+1)\rho_2^N] - \mu \frac{T_b}{\rho_2^2} = 0 \\ \frac{T_a}{\rho_1} + \frac{T_b}{\rho_2} = C \end{cases} \quad (16)$$

该方程组属非线性方程组,难以得到全部解析结果.

但是可以验证,  $\rho_1 = \rho_2 = (T_a + T_b)/C$ ,  $\mu = \frac{\rho_1^2}{(1-\rho_1^{N+1})^2} [N\rho_1^{N-1} + \rho_1^{2N} - (N+1)\rho_1^N]$  是它的一组解,结合实际负载情况可知,端口  $a$  与端口  $b$  容量按流量比例进行配置可使总丢包量取得最小值.

### 4 网络性能仿真分析

根据分析结果,用 OPNET 网络仿真软件进行仿真.为使  $7 \times 5$  的卫星网络能够保持准静态 Mesh 状连接,将轨道高度配置为 1560km,由不同轨道数量的零相位 walker- $\delta$  星座构成的 Mesh 状网络.相邻卫星之间配置独占的接收组询实现点对点的无线通信,同时修正路径衰减和天线增益模拟卫星激光链路传输.卫星采用带缓冲区的标签交换,缓冲区大小设定为 5 个分组.在全球范围内随机部署 400 个用户.由于主要考察卫星网络稳态流量分布和传输性能,忽略用户接入碰撞(实际接入性能参考文献[19]),即假设接入端口信道利用率可以达到 100%,并且用户一经接入,便持续向所有其它用户等概率发送数据包.因网络性能仅由网络负载量决定,卫星之间中继端口速率初始配置均为 512Mbit/s,每个用户平均发送为 50Mbit/s,全球用户的总流量强度  $\kappa = 20\text{Gbit/s}$ .

图 3 为不同卫星数量的星座轨道间端口(端口  $a$ )和轨道内端口(端口  $b$ )稳态流量,图中横坐标为每个轨道内分布的卫星数量的倒数  $1/n$ .图 3(a)是端口  $a$  稳态流量,直线为轨道数  $m = 11$  时按式(13)计算结果,菱形点标记为相应仿真结果.可以看出,在全球流量均匀

分布的情况下,LEO-Mesh 卫星网络的轨道间流量与每个轨道内卫星数目  $n$  成反比.只有当  $n=5$  时,由于轨道间端口负载过大,丢包率偏高,导致与理论结果出现明显偏差.同时还对 7 轨道和 9 轨道星座进行了仿真,但因轨道间流量与轨道数目  $m$  关系不大,最终结果与轨道数  $m$  为 11 时极为相近.为不影响辨别,图中仅保留了  $m=11$  时的统计结果.图 3(b)为端口  $b$  稳态流量,自下而上 3 条曲线分别是轨道数目  $m=11,9$  和 7 时按式(14)计算结果,离散标记为相应仿真结果.由图可知,端口  $b$  稳态流量与每个轨道卫星数目关系不大,主要取决于轨道数量.

端口  $c$  和端口  $d$  的流量分别与端口  $a$  和端口  $d$  相同,不做过多讨论.

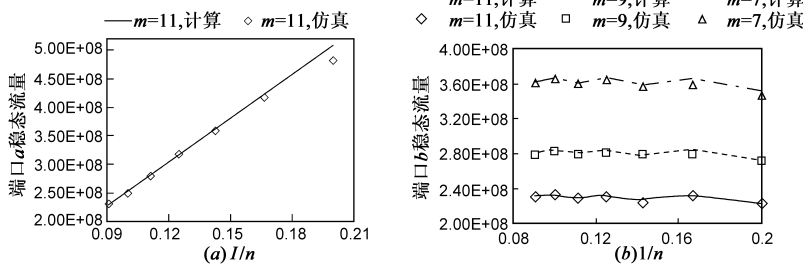


图3 中继端口稳态流量

由于端口容量仅针对丢包率进行优化配置,没有考虑对时延的影响.为考察容量规划对网络时延的影响,将不同轨道与卫星数的时延特性进行统计,结果见表 1.统计结果显示,网络的端到端平均时延在优化配置之后有不同程度的减小,抖动没有明显改变.可以看出优化过程中虽然没有考虑网络时延,但端口负载相对平衡对网络端到端时延具有一定的改善作用,且轨道数  $m$  与每个轨道卫星数  $n$  相差越大,时延和抖动的改善效果也越明显.

表 1 时延统计特性

$m$	$n$	平均时延(ms)		时延抖动(ms)		均方抖动(ms)	
		基本	优化	基本	优化	基本	优化
11	6	132.61	126.21	11.11	7.70	1.72	1.29
	8	130.26	129.39	8.74	7.07	1.25	1.27
	10	133.54	133.49	12.79	13.97	1.31	1.30
	12	137.92	137.94	15.19	13.80	1.41	1.36
9	6	125.89	122.15	15.10	10.10	1.69	1.35
	8	125.11	124.96	10.99	11.97	1.27	1.30
	10	129.24	129.12	13.50	11.90	1.34	1.32
	12	134.11	133.55	12.53	12.37	1.32	1.35
7	6	119.87	119.25	13.19	13.84	1.65	1.65
	8	121.75	121.23	12.33	11.03	1.48	1.37
	10	127.18	125.16	15.60	11.82	1.45	1.37
	12	133.08	129.59	16.74	11.32	1.57	1.28

## 5 结论

高度对称的卫星光网络流量分布在空间上具有良

图 4 是丢包率随每个轨道内卫星数量变化曲线,横坐标是每个轨道卫星,纵坐标是全网的丢包率.图中不同的标记反映以轨道数量  $m$  为参数的丢包率变化,空心标记表示优化配置前,实心标记表示优化配置之后;菱形、矩形和三角形标记分别对应  $m=11,9$  和 7 的仿真结果.图中显示,在轨道数量  $m$  和每个轨道卫星数量  $n$  不等时,经优化配置的网络丢包率都会有一定的下降,且  $m$  与  $n$  差异越大,下降越明显.基本配置下,以总的轨道数目  $m$  为门限,小于该值时,增加卫星数量能够显著减小网络丢包率;但是一旦卫星数量超过该门限,增加卫星数量并不会减少丢包.经过优化配置之后,由于端口负载趋于平均,丢包率随着卫星数量增加持续减少.

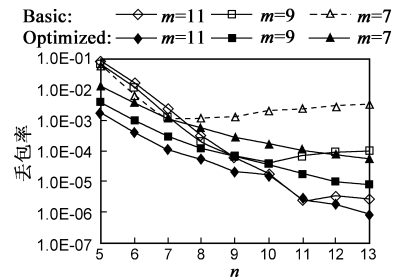


图4 丢包率与每个轨道卫星数量关系

好的对称性,网络稳态流量主要取决于端到端流量分布和网络拓扑结构,而与中间节点路由算法相对独立.据此对卫星光网络进行容量规划,能够进一步平衡网络负载,使得网络的丢包率和时延均有不同程度改善,提高网络性能.推导虽然是在时间平稳分布的假设下进行,但是关键结论依赖于流量在空间分布的均匀性,因此对于短时平稳流量分布,结果仍然有效.仿真同时表明,对于自相似流量优化配置同样能够降低网络丢包率.

## 参考文献:

- [1] SMUTNY B, KAEMPFNER H, MUEHLNIKEL G, et al. 5.6 Gbps optical intersatellite communication link[A]. Proceedings of SPIE, Free-Space Laser Communication Technologies XXI [C]. San Jose: SPIE, 2009. 7199: 719906.
- [2] 赵尚弘,李勇军,吴继礼.卫星光网络技术[M].北京:科学出版社,2010. 13-27.
- [3] SUZUKI R, MOTOYOSHI S. A study of constellation for LEO satellite network[A]. AIAA International Communication Satellite Systems Conference[C]. California: AIAA, 2004. 3236: 1-10.
- [4] SUZUKI R, YASUDA Y. Study on ISL network structure in LEO satellite communication systems[J]. Acta Astronautica, 2007, 61(7/8): 648-658.
- [5] 李勇军,赵尚弘,吴继礼.全球覆盖稳定拓扑 LEO/MEO

- 双层卫星光网络设计[J]. 光电子·激光, 2009, 20(3): 324 - 328.
- LI Yong-jun, ZHAO Shang-hong, WU Ji-li. Designing of optical two-layered satellite network of LEO/MEO with global coverage[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(3): 324 - 328. (in Chinese)
- [6] LI Yong-jun, ZHAO Shang-hong, WU Ji-li. Designing of a novel optical two-layered satellite network[A]. 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering [C]. Wuhan: IEEE Computer Society, 2008. 976 - 979.
- [7] CHAN V W S, DAI L L. Capacity dimensioning and routing for hybrid satellite and terrestrial systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 2004, 22(2): 287 - 299.
- [8] CHAN V W S. Optical satellite networks[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(11): 2811 - 2827.
- [9] MUXEMCHUK N F. Comparison of deflection and store-and-forward techniques in the Manhattan street and shuffle-exchange networks[A]. Proceedings of the Eighth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. Murray, NJ: IEEE Computer and Communications Societies, 1989. 800 - 809.
- [10] GREENBERG A G, GOODMAN J. Sharp approximate models of deflection routing in Mesh networks[J]. IEEE Transactions on Communication, 1993, 41(1): 210 - 213.
- [11] CHOUDHURY A K, LI V O K. An approximate analysis of the performance of deflection routing in regular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1993, 11(8): 1302 - 1316.
- [12] 沈强, 方旭明. 无线 Mesh 网中一种基于综合准则的 DSR 扩展路由方法[J]. 电子学报, 2007, 35(4): 615 - 621.
- SHEN Qiang, FANG Xu-ming. An integrated metrics based extended dynamic source routing protocol in wireless Mesh networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(4): 615 - 621. (in Chinese)
- [13] 樊秀梅, 李晓辉, 何骞. 无线 Mesh 网络中组播机会路由研究[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 32 - 36.
- FAN Xiu-mei, LI Xiao-hui, HE Qian. Multicast opportunistic routing in wireless Mesh network[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 32 - 36. (in Chinese)
- [14] LIU Te-huang, LIAO Wan-jiun. Location-dependent throughput and delay in wireless Mesh networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(2): 1188 - 1198.
- [15] BRZEZINSKI A, ZUSSMAN G, MODIANO E. Distributed throughput maximization in wireless Mesh networks via pre-partitioning[J]. IEEE Transactions on Networking, 2008, 16(6): 1406 - 1419.
- [16] HERRERO O R, MAUFROID X. Innovative hybrid optical/digital ultra-fast packet-switched processor for meshed satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(2): 250 - 260.
- [17] 吴乐, 朱立东, 吴诗其. 多业务低轨道卫星通信系统的一种切换方案[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(4): 456 - 459.
- WU Le, ZHU Li-dong, WU Shi-qi. A handoff scheme in multi-service LEO satellite systems[J]. Journal of UEST of China, 2005, 34(4): 456 - 459. (in Chinese)
- [18] 陈贵海, 杜鹏, 王大进, 等. 网格中最小连接块的启发式容错路由算法[J]. 电子学报, 2004, 32(2): 318 - 322.
- CHEN Gui-hai, DU Peng, WANG Da-jin, et al. Heuristic fault-tolerant routing in Mesh using minimal-connected-component fault blocks[J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(2): 318 - 322. (in Chinese)
- [19] 李于衡, 孙恩昌, 易克初. 基于随机/自由和按需算法的卫星 BoD 多级 MAC 协议[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(1): 17 - 20.
- LI Yu-heng, SUN En-chang, YI Ke-chu. Multi-layered media access protocol based on aloha, random and DAMA for BoD satellite networks [J]. System Engineering and Electronics, 2007, 29(1): 17 - 20. (in Chinese)

#### 作者简介:



吴继礼 男, 1981 年出生, 四川名山人, 博士, 研究方向为卫星光通信组网技术。

E-mail: wujili926@126.com



赵尚弘 男, 1964 年出生, 甘肃临洮人, 空军工程大学电讯工程学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星光通信、光电对抗、非相干光纤激光组束等。近年来在卫星光通信与卫星光网络领域出版专著 2 部, 主持完成国家 863 计划项目一项, 发表学术论文 60 余篇, 为构建下一代卫星网络进行了大量技术和人才储备; 在光电对抗和光纤激光非相干组束领域各出版专著 1 部, 负责国家自然科学基金、陕西省自然科学基金 2 项, 发表论文数十篇。

E-mail: zhaoshangh@yahoo.com.cn



李勇军 男, 1979 年出生, 陕西青涧人, 博士, 空军工程大学电讯工程学院讲师, 研究方向为卫星光网络技术。

E-mail: tz\_228@163.com