

文章编号: 1001 - 893X(2011)08 - 0147 - 07

## 再生式通信卫星转发器的研究进展\*

朱子行, 赵尚弘, 李勇军, 王 翔, 赵顾颢, 刘 韵

(空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077)

**摘要:**随着星上高速数据处理与交换的需求不断增加,再生式通信卫星转发器逐渐成为研究热点。概述了几种典型的再生式转发器国内外最新研究进展,指出了其信息处理、交换技术发展中的主要问题,包括多载波解调、吞吐量较低以及微波/光调制等,在此基础上提出了合适的补偿技术、星上半透明突发交换、光副载波调制以及波分复用等针对性的解决方法,可为我国卫星转发器设计以及星上信息处理、交换等关键技术研究提供参考。

**关键词:**宽带卫星通信系统;再生式转发器;星上处理;星上交换;研究进展

**中图分类号:** TN927      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.08.031

## Research Progress of Regenerative Communication Satellite Repeaters

ZHU Zi-hang, ZHAO Shang-hong, LI Yong-jun, WANG Xiang, ZHAO Gu-hao, LIU Yun

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** With the increasing requirement of high rate on-board processing and switching, the regenerative communication satellite repeater is gradually becoming the focus of research. This paper introduces the recent research progress of several overseas and domestic representative regenerative repeaters, and points out main problems in the development of information processing and switching including multi-carrier demodulation, low throughput and microwave/optical modulation. On this base, it gives corresponding solutions for compensation technology, on-board translucent burst switching, optical sub-carrier modulation and wavelength division multiplexing, which provides reference for the design of China's satellite repeater and research of on-board processing and switching.

**Key words:** broadband satellite communication system; regenerative repeater; on-board processing; on-board switching; research progress

### 1 引言

我国“十二五”规划中明确提出重点发展宽带卫星通信系统。转发器作为星上通信分系统的重要组成部分,决定了信号的接收、处理和发送方式,进而直接影响系统的可靠性、容量、重量、体积、功耗等关键性能参数<sup>[1]</sup>。通信卫星转发器可以分为透明式和再生式两类<sup>[2]</sup>,前者具有信号放大、下变频等功能,

后者除上述功能外,还具有射频波束交换、解调-再调制、基带交换、多址方式变换等功能。它们的本质区别在于是否对接收到的信号作解调处理。与单纯完成转发任务的透明式转发器相比,具有星上处理、交换功能的再生式转发器能够减少传输差错率,提高效率,消除干扰,降低传输时延,改善交换性能,充分发挥卫星通信的优点<sup>[3,4]</sup>,已经成为研究重点。

根据处理、交换方式的不同,再生式转发器可以大致分为以下 5 类<sup>[5]</sup>:星上多路复用处理器(如 Sky-

\* 收稿日期:2011-05-09;修回日期:2011-07-06

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2007AA01Z294)

Foundation Item: The National High-tech R&D Program of China (863 Program)(2007AA01Z294)

Plex processor)、星上分组交换处理器(如 SpaceMux processor、WINDS processor、Spaceway processor)、基于连接状态表交换处理器(如 AMERHIS processor)、基于标签交换处理器(如 REDSAT processor)、星上路由处理器(如 IRIS CISCO processor)。本文回顾了儿种典型的再生式转发器国内外最新研究进展,分析了技术发展中的问题,并提出了针对性的解决方法。

## 2 国外再生式转发器研究现状

### 2.1 北美

#### 2.1.1 SpaceMux

SpaceMux 是搭载在“Telesat Anik - F2”卫星上的 Ka 频段再生式转发器<sup>[7]</sup>。为了最小化星上处理器的尺寸和降低复杂度,地面中心站和 SpaceMux 转发器共同完成信息的处理、交换以及调度功能。地面站主要负责信令处理、多址接入调度以及交换控制,SpaceMux 转发器主要负责载波解调、基带交换。它可以互连多个上行链路点波束和 4 个下行链路区域波束,将上行 MF - TDMA 接入方式下的 ATM 信元封装为下行 TDM 方式下的 MPEG 传输流,以便形成 DVB MPEG 格式信号,这样,用户只要配备廉价的 DVB 接收机就能接收下行链路信号。在功能分割的模式下,星上转发器只要采用快速电路交换的结构就能满足用户分布式会议的业务需求,在未来将功能集中到星上后,则需要采用快速分组交换的结构。SpaceMux 转发器结构如图 1 所示<sup>[7]</sup>,包括 L 频段前端(LFE)、DVB 解调器、基带处理交换单元(BP-SU)以及 DVB 调制器 4 个模块。

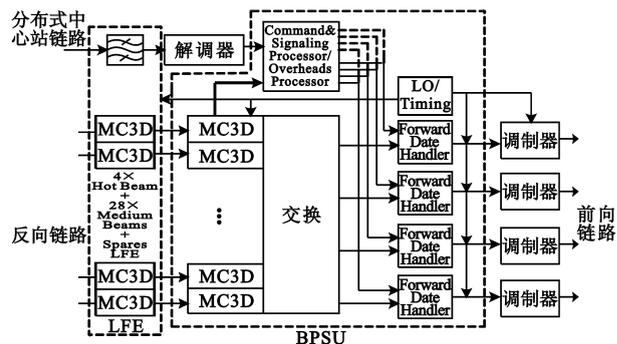


图 1 SpaceMux 转发器结构

Fig.1 Structure of SpaceMux repeater

它们对信号的处理包括两部分:

(1)来自于反向信道卫星终端(RCST)的 Ka 频段信号经过下变频至 L 频段,进入到 LFE 处理,LFE

相当于一个中频滤波交换矩阵,通过滤波选择目的波束。112 个 2.048 Mbit/s 载波被送入 MC3D 中进行解复用、解调、解码处理,此时信号被分为信令和数数据两部分,SYNC、CSC 等信令进入命令、信令处理器/信头处理器处理,数据部分即 ATM 信元进行基带交换选择合适的前向数据处理器(FDH),除了封装 ATM 业务信元外,FDH 还可以将 ATM 信元、前向链路信令、反向链路信令复用为 DVB MPEG 传输流,通过 DVB QPSK 调制器调制后发往地面终端;

(2)来自于分布式中心站的 Ka 频段信号也经过下变频至 L 频段,进入到 LFE 处理,通过标识码滤波器分离出前向链路信令和命令分组,经过 DVB 解调器解调后,命令分组进入到控制与管理功能模块,前向链路信令与反向链路信令、ATM 信元一块进入 FDH 复用为 MPEG 传输流。

#### 2.1.2 Spaceway

Spaceway 是由休斯公司(负责网络操作控制中心和地面终端)和波音公司(负责空间段)共同开发的 Ka 频段卫星通信系统,旨在为未来的转型卫星通信系统(TSAT)提供技术支撑<sup>[7]</sup>。它是第一代数字星上处理卫星,带宽为 500 MHz,上行链路速率为 16 kbit/s ~ 2.048 Mbit/s,下行链路速率为 16 kbit/s ~ 92 Mbit/s,执行国际批准的 ETSI/TIA/ITU 标准 RSM - A (Regenerative Satellite Mesh - A)。采用基于分组交换的转发器结构,与基于电路交换的结构相比,能极大地提高容量增益,分组统计复用方式又能很好地适应突发业务的传输。除此之外,上下行点波束配置、频率再用能提高系统容量;自适应动态带宽资源分配能提高信道利用率;自适应编码调制能更好地满足天气变化情况下信息的有效传输。Spaceway 转发器结构如图 2 所示<sup>[8]</sup>,经上行接收天线接收的上行链路点波束信号通过解调后变为基带信号,送入分组交换单元完成交换后,再经过调制发送到目的点波束下的目的用户。

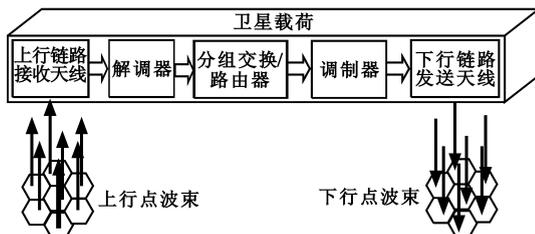


图 2 Spaceway 转发器结构

Fig.2 Structure of Spaceway repeater

## 2.2 欧洲

### 2.2.1 Skyplex

Skyplex 是搭载在通信卫星“热鸟”系列上的欧洲第一个再生式转发器<sup>[9]</sup>。在“热鸟-4”和“热鸟-5”上装载有 Ku 频段的 Skyplex 转发器,在“热鸟-6”上增加了 4 台 Ka 频段转发器以及星上 Turbo 解码器<sup>[10]</sup>。它可以

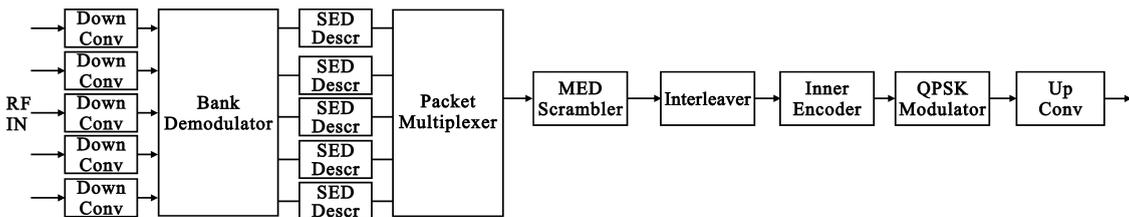


图 3 Skyplex 转发器结构  
Fig. 3 Structure of Skyplex repeater

其对信息的处理过程如下:

- (1) 输入信号下变频;
- (2) 载波信号解调和数据提取;
- (3) 上行链路分组同步: 在 SCPC (Single Channel per Carrier) 接入方式下通过信头进行同步, 在 TDMA 接入方式下通过独特码进行同步;
- (4) 通过 SEDD (Short Energy Dispersal Descrambler) 解扰;
- (5) 分组多路复用;
- (6) 对分组的信息部分通过 MEDS (Modified Energy Dispersal Scrambler) 加扰, 对 RS 奇偶校验字节通过 RSPS (Reed-Solomon Parity bytes Scrambler) 加扰;
- (7) 对加扰后的数据进行卷积交织、卷积编码;
- (8) QPSK 调制并上变频至射频频率。

### 2.2.2 AmerHis

AmerHis (Advanced Multimedia Enhanced Regenerative Hispasat System) 是一个首次使用多波束天线、MF-TDMA 接入、星上交换的宽带多媒体卫星通信系统<sup>[12]</sup>。上行链路采用 DVB-RCS 标准, 支持 0.5 Mbit/s、1 Mbit/s、2 Mbit/s、4 Mbit/s、8 Mbit/s 数据速率; 下行链路采用 DVB-S 标准, 支持最大 54 Mbit/s 数据速率。该系统装有可同时工作的 C 频段转发器 19 台, Ku 频段转发器 4 台。采用 Alcatel 9343 DVB 星上处理器, 可以完成星上信号解调、解码和交换, 实现 4 个 Ku 波束的交换, 使得波束覆盖区的用户可以实现单跳通信, 从而节省卫星资源<sup>[12]</sup>。AmerHis 转发器结构如图 4 所示<sup>[9]</sup>, 主要由下变频单元、基带处理单元和调制单元三大模块组

重新整合语音、数据、视频等不同的上行业务流(速率可以是 6.111 1 Mbit/s、6.875 0 Mbit/s、7.333 3 Mbit/s、2.291 7 Mbit/s)复用成为符合 DVB-S 标准的 55 Mbit/s 下行业务流, 这样用户接收时与透明转发器没有差别, 不仅减少了终端的成本, 而且使传输时延降低为原来的一半。Skyplex 转发器结构如图 3 所示<sup>[9]</sup>。

成: 下变频单元主要通过两次下变频实现 Ku 频率到基带频率的转变; 基带处理单元又可以分为多载波解复用解调解码模块 (Multi-Carrier Demultiplexer Demodulator Decoder, MC3D) 和多路复用模块, MC3D 主要负责模数变换、多路解复用、并行载波解调、MPEG-2 分组 Turbo 解码以及输出分组存储等待多路复用等处理, 多路复用模块根据连接状态表从不同的 MC3D 缓存中取出 MPEG-2 分组复用为符合 DVB-S 标准的 TDM 业务流, 这相当于电路交换处理; 调制单元将数据流 QPSK 调制到 Ku 频段射频输出。

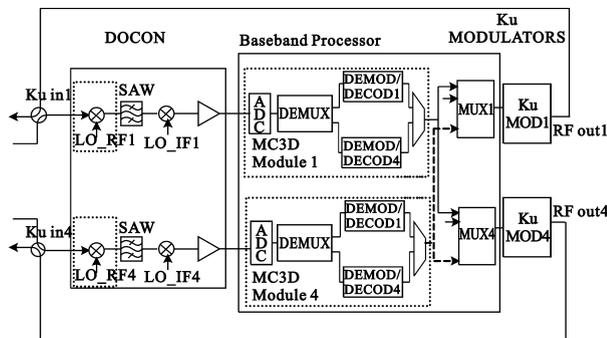


图 4 AmerHis 转发器结构  
Fig. 4 Structure of AmerHis repeater

## 2.3 日本

### 2.3.1 WINDS

日本研制的“超高速因特网卫星”WINDS (Wideband Inter Networking Engineering Test and Demonstration Satellite) 是目前世界上数据传输速率最高的卫星, 最大传输速率可达 1.2 Gbit/s<sup>[15]</sup>。卫星工作在 Ka 频段, 独具特色地综合采用了透明转发、星上交

换及混合模式3种工作模式,并运用了多波束天线和相控阵天线两种技术,充分利用多波束天线的高增益实现数据的高速传输,利用相控阵天线的灵活性扩大服务范围,各项技术都堪称卫星通信技术的里程碑,具有通信速率高、覆盖区域广、可控制功率分配,以及建立通信线路迅速等特点。

为了同时满足高速数据传输及星上交换的需要,不同的通信终端采用不同的通信模式:2.4 m和5 m的大型地面终端,可基于透明转发方式实现600 Mbit/s和1.2 Gbit/s的高速数据传输,45 cm和1.2 m的特小及甚小口径终端,可基于星上交换实现上行1.5~155 Mbit/s及下行155 Mbit/s的传输。WINDS星上转发器结构如图5所示<sup>[15,16]</sup>,它对信息的处理过程如下<sup>[15-17]</sup>。

(1)在透明转发模式下,上行信号经变频、功率放大,转发至下行。根据波束交换的方式不同,可进一步分为连续波(FDMA)模式和SS-TDMA模式。在连续波模式下,经过有源相控阵天线接收的上行链路信号,通过下变频至中频,利用信道化的带通滤波器BPF-W3和BPF-W4实现波束间的交换。在SS-TDMA模式下,利用中频交换矩阵来实现波束间的交换。交换矩阵以时分方式进行工作,切换的时间为2 ms,接收矩阵对上行波束进行选择,发射矩阵对下行波束选择,并将信号送至100 MHz的带通滤波器BPF-W1和BPF-W2工作。

(2)在星上基带交换模式下,接收信号经过数字解调器(DDEM)解调译码后成为ATM信元流,进入ATM交换机,ATM交换机根据PVC配置表和ATM信元头中的VPI/VCI标识进行高速交换,输出的155 Mbit/s信元流通过QPSK调制器(MOD)调制并形成突发数据,以TDMA方式在各个波束内进行广播,

最后通过上变频、多通道放大器(MPA)输出。

(3)在混合模式下,1个透明转发模式的622 Mbit/s QPSK信号以及6个基带交换模式的51 Mbit/s信号各占550 MHz的带宽,组成混合信号传输。该信号在星上通过1:N的分路器和中频交换矩阵后,将基带模式下处理的信号分配给星上ATM交换子系统(ABS),而把透明转发模式下的信号送至上带滤波器BPF-U1和BPF-U2。

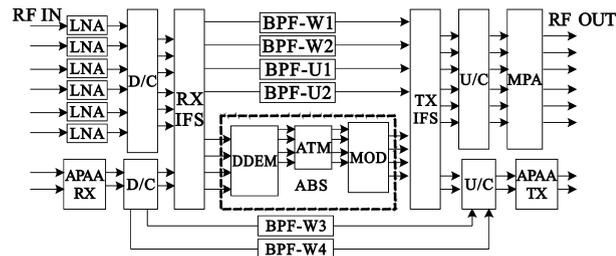


图5 WINDS转发器结构  
Fig.5 Structure of WINDS repeater

### 2.3.2 ETS-VIII

日本的“八号工程试验卫星”(ETS-VIII)主要是为移动用户之间以及移动用户与地面网之间提供通信服务,支持5.6 kbit/s语音传输和32 kbit/s数据传输<sup>[18]</sup>。卫星上的转发器工作在S频段和Ka频段,在反馈链路(网关站和卫星之间的链路)采用上行30.6 GHz、下行20.8 GHz的Ka频段,在移动链路(移动用户之间的链路)采用上行2.66 GHz、下行2.50 GHz的S频段。通过基带交换和再生处理提高系统的灵活性和增加链路预算。ETS-VIII转发器结构如图6所示<sup>[18,19]</sup>,主要由前向链路处理器、交叉链路处理器、控制处理器、反向链路处理器、发送相位阵列反馈系统、接收相位阵列反馈系统等六大模块组成。

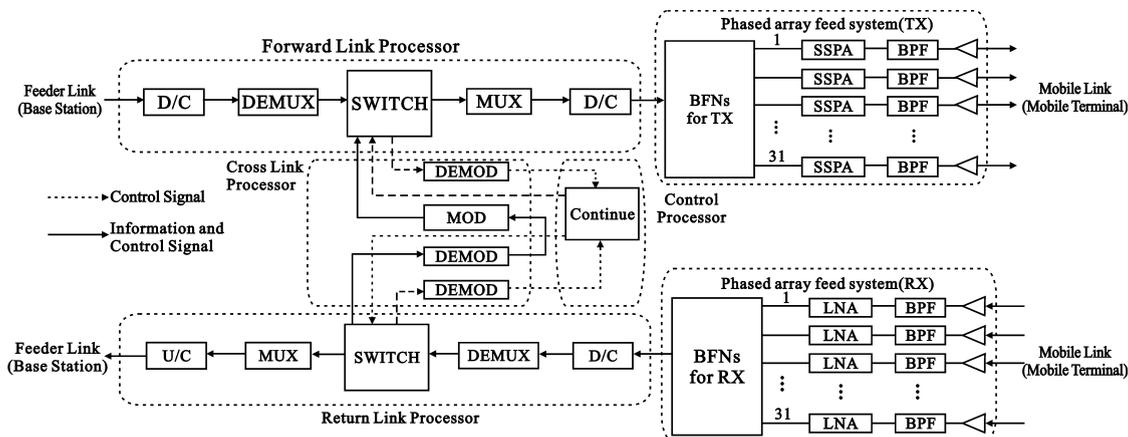


图6 ETS-VIII转发器结构  
Fig.6 Structure of ETS-VIII repeater

通信过程可以分为两类。

(1)网关站与移动终端之间的通信。以网关站发送、移动终端接收为例说明:进入转发器的信息和控制信号经过下变频至基带频率,经过解复用后进入交换单元,此时将控制信号解调送入控制处理器来控制信息的交换,交换后的信息通过多路复用后上变频至 S 频段,最后通过波束成形网络分为 31 个部分,经固态功率放大器放大、带通滤波器滤波后由天线单元发往地面移动终端。

(2)移动终端之间的通信。由天线阵列接收的 31 路信号经过带通滤波器滤波、低噪声放大器放大后通过波束成形网络合成一路输出,经过下变频至基带频率,经过解复用后进入交换单元,此时将信息解调处理后再调制送入另一个交换单元,由控制处理器根据解调后的控制信号来控制信息的交换,交换后的信息通过多路复用后上变频至 S 频段,最后通过发送相位阵列反馈系统发往另一个地面移动终端。

### 3 国内再生式转发器研究现状

近年来,随着星上高速数据处理与交换的需求不断增加,国内一些相关单位也相继开展了再生式通信卫星转发器关键技术的研究。中国空间技术研究院西安分院对星上高速数字解调、星上级联码译码、星上 ATM 交换等关键技术进行了深入研究<sup>[20]</sup>;解放军理工大学、国防科技大学、哈尔滨工业大学重点对星上 ATM 交换机结构以及调度、拥塞控制算法开展了理论研究<sup>[21-23]</sup>,取得了一定的成果,但在星上交换容量、处理器速度等方面与国际先进水平相比还存在一定差距。

## 4 存在问题及解决方法

### 4.1 存在问题

综合国内外研究现状可以看出,再生式卫星转发器是现代卫星通信技术发展的必然结果,然而其中的部分关键技术并不完善,有待于进一步研究和发 展,还存在以下几个方面的问题。

(1)再生式转发器必然要对信号进行解调,在 MF-TDMA 接入方式下,数量众多的解调器会给星上通信载荷的可靠性造成严重的影响。虽然采用多载波整体解调的 MCD 技术可减少解调器的数量,但是 MCD 解调器的实现仍然是较为复杂的,而且存在频率偏移、符号间干扰、相位差错、量化差错等问题<sup>[24]</sup>。

(2)当前卫星数据中继能力达到每秒吉比特量级,但星上数据采集能力已经达到了每秒太比特量级,数据中继能力相对不足导致大量的信息滞后甚至是遗弃,低效的星载交换已经成为制约未来宽带卫星通信进一步发展亟需突破的一大难题<sup>[25]</sup>。由于技术的限制,分组交换是以准静态或共享缓存的方式进行。在前一种方式下,交换配置只能在一秒内改变一次,路由决定不能以分组为基础进行。在后一种方式下,共享存储器需要以超出  $N$  倍的分组速率进行操作( $N$  为交换结构端口数),因此整体的交换吞吐量被限制在每秒吉比特。

(3)在我国“十二五”规划中重点发展传统微波卫星系统的同时,国家空间科技发展规划中也明确了空间光通信的发展路线,即到 2020 年数据传输速率达 30~40 Gbit/s 以上。因此可以判定,在今后相当长一段时间内,卫星上将出现微波和激光并存的局面<sup>[26-28]</sup>。如果通过解复用、解调制和解码等过程,取出基带数据处理后,再由数字信号直接调制激光,存在着处理过程复杂、设备体积笨重和网络延迟增加等缺点,无法适应星上有效载荷的要求。

### 4.2 解决方法

针对再生式转发器存在的上述问题,提出如下解决方法。

(1)MCD 解调器中存在的频率偏移是由上、下变频本振信号的频率差引起的,可以通过增加保护频带的方法解决;量化噪声的产生是与 MCD 解调器中的数字滤波器直接相关的,通过增加量化比特的数目可以极大降低量化噪声的影响;相位噪声是由多载波解复用器中的多个下变频本振信号引入的,会引起子载波信道间干扰,采用多相傅里叶变换的解复用器结构能够在一定程度上克服这个问题;符号间干扰是由于信道和接收滤波器对发送信号所造成的拖尾效应引起的,可以通过选择合适的最优判决时间来解决。

(2)为了解决信息处理交换中吞吐量较低的问题,可以借鉴地面光网络突发交换思想,采用信元信头分开处理的方式。数据包到达接收机前端处理模块后,经信头提取分为信元和信头两部分。信元数据流经汇聚模块将多路低速数据流汇聚为高速数据流,转化为光信号送往光交换单元,实现数据的透明交换。信头数据流经解调译码产生光交换控制调度信息,实现对光交换的控制,同时产生新的信头,经过编码调制以后重新插入相应的信元数据流,形成

新的数据流。

(3)为了解决星上微波与激光之间的调制问题,达到不解基带数据、无需包头检测、利用微波直接调制激光的目的,可以结合光副载波调制技术和波分复用技术应用到星上处理中。首先,由地面站完成具有相同目的地址以及 QoS 要求的业务的汇聚;其次,采用星上副载波的激光调制技术,利用副载波频率作为控制信息,实现数据流在星/地之间的微波接入;最后,利用 WDM 技术实现星间光链路的多波长通道和多波长星际路由,以减轻星载处理器的处理负荷,减小卫星节点的处理延迟。

## 5 结 论

本文综述了国内外再生式转发器的最新研究进展,针对其技术发展中的多载波解调、吞吐量较低以及微波/光调制等问题,提出了合适的补偿技术、星上半透明突发交换、光副载波调制以及波分复用等解决方法。然而,面对未来空间微波/激光链路并存的局面,仅仅利用光副载波调制技术并不能完全解决微波/光调制问题,需要进一步研究宽带宽、高调制灵敏度微波信号的电光调制技术。

## 参考文献:

- [1] Charles W Bostian, William T Brandon, Alfred U Mac, et al. Key technology trends - Satellite systems[J]. Space Communications, 2000, 16(2-3): 97-124.
- [2] 吴诗其, 吴廷勇, 卓永宁. 卫星通信导论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.  
WU Shi - qi, WU Ting - yong, ZHUO Yong - ning. Introduction to Satellite Communications[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006. (in Chinese)
- [3] Tho Le - Ngoc. Switching for IP - Based Multimedia Satellite Communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(3): 462 - 471.
- [4] 李文江. 大容量卫星交换体制研究[J]. 卫星与网络, 2008(6): 66 - 68.  
LI Wen - jiang. Research of High Capability Satellite Switching System[J]. Satellite and Network, 2008(6): 66 - 68. (in Chinese)
- [5] Yun A, Casas O, Dela Cuesta B, et al. AMERHIS Next Generation Global IP Services in the Space[C] //Proceedings of the 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications. Cagliari: IEEE, 2010: 169 - 176.
- [6] Peter Takats, Martin Cote. SpaceMux: an on - board mesh processor[J]. Space Communications, 2001, 17(1-3):

203 - 213.

- [7] David Whitefield, Rajeev Gopal, Steven Arnold. Spaceway Now and in the Future: On - Board IP Packet Switching Satellite Communication Network[C] //Proceedings of Military Communications Conference. Washington DC: IEEE, 2006: 1 - 7.
- [8] Rajeev Gopal, David Whitefield, Steve Arnold. Technology Readiness of Future Generation Networks Leveraging Regenerative Satellite Mesh Architecture - A Spaceway Perspective [C] //Proceedings of Military Communications Conference. Washington DC: IEEE, 2006: 1 - 7.
- [9] Manfred Wittig. Regenerative Communication Satellites Developments in Europe, Past Present and Future[C] //Proceedings of the 25th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Seoul, Korea: AIAA, 2007: 1 - 16.
- [10] Fenech H T, Pujante - Cuadrupani A, Lance E. EUTELSAT multimedia satellites[J]. Space Communications, 2001, 17(1-3): 145 - 164.
- [11] Giuseppe Tomasicchio. The SkyplexNet, a new satellite network with traffic control and distributed network management [J]. Space Communications, 2000, 16(4): 227 - 241.
- [12] 张更新, 卢珊珊, 陈祖文. AmerHis 宽带多媒体卫星通信系统[J]. 数字通信世界, 2009(7): 74 - 77.  
ZHANG Geng - xin, LU Shan - shan, CHEN Zu - wen. AmerHis Wideband Multimedia Satellite Communication System[J]. Digital Communication World, 2009(7): 74 - 77. (in Chinese)
- [13] Jiménez I, Moreno I. AMERHIS: An Interactive Regenerative Satellite Network For Mesh Communications. Operation And Applications[C] //Proceedings of the 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. San Diego, California: AIAA, 2006: 1 - 7.
- [14] Ana Yun Garcia, Isaac Moreno Asenjo. IP Multicast over New Generation Satellite Networks, A Case Study: AmerHis [C] //Proceedings of 2006 IEEE International Workshop on Satellite and Space Communications. Leganes, Madrid, Spain: IEEE, 2006: 1 - 5.
- [15] 卢珊珊, 曹文忠, 陈明辉. 日本宽带多媒体卫星通信系统“WINDS”技术详解[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2008(20): 38 - 41.  
LU Shan - shan, CAO Wen - zhong, CHEN Ming - hui. Technology of Japanese Wideband Multimedia Satellite Communication System “WINDS” [J]. Satellite Television and Wideband Multimedia, 2008(20): 38 - 41. (in Chinese)
- [16] 边东明, 何家富, 孙玉华. WINDS 系统通信体制[J]. 数字通信世界, 2009(5): 78 - 81.  
BIAN Dong - ming, HE Jia - fu, SUN Yu - hua. WINDS Communication System[J]. Digital Communication World, 2009(5): 78 - 81. (in Chinese)
- [17] 冯少栋, 吕晶, 常江. WINDS 系统有效载荷[J]. 数字

- 通信世界, 2009(4):78-81.
- FENG Shao - dong, LV Jing, CHANG Jiang. Payload of WINDS System[J]. Digital Communication World, 2009(4): 78-81. (in Chinese)
- [18] Osamu Takeda, Katsuji Nakajima, Ryouji Nishi, et al. Development of On - Board Processor for the Japanese Engineering Test Satellite - VIII (ETS - VIII)[C]//Proceedings of the 21st International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit. Yokohama, Japan: IEEE, 2003:1-7.
- [19] Shinichi Hama, Yasushi Matsumoto, Shinichi Taira. GEO based mobile communication of the near future - BFN and packet switch on the ETS - VIII satellite[J]. Space Communications, 1998, 15(1):55-63.
- [20] 周宇昌, 李小军, 周途. 空间高速数据传输技术新进展[J]. 空间电子技术, 2009(3):43-48.
- ZHOU Yu - chang, LI Xiao - jun, ZHOU Qun. Recent Progress in Space High Rate Data Transmission Technology[J]. Space Electronic Technology, 2009(3):43-48. (in Chinese)
- [21] 宋莉, 刘爱军, 马刘非. 基于 DiffServ 的星上交换设计与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008(3): 1397-1402.
- SONG Li, LIU Ai - jun, MA Yi - fei. Design and Simulation of DiffServ - oriented on - board Switch[J]. Journal of System Simulation, 2008(3): 1397-1402. (in Chinese)
- [22] 肖丽萍, 顾学迈. 基于蚂蚁算法的星上 ATM 交换结构[J]. 宇航学报, 2007(9): 932-935.
- XIAO Li - ping, GU Xue - mai. Structure of on - board ATM Switching Based on Ant Algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2007(9): 932-935. (in Chinese)
- [23] 吕高峰. 星上交换和半实物仿真技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- LV Gao - feng. Research on OBS and Semi - Physical Simulation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [24] Jinyan Li, Junghwan Kim. Performance Analysis of MF-TDMA Multi-Carrier Demultiplexer/Demodulators (MCDDs) in the Presence of Critical Degrading Factors[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(3):371-382.
- [25] Barry Evans, Paul Thompson. Key issues and technologies for a Terabit/s satellite[C]//Proceedings of the 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. California, USA; AIAA, 2010:1-11.
- [26] Valeria Catalano, Lamberto Zuliani. Satellite Payloads for Optical Telecommunications[C]//AIAA, 2006: 1-5.
- [27] Morio Toyoshima. Trends in satellite communications and the role of optical free - space communications[J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(6): 300-311.
- [28] Michel Sotom, Benoit Benazet, Arnaud Le Kernec. Microwave Photonic Technologies for Flexible Satellite Telecom Payloads[C]//Proceedings of the 35th European Conference on Optical Communication. Vienna, Austria: IEEE, 2009: 20-24.

### 作者简介:

朱子行(1985—),男,浙江杭州人,2009年于空军工程大学获硕士学位,现为博士研究生,主要从事卫星光通信和星上交换方面的研究工作;

ZHU Zi - hang was born in Hangzhou, Zhejiang Province, in 1985. He received the M.S. degree from Air Force Engineering University in 2009. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns satellite optical communication and on - board switching.

Email: zhuzhang6@126.com

赵尚弘(1964—),男,甘肃临洮人,教授、博士生导师,主要从事卫星光通信与激光技术研究;

ZHAO Shang - hong was born in Lintao, Gansu Province, in 1964. He is now a professor and also the Ph.D. supervisor. His research concerns satellite optical communication and laser technology.

李勇军(1979—),男,陕西人,2009年于空军工程大学获博士学位,主要从事卫星光通信和星上交换方面的研究工作;

LI Yong - jun was born in Shaanxi Province, in 1979. He received the Ph.D. degree from Air Force Engineering University in 2009. His research concerns satellite optical communication and on - board switching.

王翔(1984—),男,山西人,2009年于空军工程大学获硕士学位,现为空军工程大学电讯工程学院博士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究工作;

WANG Xiang was born in Shanxi Province, in 1984. He received the M.S. degree from Air Force Engineering University in 2009. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns satellite optical communication.

赵顾颢(1985—),男,江西人,2009年于空军工程大学获硕士学位,现为博士研究生,主要从事卫星光通信方面的研究工作;

ZHAO Gu - hao was born in Jiangxi Province, in 1984. He received the M.S. degree from Air Force Engineering University in 2009. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research concerns satellite optical communication.

刘韵(1990—),女,陕西人,主要从事网络工程方面的研究工作。

LIU Yun was born in Shaanxi Province, in 1990. Her research concerns network engineering.