

卫星通信的近期发展与前景展望

易克初¹, 李怡¹, 孙晨华², 南春国²

(1. 西安电子科技大学 通信工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 中国电子科技集团公司第54研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 从分析卫星通信的特点入手, 综述了卫星通信的卫星平台、可用频率资源和主要相关技术的发展状况, 概述了典型的卫星通信系统的性能特点, 介绍了卫星通信的应用及产业化发展情况, 并展望了发展前景。

关键词: 卫星通信; 移动卫星通信; 星上处理; 星上交换; 多波束天线; 蜂窝网卫星系统

中图分类号: TN927

文献标识码: A

Recent development and its prospect of satellite communications

YI Ke-chu¹, LI Yi¹, SUN Chen-hua², NAN Chun-guo²

(1. School of Telecommunication Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. The 54-th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: After analyzing the characteristics of satellite communications, the developing status of communication satellite platform, available frequency resource, as well as the related key techniques are summarized. Through introducing some typical satellite communications systems, were presented the applications and industrialization of satellite communications, and furthermore shows the bright prospects.

Key words: satellite communications; mobile satellite communications; onboard processing; onboard switching; multi-beam antenna; cellular satellite system

1 引言

自1965年美国发射第一颗商用通信卫星以来, 卫星通信技术及其应用取得了令人瞩目的巨大成就。它实现了覆盖全球丰富多彩的通信服务, 不仅在军事中发挥了关键性作用, 也对人类的生产、生活方式产生了巨大影响。与微波中继通信及其他通信方式相比, 卫星通信主要具有以下特点^[1,2]。

1) 通信覆盖区域大, 通信距离远: 地球同步轨道(GEO)卫星距地面高度35 860 km, 只需一个卫星中继转发, 就能实现1万多公里的远距离通信; 每一颗卫星可覆盖全球表面的42.4%, 用3颗GEO卫星就可以覆盖除两极纬度76°以上地区以外的全球表面及临地空间; 如图1所示。

2) 可将其广播性与各种多址连接技术相结合构成庞大的通信网: 在一颗卫星所覆盖的区域内, 不必

依赖显式的交换, 只需利用卫星中继传输和多址/复用技术就能构成拥有许多地面用户的大型通信网。

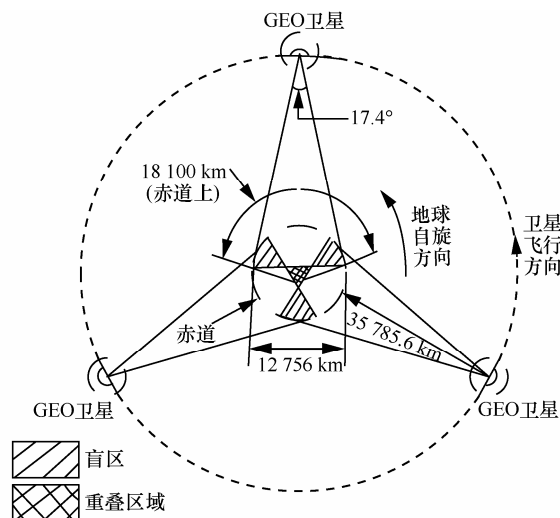


图1 GEO卫星覆盖示意

收稿日期: 2015-03-09; 修回日期: 2015-05-27

基金项目: 中国空间技术研究院基金资助项目(0883383005)

Foundation Item: The China Academy of Space Technology Foundation (0883383005)

3) 机动灵活: 卫星通信的建立不受地理条件的限制, 无论是大城市还是边远山区、岛屿, 随地可建; 通信终端也可由飞机、汽车、舰船搭载, 甚至个人随身携带; 建站迅速, 组网灵活。

4) 通信频带宽、通信容量大: 卫星通信信道处于微波频率范围, 频率资源相当丰富, 并可不断发展。

5) 信道质量好、传输性能稳定: 卫星通信链路一般都是自由空间传播的视距通信, 传输损耗很稳定而可准确预算, 多径效应一般都可忽略不计, 除非是采用很低增益天线的移动通信或个人通信终端。

6) 通信设备的成本不随通信距离增加而增加, 因而特别适于远距离以及人类活动稀少地区的通信。

卫星通信也存在一些缺点和一些应该而且可以逐步改进的方面, 这主要有以下几点。

1) 卫星发射和星上通信载荷的成本高: 星上元器件必须采用抗强辐射的宇航级器件, 而且 LEO、GEO 卫星的寿命一般分别只有 8 年、15 年左右。

2) 卫星链路传输衰减很大: 这就要求地面和星上的通信设备具有大功率发射机、高灵敏度接收机和高增益天线。

3) 卫星链路传输时延大: GEO 卫星与地面之间往返传输时间为 239~278 ms; 在基于中心站的星形网系统中, 小站之间进行话音通信必须经双跳链路, 那么传输时延达到 0.5 s, 对话过程就会感到不顺畅, 而且如果没有良好的回音抑制措施, 就会因二-四线制转换引起的回波干扰而使话音质量显著下降。

基于卫星通信的特点及其重要作用, 本文将从卫星通信的可用频率资源、卫星平台、主要关键技术、典型的卫星通信系统、卫星通信应用和产业化发展等方面进行介绍, 综述发展现状, 展望发展前景。

2 通信卫星平台与信道资源的发展

2.1 卫星通信的频率资源

早期 GEO 卫星转发器主要是 C 和 Ku 频段, 各有 500 MHz 带宽, 其上行分别位于 6 GHz、14 GHz 附近, 下行分别位于 4 GHz、12 GHz 附近; 每个转发器的带宽有 33 MHz、36 MHz、54 MHz 等; Ku 后来扩展到 800 MHz。

最近十几年 Ka 频段 2 GHz 带宽得到了广泛应用, 上行、下行分别位于 20 GHz、30 GHz 附近。此外还有 UHF、L 和 S 频段各有 15~30 MHz 的带宽可用于卫星移动通信, 分别位于 0.4 GHz、1.6 GHz、

2 GHz 左右。目前, 正在开发 40~60 GHz 的 EHF 频段^[3]。各频段的可用频带不一定连成一片, 具体的频带划分参见文献[4]。采用天线正交极化、多波束卫星天线、低轨道卫星群等技术, 可使上述频率重复使用许多次, 可用频率资源扩大许多倍。此外采用空间激光通信技术扩展信道资源, 特别是星际激光通信链路, 其容量可与光纤通信相比拟, 而抗干扰抗截获能力更强。

2.2 通信卫星平台的发展

卫星平台技术是推动卫星通信应用和增强市场竞争力的重要因素。目前, 世界上最大的通信卫星平台重达 7 吨、太阳能电池功率达 30 kW, 例如美国 Loral 公司 LS20.20 卫星平台, 发射质量 5~7 吨, 电源功率 17~30 kW, 可支持 150 个转发器, 2012 年发射 SES-4 卫星所用该公司 LS-1300 平台, 功率达 20 kW。

我国自主研发的最大平台是东方红 4 号平台, 重 5 150 kg、太阳能电池功率为 10.5 kW, 处于实验阶段的东 5 平台规模更大, 但与当前国际先进水平仍存在差距。目前我国可用通信广播卫星如表 1 所示。

表 1 通信广播卫星

卫星名称	发射时间	位置(东经)	转发器个数		
			C	Ku	广播业务
亚太 2R	1997.10	76.5°	28	16	
亚太 5	2004.6	138°	38	16	
亚太 6	2005.4	134°	38	12	
鑫诺 1	1998.7	110.5°	24	14	BSS
鑫诺 3	2007.6	125°	24	14	BSS
鑫诺 6	2010.9	126.4°	24	8	BSS
亚星 3S	1999.3	105.5°	28	16	
亚星 4	2003.4	122°	28	20	BSS
亚星 5	2009.8	122°	26	16	
中星 6B	2007.7	115.5°	38		BSS
中星 9	2008.6	92.2°	38		BSS

3 卫星通信相关技术及其发展现状与前景

3.1 调制解调技术

卫星通信中最常用的调制方式是 QPSK、OQPSK 和 $\pi/4$ QPSK 等, 近年来, 高速数据传输的需求与转发器资源紧缺推动了 8PSK、16APSK、16QAM 等高阶调制方式的研究与应用。其中 APSK 调制因其星座中所含幅度和相位信息是变量可分

离的, 可以采用简单的预失真法进行幅度非线性矫正而不影响相位特性, 使之在透明转发这种高阶调制信号时的功率效率不明显降低^[5,6]。因此, APSK 调制在卫星电视广播中得到应用, 在卫星宽带移动通信中也有很好的应用前景。

格形编码调制(TCM, trellis coding modulation)在原理上是一种很好的体制^[5]; 它将信道编码与调制融合在一起, 因而几乎不付出频带效率和功率效率降低的代价, 就能获得 5 dB 左右的编码增益。TCM 调制用于卫星通信的国际标准早已经形成, 但因其译码复杂度较高, 而且不大便于再级联外码以进一步降低误码率^[7,8], 因此应用并不广泛。

遥感数据传输和大容量宽带卫星通信中对于高速调制解调技术有迫切需求, 目前我国基于 FPGA 并行实现的高速调制解调已达到 1.5 Gbit/s, 已接近国际先进水平^[9]。这个速率基本上能满足通信卫星馈送链路高速数据传输的要求。

正交频分复用(OFDM)技术作为一种多载波调制方式, 由于其抗多径衰落能力强而在地面蜂窝网第四代(4G)、第五代(5G)移动通信中成为不可或缺的技术^[10], 因此人们一直想将其广泛应用于卫星移动通信中。值得注意的是, OFDM 本来是不大适于卫星下行链路这种功率严重受限的场合, 因为其峰平功率比(PAPR)高, 在功放非线性条件下容易产生多载波互调干扰而使链路特性变差。虽已研究出多种方法来克服这个缺点, 但没有一种办法是不需付出巨大代价就能完全解决这个问题的^[11,12], 不是频带效率显著降低, 就是计算复杂度很高。

但是, 确有一些卫星通信或广播系统的下行链路采用了 OFDM 体制。IPSTAR-I 在 60 MHz 带宽下行链路中采用层叠在 OFDM 上的 TDM 技术^[13], 其目的是为了扩大复接信号的路数, 而非抗多径衰落; 因为其 Ku 频段小站天线口径为 0.75~1.8 m, 波束主瓣只有 1°~2.3°, 周围环境的反射波很难进入天线主瓣, 因而多径效应可忽略不计。我们应当看到如此应用 OFDM 技术, 会使其链路信噪比产生明显损失。

对于基于多波束天线的 GEO 或 LEO 卫星宽带移动通信或广播系统而言, 因其多径衰落非常严重, 目前下行链路不得不采用 OFDM 体制。其移动式终端的天线增益很低, 例如, L 或 S 频段天线的增益一般只有 2~3dB, 这种半球波束天线可接收到的多径信号分量多, 多径衰落非常严重, 采用 OFDM

技术有其合理性。事实上在卫星与地面基站相结合的移动数字电视广播系统中已成功应用 OFDM^[14], 并已形成了国际标准和我国国家标准^[15,16]。

然而卫星下行链路功率受限问题远比地面移动通信基站严重, 驱动多波束卫星天线的功放非线性问题更加严重。加之 OFDM 系统抗多径衰落效益的发挥有赖于信道信息反馈, 而卫星链路时延大, 不能及时利用信道信息反馈对各子信道的信息速率和发射功率进行自适应调整。总之, 卫星下行链路采用 OFDM 体制只是当前的无奈之举, 而非理想的选择, 我们很有必要探索出一种新的传输方式来取代它, 因为其中约有 30%左右的频带效率和 10 dB 左右的链路信噪比增益的潜力是有可能挖掘出来的。

3.2 纠错编码技术

各种通信业务信息传输的误比特率(BER, bit error rate)都有最高限度要求, 例如: 声码话 BER 为 10^{-3} , 视频通信 BER 为 10^{-4} , 一般数据通信 BER 为 10^{-6} 或 10^{-7} , 无特殊措施的 ATM(asynchronous transfer mode)或 IP(Internet protocol)数据传输 BER 为 10^{-10} , 深空通信中某些数据传输 BER 为 10^{-14} 。当然一般系统不会设计为在传输和解调后所得数据的 BER 就能达到上述要求, 因为这需要很高的链路信噪比, 严重浪费发射功率。而采用纠错编码(即信道编码)技术与调制相结合, 只需付出很小的频带效率代价就能使 BER 降低若干个数量级。相应地达到指定 BER 要求的链路信噪比就可降低几 dB, 甚至十几 dB, 也就是可获得相应的编码增益^[6]。

在卫星通信的前期发展中, 使用最为广泛的信道编码是由卷积码作为内码、RS 码作为外码的串行级联码。这是因为卷积码实现简单、译码门限较低, 而 RS 码的译码复杂度低, 在输入信息误码率较高时能获得较高的编码增益, 例如, 3/4 卷积码与 RS 编码级联情况下在达到 $BER=10^{-7}$ 时可获得 5.2 dB 编码增益。

并行级联形式的 Turbo 码^[17]和低密度奇偶校验码(LDPC)^[18]是目前 2 种最先进的信道编码算法, 自 90 年代发展起来并推广应用之后, 很快在地面移动通信等场合得到了很好应用。两者均有 2 个突出特点: 一是都结合了比特交织技术, 能有效地纠正突发错误, 而多径衰落信道等场合正是容易出现突发性错误; 其二是它们的译码门限比卷积码更低, 而且能在较高的码率下获得较大的编码增益。这就是说, 它们能使整个系统的传输特性以较高的频带效

率和功率效率逼近香农容量限。例如,对于 QPSK 调制采用码率为 0.793 的 Turbo 码在 BER 达到 10^{-7} 时,比采用 RS、卷积码串行级联码的编码增益高 1.6 dB。IPSTAR-1 系统的前向链路采用 Turbo 码^[13]、Inmarsat 系统也将 Turbo 码作为高速数据传输系统的核心技术^[1,19]。

与 Turbo 码相比,LDPC 码具有编解码简单、码长可以较短、编译码效果更易逼近香农限,因而已成为当前卫星通信中信道编码的首选,特别是宽带移动通信。例如,对于 BPSK 调制采用 1/2 码率、 10^7 块长的 LDPC 码在 BER 达到 10^{-6} 时所需 E_b/N_0 值为 0.04 dB,已非常逼近频带效率为 1 bit/s/Hz 时的香农限 0 dB^[20]。目前,已用 FPGA 实现的 LDPC 编译码器,最高信息速率可达到 10 Gbit/s^[21,22],可满足高速调制解调的需求。

对于大尺度衰落信道,例如,存在降雨衰落情况下的 Ka 频段信道,采用自适应编码调制(ACM, adaptive coding modulation)可使信道传输效率最大化^[23,24]。发送端在保持发送的符号速率和功率不变的情况下,根据接收方反馈回来的 E_b/N_0 估值,自动选择最佳的调制方式和编码码率进行发送,可以高效地将链路余量,例如, Ka 频段的雨衰余量,转化为数据传输吞吐量,同时也可避免了偶然出现的干扰对链路造成的绝对中断。目前市场上已有支持 ACM 功能的产品。

3.3 扩频通信技术

卫星通信信道开放性的特点带来的隐蔽性差、抗干扰能力弱等缺点,可采用扩频技术克服,因此扩频通信主要用于隐蔽通信和抗干扰军事通信。

扩频主要有直接序列扩频(DSSS, direct sequence spectrum spreading)、跳变频率(FH, frequency hopping)、跳变时间和线性调频等 4 种基本工作方式。这里主要介绍 DSSS 和 FH。

DSSS 系统中每个符号用一个长度为 N 的伪随机序列表示,可使其信号的频带扩展 N 倍,接收端采用同样的序列进行相关接收解扩,因而可使解扩之后的信噪比提高到解扩之前的 N 倍,即可获得 N 倍的解扩处理增益。 N 可以很大,例如, GPS 中 P 码信号的扩频倍数 $N=204\ 600$,即具有 53 dB 的处理增益。因此它可以在接收信号信干噪比很低的条件下进行通信,可使通信信号具有很强的隐蔽性,并使系统具有很高的干扰容限,例如,允许信干比达 50 dB。如果在接收端解扩之前配合某种

自适应信号处理算法,例如,自适应陷波、幅度非线性处理或自适应空间陷波等,还可使系统的干扰容限再提升 30~40dB^[6,25]。

基于 DSSS 利用 GEO 卫星透明转发器可构成隐蔽性很强的重叠通信系统^[26],将功率谱密度极低的 DSSS 信号重叠在其他正在进行通信的强信号之上进行较低比特率的通信,则信号具有高度的隐蔽性。

跳频(FH)通信中,发送端将调制信号的载波频率在很宽的频率范围中按照某种秘密约定的跳频图案进行跳变,接收端采用同样跳变的本地振荡进行正交下变频,变回为零中频信号再进行基带解调、符号判决和译码。因此 FH 比 DSSS 更容易将信号频谱扩展到更宽的频率范围,可获得更高的处理增益。只要跳频范围足够宽、跳速足够快,再配合卫星多波束天线技术从空间躲避可能的干扰,通信的安全性就有充分的保障。我国已实现的 FH 系统跳频范围可达 2 GHz,跳速达上万跳/秒^[27],接近国际先进水平。

总之,目前卫星通信抗干扰技术已比较成熟,在军事通信中发挥了重要作用。当然,通信对抗双方没有绝对的赢家,只是在一定的条件下有一方取胜。

3.4 阵列天线技术与卫星蜂窝网技术

1) 阵列天线技术

由于卫星链路传播衰减很大,例如, GEO 卫星 C、Ku、Ka 频段链路的衰减都在 200 dB 左右,需要采用高增益天线,因而天线的尺寸和成本往往成为推广应用的重要障碍。早期是采用 VSAT(very small aperture terminal)技术来缓解这个问题,即由一个大型中心站与大量的小口径天线终端站一起构成一个星形网。利用中心站天线增益很高、EIRP(equivalent isotropic radiated power)值很大的优势,来弥补小站因天线口径小、增益低而使链路预算不足的弱点。后来通过开发更高频段的转发器、增大转发器的发射功率以及采用多波束卫星天线技术提高星上转发器的接收灵敏度和 EIRP,更加有效地实现了终端的小型化,天线的尺寸和成本似乎不再是明显的障碍,VSAT 的概念也逐渐淡化了。但目前基于 GEO 卫星 Ku 频段透明转发器的宽带移动通信,其“动中通”天线的成本仍然很高,相当于通信终端其余部分总成本的 6~10 倍。这种天线通常都是采用线阵形式多个阵元实现水平方向跟踪,而采用机械装置实现垂直方向的跟踪。星上采用阵列天线技术形成点波束天线或蜂窝状的多波

束天线(MBA, multiple beam antenna), 可大大提高天线的增益, 还实现了频率多次重复利用。卫星MBA主要有3种实现方式, 即反射面式、透射式和相控阵形式。

反射面MBA由一个或2个反射面和几个独立馈源组成, 通过馈源照射到反射面形成多波束。反射面MBA具有结构简单、质量轻和可靠性高等优点而最先得到广泛应用, 如Odyssey卫星^[28]和日本的ETS-VI卫星^[29]。ETS-VI卫星的MBA有2种镜面, 20 GHz的Ka频段和S频段共用3.5 m直径反射镜, 30 GHz的Ka频段和C频段共用2.5 m直径反射镜, 实现了13个Ka频段波束覆盖日本大地、C频段单波束覆盖日本中部和5个S频段的波束覆盖200海里海域。

相控阵MBA由天线阵、馈电网络及波束形成控制器等组成, 通过相移网络调节阵元的激励幅度、相位实现辐射波束指向的改变。相控阵MBA具有损耗低、动态扫描角度大的优点, 便于形成蜂窝状MBA。

透射式MBA通过网络对辐射阵移相, 在覆盖区形成相对固定的波束, 波束对辐射阵不扫描但可校正及微调, 更适于星体体积和质量较小场合的应用。例如全球星(Globalstar)系统和铱(Iridium)系统^[1]中MBA就是采用直接辐射阵列形式、基于模拟射频频移相法形成多波束, 不同的是前者使用功分器^[30], 后者使用Butler矩阵^[31]。

对于上百个以上波束的MBA, 不宜采用反射面式的, 而后2种MBA中各个阵元的功率驱动信号的PAPR都很高, 这是因为每个阵元的驱动信号都含有其他许多波束的信号, 所有阵元的信号通过空间功率合成而形成MBA。若各个波束的发送信号又是多载波调制的或多路频分复用的信号, 各阵元信号的PAPR就会更高, 功率放大器的功率回退引起射频功率效率降低和功放非线性引起的互调干扰, 将成为严重的问题^[32]。这正是如前所述OFDM不大适于卫星宽带移动通信下行链路观点的又一个论据。

2) 卫星蜂窝网技术

频率资源有限是大力发展卫星通信应用的一个瓶颈。GEO卫星采用MBA技术, 不仅能够大幅度提高卫星天线的增益和下行发射的EIRP值, 还可形成许多蜂窝小区覆盖地面, 实现频率资源的多次重复利用。例如, 星上采用7小区簇结构的140

个蜂窝状波束的MBA, 频率资源可重复利用20次, 其天线增益可比单波束区域天线的增益提高20dB左右。由此可见卫星MBA技术是开发大容量卫星移动通信系统、增强其市场竞争力的关键。目前国外GEO卫星MBA的波束个数可达500个, 而我国的这一技术存在较大差距, 有可能成为影响市场竞争力的关键因素之一。

采用多个LEO卫星构成卫星群星座, 每颗卫星都装备MBA便可形成大量的蜂窝小区, 动态地覆盖整个地球表面, 可使频率资源重复利用更多次。例如, 铱星系统66颗卫星^[1]、每星48个波束, 形成3168个蜂窝小区动态地覆盖全球表面, 其中2150个小区按12个小区簇的方式分配频带, 因此其频率资源可重复利用179次。铱星系统的星座如图2所示。

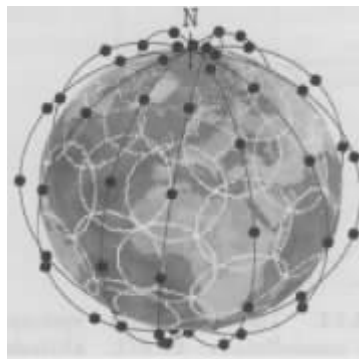


图2 铱系统的极地轨道星座

假设将来能用4000颗LEO卫星构成星座, 每颗星装一幅500波束的MBA, 则总共可形成200万个直径约20 km的蜂窝小区覆盖全球表面。若采用Ka频段3.5 GHz带宽以7小区簇方式分配频率, 则此带宽可复用266667次, 总的可用频率资源达933 THz, 每小区可用带宽约500 MHz, 其可用频率资源的地域覆盖密度可与3G、4G蜂窝网相比拟。不过这个假设不是短期内可实现的。

3.5 多址和复用技术

所谓多址(multiple access)是指某个站从它接收到的多路信号中区分各路信号来自哪个站点, 并根据需要选择其中一路或几路进行接收处理; 也可以是某一站以某种信道复用方式广播地发送多路信号, 让其他各站能按需选择其中一路或几路信号进行接收处理。所谓复用即多路复用(multiplexing), 是指多个数据流的数字调制信号共享一条信道进行传输时的信道共享方法。

无线通信的4种基本多址方式——频分多址

(FDMA)、时分多址(TDMA)、码分多址(CDMA)和随机竞争多址(Aloha)以及它们的组合,在卫星通信中都有重要应用,其中 Aloha 常常用于多址接入的呼叫申请。多址方式对应的复用方式——FDM、TDM、CDM 及其组合也常常伴随着相应的多址方式出现。

FDMA 因其实现简单而最早在卫星通信中得到广泛应用,但是,当一个透明转发器转发的多频带信号的路数达到 15 个以上时,由于难于避免多载波互调干扰而会使系统的数据吞吐率急剧下降^[2],因此单纯的 FDMA 系统能支持的用户数是非常有限的。

基于透明转发器由一个大型中心站与许多小站一起,可以基于 FDMA/TDM 方式构成用户容量很大的 VSAT 网。这是因为转发器在转发 FDMA 信号时进行充分的功率回退,可基本上避免多载波互调干扰。尽管因功率回退太多而造成射频功率效率显著降低、下行 EIRP 相应减小,但因中心站天线增益很高而仍能保证正常接收。在中心站对各路信号进行解调译码和用户交换之后,将要发往各小站的数据进行 TDM 复接和数字调制后,再通过卫星转发给各个小站。这种 TDM 信号属于单载波调制信号,因此整个外向链路(中心站—转发器—小站)的功率效率都可达到最高,从而 VSAT 站能正常地接收。这种 VSAT 网,可以提供上百条双向信道,系统根据申请按需分配信道,其总的用户容量能达到数千个,因而在 1980 年代末至 2000 年代初得到了十分广泛的应用。

由于这种 VSAT 系统中 2 个小站之间通信需要借助中心站进行两跳透明转发,不仅浪费一倍信道资源,而且增大一倍延迟。为克服这 2 个缺点曾发表许多论文,认为应该将中心站进行的 FDMA-TDM 转换搬移到星上去进行^[33]。这就要求在星上对许多路信号进行解调译码,又导致星上设备复杂很高、信道无法灵活应用 2 个缺点,因而未得到大力推广。

将 FDMA 与 TDMA 相结合,形成多频 TDMA(即 MF-TDMA),是扩大用户容量的另一条有效途径^[34]。将多频带中的每一个子带都划分为多条 TDMA 子信道,用户容量很容易扩大许多倍,而发送、接收处理依然简单方便,信道的调配也很灵活。于是很快就形成多个相关的国际标准,并得到了广泛的应用。MF-TDMA 既适于基于透明转发器构成的系统,也适于有星上处理的系统,因此将有长足的发展和运用。其实地面 2G 蜂窝网 GSM 系统也是采用这种体制。

1990 年代末, ViaSat 公司采用成对载波多址^[35](PCMA, paired carrier multiple access)、基于透明转发器构成星形 VSAT 网。其前向链路是中心站在某一频带以 TDM 方式向各个小站广播发送信息,而回传链路是各小站在同一频带以 CDMA 方式向中心站回传信息。两者的频谱重叠在同一频带上,但因后者是扩频信号,其信号强度比前者弱得多,而不影响各小站正常地接收中心站的信号。中心站在接收各小站的弱信号时所受到的干扰正是自己发送的信号,这可以通过重构而抵消之,因此也可以正常接收。该体制有 2 个独特的优点:其一是频率资源可重复应用一次,其二是小站发送信号的隐蔽性较强。

3.6 星上信号处理和交换技术

1) 星上信号处理

早期基于 GEO 卫星的通信都是采用透明转发器实现中继传输,这样提供的信道资源应用灵活性最大,转发器可以分频带出租给各个用户随意应用。但是,在星上进行信号再生等各种信号处理,可以带来多方面的巨大效益:①信号再生可消除噪声累积现象;②星上可进行各种抗干扰处理,使系统的干扰容限大幅提升;③可支持星上进行用户交换,与在地面中心站进行交换相比,传输时延减小一倍、信道利用率提高一倍。

星上处理技术(OBP, onboard processing)可分为再生式的和非再生式的两大类。所谓再生是指将接收到的含噪声数字调制信号再生为不含噪声的新数字调制信号。接收信号在星上完成分路之后,各路信号通过解调译码得到其所传输的数据流,再经交换和重新合路得到合路后的各个数据流,最后重新编码调制为新的数字调制信号发送。

非再生式 OBP 与再生式 OBP 的不同之处,仅在于是否包括信号再生,即解调译码和重新编码调制这 2 个环节,两者都可包括其余各种星上信号处理,例如,分路、合路、交换、变频、抗干扰处理等。像 IPSTAR 系统那样的弯管式转发就是一种非再生式 OBP^[13],星上将收到地面 Ku 终端发送的信号通过 Ka 频段馈送链路透明地转发到地面关口站,反之亦然。

当然我们也可认为星上交换不属于 OBP,那么无论再生式或非再生式 OBP 都可支持星上交换,只不过后者只能支持电路交换,而无法支持分组交换。

2) 星上交换

OBP 最重要的作用在于支持星上交换。再生式 OBP 可在星上获得各路信号所传输的数据流,因此能支持任何方式的交换,如 ATM 交换、IP 交换或程控电路交换等。若在星上实现了 IP 交换,则卫星网与地面因特网的互联就变得非常简单而方便。

ATM 交换主要用于干线交换或少数大用户的交换,若其交换模块的端口数太多,则难以进行拥塞控制,设备复杂度也会过高而难以实现。我国星上 ATM 交换已经投入应用;日本也于 2008 年发射的 WINDS 卫星^[36]中进行过试验性应用,可支持 3 个 155.52 Mbit/s 的数据交换。但 ATM 交换其他应用实例很少,将来也难有较大发展。

因特网应用的迅猛发展加速了卫星通信网与地面因特网的融合,而不只是通过网关实现互联互通^[37],因此兴起了星上 IP 交换研究的热潮,许多原计划采用 ATM 交换的卫星通信系统都改用 IP 交换,例如,Teledesic、Spaceway、Astrolink、SkyBridge 等^[1]。当然在星上直接进行 IP 交换也有不便之处,由于 IP 分组太长,且长度不固定,因此有人提出在星上进行多协议标签交换(MPLS, multi-protocol label switching),并提出了 GEO 卫星 MPLS 网络的总体框架^[38]。MPLS 交换将 IP 地址映射为固定长度的标签而实现 IP 分组的转发和交换,可兼容各种路由和交换协议。

星上分组交换要求在星上对各路信号都进行解调译码,当用户数很多时,例如,上万个都在星上进行解调译码,其设备的复杂度、体积和功耗太大就成为一个在未来相当长时间内都无法解决的难题。美军的 WGS(wide band global satellites)系统就是为回避该难题而又满足美军当前的迫切需求而兴建的^[39]。该系统基于非再生式 OBP,用户上行链路采用 FDMA 接入,星上完成频分分路和电路交换之后,各波束的多路信号以 FDM 方式向下发送。该体制确实可解决多路信号的 OBP 设备复杂度过高的问题。

当时 WGS 采用这种体制似乎只是权宜之计,若将来微电子技术的进一步发展,使星上可实现 OBP 的复杂度提高一两个数量级,那么理想的组网方案应该是在星上采用再生式 OBP 和 IP 交换相结合,以便直接与地面因特网相融合。但是即使是在这样的条件下,再生式和非再生式 OBP 相结合的星上处理方式还是有其优越性的^[32]。在星上既有电路交换又有 IP 交换,能更加充分利用卫星资源和改

善业务质量:星上非再生式 OBP 支持的电路交换,有利于支持宽带实时业务和大量数据流的高速传输;而星上 IP 交换的基本功能,可通过星地协调媒体层控制管理来实现,仍能支持因特网应用。

3) 连续波时分复用技术(CWTDM)

CWTDM 实现了多个连续波信号以时分复用方式共享一条信道进行传输,是支持非再生式 OBP 的重要技术。由于不在星上进行解调译码,各路数字调制信号的复包络基带信号本质上属于连续波信号,将其送入下行链路进行传输,需要在每一条信道中传输多路连续波信号,而传输这种信号能保持总传输带宽不显著增大的传输方式只有 FDM 和 TDM 2 种,后者就是 CWTDM。假如像微波电信中 SDH(synchronous digital hierarchy)协议传输多路话音信号那样,以采样量化所得数字信号作为数据流进行 TDM 复接、数字调制后再传输,则因卫星链路不能像微波电缆线路那样可用高阶调制节省带宽,而导致所需总带宽增大十几倍。

如果采用 FDM 在一条信道中传输多路连续波信号,当路数很多时功率效率会显著降低,这不适于卫星下行链路。CWTDM 是模拟通信时代遗留下来、直至有两项发明专利^[40,41]提出为止一直未解决的难题。该发明专利所提的解决方案,可以最高的功率效率和频带效率进行传输,适于卫星下行链路应用。

CWTDM 技术有 2 种形式,一种是分帧交织叠接相加法^[40],另一种是准正交时分复用(QOTDM, quasi-orthogonal time division multiplexing)^[41]。如果将两者联合运用,则可实现任意多路的 CWTDM 传输。

WGS 将程控电路交换后输出到各个波束的多路信号重构为 FDM 信号后,再由用户下行链路进行传输^[39]。它的 39 个独立信道都要传输 48 路的 FDM 信号,其驱动信号的 PAPR 很高,特别是 2 个 8 波束相控阵天线各阵元驱动信号的 PAPR 值更高,功率放大器在采取较大功率回退之后仍然难免存在非线性失真。功率回退所引起的射频功率效率降低和非线性失真所引起的互调干扰,估计有可能使下行链路的信噪比损失高达 10 dB^[32]。因此 WGS 选择这种传输方式并非最合理的选择,切不可把它当作榜样来模仿。WGS 如此设计,应该是考虑兼容美军已有的许多卫星通信终端,而当时又未发现有其他更好的选择才这样做的。虽然要损失链路性能,但其卫星天线增益与过去的全球波束天线相比

提高了 10 dB 以上, 因而仍有充分的链路余量兼容已有终端。

若将 WGS 下行链路改用 CWTDM 进行传输, 不仅可大大简化星上设备, 而且链路特性可明显改善。这是因为 CWTDM 多路复用信号中每一时段都是单载波调制信号, 在非线性功放条件下没有互调干扰, 因此功放管可以几乎不进行功率回退, 功率效率可达到最高。实际上, 这就是本文作者曾提出将 FDMA-CWTDM 转换代替 FDMA-TDM 转换支持非再生式 OBP 的方案^[42], 它可有效地克服再生式 OBP 复杂度过高、信道应用灵活性差的缺点。

由此可见, CWTDM 是支持基于非再生式 OBP 的大容量卫星移动通信系统的重要关键技术。该技术自发明以来连续研究了 10 多年, 也早已对研制出的射频互联系统进行了测试, 证明了其可行性, 但因工程成熟度不够而尚未投入实际应用, 有待通过实际卫星链路测试验证。实际上, 关于卫星通信中这样的下行链路是否应该采用 CWTDM 的问题, 至今并没有在决策层专家中达成广泛的共识, 其主要原因也许是同一时期出现的 WGS 系统转移了人们的注意力。

3.7 空间激光通信技术^[43~45]

空间激光通信技术是指用激光束作为信息载体在自由空间进行通信, 既可作为卫星间的高速传输链路, 也可作为卫星与地面站之间的通信链路。不过后者可传输的信息速率不太高, 而且当存在较浓的云雾或降雨时无法通信。携带信息的电信号调制到光束上发送, 通信的双端通过初定位和调整, 再经过光束的捕获、瞄准和跟踪建立起光链路进行信息传输。

空间激光通信的主要优点是: 通信容量大、功耗低、可靠性高、保密性好、发射机体积小和质量轻。激光和无线射频通信的一个主要区别在于用望远镜替换天线。用于 2 个 GEO 卫星之间通信的望远镜, 口径只要 29.4 cm, 而信息传输速率可达 10 Gbit/s 以上, 而用于 2 个 LEO 卫星之间通信的望远镜, 口径则只需 14.7 cm, 还可达到更高的传输速率。

美国在新一代的卫星通信系统中均采用了星间激光通信链路来提高系统的性能; 例如, WGS、MOUS (multiple objective user service)、AEHF (advanced extremely high frequency)。在 AEHF 中, 采用星间激光通信链路实现全球服务, 减少了卫星对地面支持系统的依赖, 系统在失去地面支持后仍

能自主工作 6 个月之久。我国空间激光通信研究已在地面和海上进行过成功实验, 用于卫星链路的研究正在进行。

4 一些典型的卫星通信系统

4.1 海事卫星通信系统(Inmarsat)^[1,19,46]

Inmarsat 是由国际海事卫星组织(Inmarsat) 自 1970 年代开始发展的卫星移动通信系统, 后来改制为股份制公司管理。从 Inmarsat-1 至 Inmarsat-5 共发展了 5 代, 当前主要用后三代, 共有 11 颗 GEO 卫星在轨运行, 可覆盖全球除两极区之外的全部地区。

Inmarsat-4 卫星装有一个 20 m 口径的多波束可展开天线, 形成一个全球波束、19 个宽点波束和 228 个窄点波束, 用户上行链路频率为 1 626.5~1 660.5 MHz, 下行链路频率为 1 525~1 559 MHz。2005 年推出 BGAN(broadband global area network) 业务, 实现了从模拟向数字、从话音向数据、从传统电路交换向因特网业务、从窄带低速数据向宽带高速数据的转化, 最高速率可达 492 kbit/s。可为全球几乎任何地方提供高速网络数据传输、移动视频、视频会议、传真、电子邮件和局域网接入等业务及多种附加功能。详见 www.inmarsat.org。

由 Inmarsat 和欧洲航天局(ESA)联合主办的 BGAN-X 项目已将终端类型扩展到 11 种, 包括 3 种航空、3 种海上和 2 种陆地汽车应用, 它们使用全向及定向性天线。BGAN 仅对陆地便携终端提供点对点通信, 而 BGAN-X 将该业务扩展至船舶和飞机, 还包括多播业务。详见 <http://bgan.inmarsat.com/>。

Inmarsat-5 将由 3 颗卫星组成全球高速移动网络(GlobalXpress), 每颗卫星提供 89 个 Ka 波段波束, 最高上下行速率可分别达 5 Mbit/s 和 50 Mbit/s, 而用户终端仅为 iPad 大小。使用 iDirect 调制解调器, 结合了高效的 DVB-S2, 前向链路采用 TDMA 接入, 回传链路采用自适应调制和编码, 优化了信道利用率。GlobalXpress 现已建成, 总的吞吐率超过 100 Gbit/s, 信息传输速率将达 50 Gbit/s, 相当于以前的 BGAN 业务量的 10 倍。

4.2 铱星移动通信系统^[1,47]

铱(Iridium)系统是一个基于 LEO 卫星群的全球移动通信系统, 由美国 Motorola 公司牵头、多个国家(包括我国)的 19 个公司或单位投资 57 亿美元创建, 是世界上第一个真正覆盖全球、支持手持式电话机的个人通信系统。1998 年 11 月开始运营, 不

久后宣布破产重组, 重组后的新“铱”星公司以2500万美元购买了铱星系统的资产, 并与美国国防部签订为期二年合同, 为军方提供2万用户服务。2001年3月重新开始商业运营, 用户数量平均每月新增2 000~3 000个。截至2006年5月, 全球用户数量已达14.8万户, 其中商业、军事用户分别占80%、20%。

铱系统的星座由分布在6个轨道面上的66颗卫星组成, 每个轨道面11颗星, 轨道高度780 km。每颗星的太阳能电池1.2 kW/50Ah, 射频功率400 W; 采用再生式OBP, 星上分组交换, 每个卫星有4条Ka频段的星际链路与前后左右卫星相连。

用户链路采用L频段1 621.35~1 626.5 MHz; 每颗卫星用3个16波束相控阵天线产生48个蜂窝波束, 以12小区簇方式分配频率。总容量为3 840路(实际实现1 100路)全双工信道, 话音采用2.4 kbit/s的多带激励声码器, 编码后速率为4.8 kbit/s。采用帧长为90 ms的时分双工MF-TDMA方式, 每帧可支持4个50 kbit/s用户连接的数据通信, 通信时延小于210 ms。手机重量400 g, 天线长度15 cm, 通话时间2 h, 峰值功率7 W, 平均功率0.6 W, 天线增益2 dBi。

2007年2月启动了Iridium Next计划, 其目标是: 提高数据传输速率, 改善话音质量, 支持频带的灵活分配, 采用端到端的IP技术, 以及提供更强的业务和设备。预计2015年发射首批卫星, 2017年完成星座部署。届时工作在Ka波段的手持终端的数据业务最高速率可达1.5 Mbit/s, 便携式、运输式终端速率分别可达10 Mbit/s、30 Mbit/s。详见www.iridium.com。

4.3 全球星移动通信系统^[1,48]

全球星(Globalstar)系统是由多国(包括我国)的9家公司参股、美国Loral公司和Qualcomm公司联合研制的移动通信系统。由48颗卫星构成Walker星座, 分布在8个圆轨道面上, 每个轨道面6颗, 轨道高度为1 414 km, 实现了全球南北纬70°之间的覆盖, 能够提供全球移动通信业务。该系统1999年开始运营, 不久后公司破产重组。2000年5月开始在中国地区提供服务。每颗卫星16个波束支持用户链路, 卫星“脚印”直径5 670 km, 系统共有25个关口站分布在全球, 每个网关覆盖半径约2 000 km的区域。

每颗卫星的电源功率1 100 W, 射频功率380 W。用户链路上行为L波段1 610~1 626.5 MHz, 下行

为S频段2 483.5~2 500 MHz, 采用IS-95 CDMA规范的接入体制, 没有星际链路, 没有星上交换, 而是采用弯管式透明转发, 即星上收到各小区中用户发送的CDMA信号后, 直接由C频段馈送链路转发到离该小区最近的地面关口站, 进入地面网; 反过来, 由地面网发送给移动站的信号也经关口站C频段馈送链路送到星上进行透明转发。每颗卫星可提供2 500条2.4 kbit/s的信道, 可为全球用户提供话音、数据、传真和定位等业务。支持2.4/4.8/9.6 kbit/s 3种传输速率的话音业务, 数据传输速率7.2/9.6 kbit/s, 单向时延150 ms, 接续时延4 s。用户终端类型有单模手机、双模手机、三模手机、车载终端和固定终端等。

2006年, 开始研制第二代全球星, 首批6颗和第二批6颗已分别于2010年10月和2011年12月发射。

4.4 IPSTAR系统^[13,49]

IPSTAR是泰国的Shin卫星公司为支持因特网和多媒体业务而创建的GEO卫星通信系统。2005年8月发射的IPSTAR-1卫星, 是当时世界上容量最大的通信卫星, 采用Loral公司的卫星平台, 电源总功率14 kW, 发射重量6.4吨, 寿命12年。使用Ku和Ka 2个频段: 卫星阵列天线形成84个Ku频段蜂窝小区波束覆盖人口稠密地区, 双向传输速率都可达20 Gbit/s; 3个Ku频段赋形大波束覆盖人口稀少地区, 双向传输总速率0.5 Gbit/s; 7个地区广播波束; 18个指向关口站的馈送链路Ka频段点波束。业务提供覆盖南亚部分、东南亚和中国大部分地区共22个国家, 18个关口站有4个分别设在北京、广州、上海和台北。主要用于因特网用户接入。前向链路(关口站→卫星→用户)采用TDMA-OFDM多址方式, 信息速率192 kbit/s~2 Mbit/s, 反向链路采用MF-TDMA+Aloha方式, 信息速率4 Mbit/s/8 Mbit/s。用户Ku频段天线口径0.75~1.8 m。详见www.ipstar.com。

4.5 ACeS卫星移动通信系统^[1,50]

ACeS(asia cellular satellite)系统是由印度尼西亚等国建立的区域性GEO卫星移动通信系统, 包含Garuda-1和Garuda-2 2颗GEO卫星, 其中Garuda-1已于2000年2月发射, 卫星发射重量4.5吨, 电源功率为14 kW。星上C频段天线形成一个馈送链路波束, 用于支持卫星与位于菲律宾、泰国和印度尼西亚雅加达的3个关口站、以及网控中心(NCC)之间的馈送链路。通信业务提供的范围覆盖

东亚、东南亚和南亚多达 1100 多万平方英里的面积。详见 www.aces.co.id。

用户链路为 L 频段, 上、下行链路频率分别为 1 626.5~1 660.5 MHz、1 525~1 559 MHz。星上有 2 副 12 m 口径的 L 波段天线, 分别形成 140 个点波束和 8 个可控点波束, 形成 7 小区簇结构的 140 个蜂窝小区。星上采用非再生式 OBP, 具有路由和交换能力, 可提供 11 000 条双向信道, 用户终端之间都可单跳透明转发相通。其中声码话的毛速率为 6 kbit/s, 数据业务速率 2.4 kbit/s, 还支持 3 类传真机和短信业务。采用类似于地面蜂窝网 GSM 的多址协议, 上行为 MF-TDMA 接入, 但一个下行载波频率对应于上行链路的多个载波频率, 因而下行突发速率比上行的提高几倍, 达到在 0.577 ms 时长内传输 156.25 比特的速率。双模手机的增益为 2.6 dB, 发射功率为 0.25 W。

4.6 ExeDe Internet 卫星接入系统^[51]

ExeDe Internet 是目前全球容量最大的 GEO 宽带卫星通信系统, 其卫星是美国 ViaSat 公司于 2011 年 10 月发射的 ViaSat-1 宽带通信卫星。它采用 Loral 公司 1300 型卫星平台, 发射质量 6.2 吨, 定点于西经 115°。由于采用 Ka 波段点波束技术, 覆盖范围内共有 18 个信关站与因特网相连, 用户可以采用很小口径天线或“动中通”天线, 通过 Ka 波段卫星接入因特网, 下载速率可达 12 Mbit/s。总容量高达 140 Gbit/s, 可满足 200 万以上用户通过卫星接入因特网的需要, 超过目前覆盖北美的双向 Ka、C 和 Ku 频段容量之和。

ViaSat 宽带卫星系统由 ViaSat-1 卫星、SurfBeam 2 地面系统组成, 可为用户提供高速因特网服务, 由于成本的降低, 用户的服务费价格与地面数字用户线(DSL)及 3G 手机相当。此外, ExeDe 还推出多种专业应用, 比如 SNG 及 HDTV 直播, 可为飞机上的乘客提供无线宽带连接服务等。到 2014 年 4 月为止, 北美已有多条航线、500 架以上的民航客机已采用它作为客舱因特网连接服务。ViaSat 公司计划于 2016 年发射容量更大的 ViaSat-2 卫星, 其覆盖范围将达 ViaSat-1 的 7 倍, 带宽成本将下降一半。

4.7 O3b 系统^[52]

O3b 网络(O3b networks)公司于 2008 年 9 月推出了“O3bNetworks”计划, 通过发射 16 颗中轨道(MEO)卫星提供南北纬 45°的宽带覆盖, 包括非洲、

亚洲、拉丁美洲与中东等地区。O3b 系统最大的特点是: 作为网络中枢, 目标客户是当前的互联网服务运营商。它主要提供 3 类业务: 大容量转发、企业 IP 回程和 WiMax 蜂窝网的回程。既可为地面通信运营商提供类似光纤速度的网络, 也能为 3G 网络和 WiMax 服务提供备份。

16 颗 O3b 卫星位于高度为 7 830 km、0.04°倾角的圆轨道上, 单星吞吐量约为 12 Gbit/s。采用 ELiTe 卫星平台, 单星发射重量 700 kg, 电源功率为 1 575 W。星上有 12 个 65 W、带宽 216 MHz 的行波管放大器, 采用弯管式透明转发。星上 12 副可控天线, 指向范围为±26°, 形成 10 个用户波束和 2 个信关站波束。

O3b 公司分别于 2013 年 6 月、2014 年 7 月相继成功部署第一阶段的 8 颗 MEO 卫星, 采用全 Ka 波段, 覆盖 7 个区域, 每个区域 10 个波束, 8 颗卫星共提供 70 个移动点波束, 每点波束覆盖直径为 450 km, 单星吞吐量约为 12 Gbit/s。目前, O3b 公司正在积极推广海事卫星通信服务, 英国皇家加勒比游轮公司的游轮上已经安装了 O3b 的卫星通信终端, 单艘游轮的最高速率达到 500 Mbit/s, 时延仅为 140 ms 左右。宣称实现了“光纤的速度、卫星的覆盖”。

4.8 WGS 系统^[39]

WGS 系统是美国国防卫星通信系统 DSCS-3 的后继系统, 原名 Wideband Gapfiller Satellite(宽带填隙卫星), 用于填补 DSCS-3 和全球广播卫星系统(GBS)与当时准备建设的转型卫星系统(TSAT)之间通信应用的空缺, 作为向先进宽带系统(AWS)过渡的桥梁。它可通过双向、点对点、点播和多播等方式, 向作战人员快速而大量地分发数据。2007 年 10 月发射了第一颗卫星 WGS-1, 2008 年 4 月开始正式执行通信任务。卫星发射重量 5.9 吨, 电源功率 13 kW。据 www.aospace-technology.com 报导, 最新 3 颗卫星 WGS-4、WGS-5、WGS-6 也分别于 2012 年 1 月、2012 年 5 月、2013 年 8 月发射。

WGS 卫星上配备有 10 幅方向可调的 Ka 频段(30~31 GHz/20.2~21.2 GHz)全双工点波束天线, 2 副 X 频段(7.9~8.4 GHz)相控阵 8 波束天线和 1 副 X 频段喇叭形全覆盖天线。两频段所有的可用频率资源, 包括不同波束的频带重复使用的, 总共达到 4.875 GHz, 被划分为 39 个独立的信道, 每信道 125 MHz; 每条信道又通过星上数字信道化器划分为 48 个 2.6 MHz 的子信道, 从而形成 1 872 条带

宽都为 2.6 MHz 的子信道。所有子信道都具有路由选择功能, 由地面指令控制星上实现程控电路交换, 并能支持组播和广播业务。每颗星的总通信容量最高可达 3.6 Gbit/s, 用 5 颗 WGS 卫星覆盖全球, 星间采用激光通信链路互联。目前 TSAT 系统项目已终止, 而 WGS 系统是公认的成功典范, 已成为美军宽带数据传输的主力。

4.9 美军 Milstar 通信系统^[53]

Milstar 是美国军事战略战术 GEO 中继卫星系统的简称, 该系统是美军旨在建立核战争条件下顽存的抗干扰、高可靠的三军通用战略战术通信系统。采用 20 GHz 以上的极高频率(EHF)频段, 采取抗核加固、抗干扰技术, 能在任何情况下满足各军兵种的通信需求, 既支持战略应急通信, 也广泛支持战术通信和情报图像分发。可以为部队提供方便的呼叫方式, 尤其可以为大量战术用户提供实时、保密、抗干扰的通信服务, 通信波束覆盖“全球”。

Milstar 系统开始于 20 世纪 80 年代, 目前在轨工作的 Milstar 卫星共有 6 颗, 其中 2 颗为第一代, 4 颗为第二代。第一代星上只载有 EHF 低数据速率(LDR)通信载荷, 提供 192 条低速率(75~2 400 bit/s)通信信道, 总容量为 0.5 Mbit/s; 第二代除了有 EHF LDR 通信载荷外, 还增加了中速率(MDR)通信载荷, 通信总容量也提高到 48 Mbit/s。首次采用宽频率范围(2 GHz)、高速(1 万跳/秒以上)跳频技术, 具有极强的抗干扰能力。

5 卫星通信的应用和产业化发展

5.1 卫星通信在军事上的应用

卫星通信具有如前所述的特点和特别优势, 使之在现代战争中的作用日益突出, 特别是信息化条件下的现代战争对军用通信卫星依赖程度越来越高。美英联军在伊拉克战争的迅速取胜, 其中卫星通信就起了决定性作用。当时调动了 50 多颗卫星投入战争, 包括临时征用的商业卫星, 其中大多数是通信卫星, 是信息战首次最集中的体现。此后世界各国纷纷加快了发展军事卫星通信系统的步伐。

目前, 美、英、法等国均拥有成体系的军用通信卫星系统, 其中以美军的卫星通信系统最具代表性, 不但技术先进, 还具有可持续发展性。正在积极构建的下一代军事卫星通信系统主要由宽带通信系统、窄带通信系统和安全通信系统组成。其中宽带卫星通信系统提供高速数据传输, 最有代表性

的是国防卫星通信系统(DSCS, defense satellite communication system)和 WGS。WGS 系统作为 DSCS-3 的后继星, 是美军在 X 频段和 Ka 频段的主力卫星通信系统, 承担了美国国防部 90% 的宽带卫星通信需求, 可为美军提供视频、远程会议、数据传输和高分辨率成像等通信服务, 还支持美军新型无人机的数据传输, 使各种平台、陆海空部队能够快速访问信息。

窄带卫星通信系统主要为移动中的作战单元提供点到点的链接通信能力, 其用户采用低增益天线的小型终端, 主要包括美国舰队卫星(FLTSAT, fleet satellite)通信系统与 UHF 后续星(UFO, UHF follow-on)卫星通信系统。当前主用的 MUOS 卫星通信系统是其海、空军使用的主要系统, 预计到 2015 年 5 颗卫星实现完全作战能力, 使美军的通信能力比以前提高 10 十倍。

安全通信系统强调抗干扰、隐蔽性和核生存性, 可能提供保护能力而使链路免受物理、核和电磁辐射的破坏, 具有极低到中等的终端数据速率, 极高频的卫星有效载荷。典型的保护型通信系统有 Milstar 系统、空军卫星通信(AFSATCOM)系统。作为现役的 5 颗 Milstar 的后继者 AEHF 卫星通信系统, 其通信能力超过目前 5 颗 Milstar 之和。此外美军还引入先进的商业卫星通信系统作为军事通信的补充。美国防部提出建立一个面向增强型 C⁴I 系统的、可互通的、面向 21 世纪的新一代军事卫星通信系统, 包括: WGS、AEHF 以及 MUOS 等系统。

英国自 1998 年开始研制新一代的军事卫星通信系统 Skynet-5 作为 Skynet-4 的后继星, 共有 3 颗卫星, 可支持机动、灵活的跨区作战, 提供稳定和完全的综合业务。相较 Skynet-4, 不仅提高了系统的可靠性、生存能力和安全性, 通信容量提高 4 倍, 同时还具有超强的抗干扰、抗窃听能力。系统提供 UHF、SHF 和 EHF 的 3 个频段的通信能力, 其中 EHF 频段可与美军 AEHF 联合, 为英军提供高速、安全而可靠的通信。

作为法军的新一代通信卫星系统的 Syracuse-3, 其性能与任务需求与美军 WGS 接近。系统由 2 颗卫星组成, 于 2006 年服役。采用 SHF、EHF 频段, 其中 EHF 频段用于支持高速率的移动通信。卫星吞吐量达数百 Mbit/s, 可支持多媒体业务, 同时还具有增强的抗核/电磁辐射加固性能。

我国于 2000 年发射基于东方红三号平台的军

用通信卫星,开始了军用通信网络的自主建设。后来逐步发展,建立了战略卫星通信系统和战术卫星通信系统。通信容量不断增大,技术上努力赶超国际先进水平,特别是在最近10年取得了显著的进步和巨大的成效。

5.2 民用卫星通信的发展

卫星通信始于1960年代,1980年代后VSAT技术的发展,为大量专用卫星通信网的发展创造了条件。自1990年代末开始,我国卫星VSAT专用网蓬勃发展。例如,云南英茂通信股份有限公司经营的VSAT网,21世纪初第一期工程建设除昆明主站之外有2 214个远端小站,包括省外2 090个小站,兼有电话、双向数据业务,覆盖全国范围、横跨多个行业。目前,我国已建有银行、民航、水电、气象、海关、铁路、物流管理、公安等许多专用VSAT卫星通信网。不过由于地面通信网的迅速发展,使这些VSAT终端大多数都被闲置,以致运营商很难经营。在西部大开发、村村通电话工程的支持下,配备过数以万计的卫星电话通信终端,其中新疆农村就有数千个。全球星手机在我国公开销售多年,拥有一批个人卫星通信用户。

2003年,启动的全国农村中小学现代远程教育工程计划用5年时间投资10亿元。中国教育电视台运营的中国教育卫星宽带传输系统,拥有数十万个用户终端,将卫星远程教育覆盖到全国53万余所农村中学,在帮助边远地区培训中小学教师方面发挥了重要作用。这种VSAT终端仅需一幅40 cm的Ku波段单收天线、一块PC机的PCI插件板(或机顶盒)配合PC机就可以构成,价格十分低廉,而其下载速率可达40 Mbit/s,并有经地面网低速回传的接口。

据《卫星与网络》2011年12期报道,中国空间研究院航天恒星科技有限公司开发成功一个支持大规模组网的双向卫星通信系统——Anovo VSAT系统,该系统基于DVB-S、DVB-S2等标准,采用8PSK、16APSK、32APSK,ACM方式补偿雨衰影响。其下行速率可达70 Mbit/s、回传速率达2 Mbit/s,可应用于数据通信、互联网接入、交互式远程教育、视频会议、应急通信等场合。

中电科技集团54所于2006年研制成功一个基于GEO卫星Ku或Ka频段透明转发器的MF-TDMA系统。转发器频带划分32个子带,每个子带的每帧划分为多个时隙,最多可提供几百条

子信道。既可构成网状网,也可构成星状网,前者最高用户速率为12 Mbit/s;后者前向链路最高速率12 Mbit/s,回传链路最高速率2 Mbit/s。支持IP路由,可与地面网互联,支持各种IP业务^[54]。

作为国际海事卫星组织成员国,我国海事卫星通信终端用户很多,应用十分广泛,如海洋渔业、新闻采集传播、野外勘测、救灾等场合都有很好的应用。

5.3 关于卫星通信的设备标准化和产业化

1) 卫星通信设备部件的标准化

由于卫星信道一般是非常稳定而且可预测的微波信道,因此卫星地面站设备的各部件很早就实现了国际性的标准化。例如,各个频段的低噪声放大器、上下变频器、射频功率输出单元等都有标准部件;基带调制解调器也有许多公司生产的通用性较强的产品;只有70 MHz的中频放大器一般需要自行研制。这些标准部件在10年前全为进口商品,最近几年已有多个厂家可以生产。

2) 重要的国际标准协议^[55]

国际电联(ITU)将卫星通信业务主要分为卫星广播业务(BSS)、卫星固定业务(FSS)和卫星移动业务(MSS)等3类。BSS和FSS分别为广播通信和交互通信。下面根据不同业务的特点和应用,介绍ITU和欧洲电信标准协会(ETSI)制订的相关国际标准。

DVB-S(EN 301 790)是ETSI提出的卫星广播电视国际主流标准,它规定了TDM形式的帧结构、基于MPEG-2的视频/音频编码方式和QPSK调制方式。后来又推出了DVB-S2标准EN 302 307,它采用了通信领域的新技术,可支持高清晰度电视(HDTV)、因特网接入、VoIP等业务。相较DVB-S,DVB-S2不仅采用有效降低系统解调门限的BCH码与LDPC码级联的信道编码方式和更适于卫星信道的高阶调制方式——8PSK、16APSK、32APSK,还提供了可变编码调制(VCM)和自适应编码调制(ACM)工作模式,提高了传输效率。采用此协议以TDM/MF-TDMA体制构成的VSAT系统,其前向链路和回传链路分别遵循标准协议DVB-S/S2和DVB-RCS。此外ETSI还制定了一系列针对卫星广播电视地面系统的标准,如EN 300 473和EN 300 784。

交互通信的核心标准为DVB-RCS(EN 301790),是目前唯一的由多厂商倡导的VSAT标准,它可实现双向卫星宽带交互和高性能的卫星信道接入。至2008年全球已建立200多个DVB-RCS网络,终端数达8万个以上。后来又推出了支持DVB-S2的

DVB-RCS2 (TS 101 545), 做出与 DVB-S2 相应的改进, 并规定了交互通信系统中网络层的架构、功能和管理。

为了支持宽带业务, 美国电信工业协会(TIA) 首先制定卫星宽带通信标准(TIA-1008), 提出了基于 IP 协议的卫星宽带通信系统的概念, 并规定了系统的架构和物理层、数据链路层协议。随后, TIA 和 ETSI 又联合制定了基于星上再处理空中接口的 3 个标准 TIA-1040、TS102188、TS102189。此外, ETSI 还制定了基于 DVB-S、DVB-RCS 的星上再生处理的宽带卫星系统标准 TS102429, 并已应用于欧洲宽带卫星通信系统。

卫星交互通信系统中, 除了上述总体设计标准, ETSI 还制定了一系列地面系统标准, 如 EN301428、EN301427。MSS 主要应用于移动通信、卫星移动电话及卫星移动电视等领域。其中 ETSI 针对移动地球站制定的系列标准 EN300721、EN301473 主要规定其 EIRP、带外抑制等性能指标及测试方法, 同时也对其监控和管理做出了要求。关于卫星移动电话方面, ETSI 制定了完善的基于 GEO 卫星的 GMR 系列标准 GMR-1 (TS101376)、GMR-2(TS101377), 分别从不同技术层面对 GMR 系统做了规定, TerreStar、SkyTerra、Thuraya 等系统采用了 GMR-1, 而 ACeS、Inmarsat 等系统采用 GMR-2。S-UMTS 作为 GMR 的补充, 涵盖 GEO、MEO 和 LEO 3 种轨道卫星, ETSI 也分别对具体技术及组播业务制定了相关的标准, 如 TS101851、TS102442。

作为新兴应用的卫星移动电视, ETSI 分别制定了 DVB-SH 标准 EN302583 和 SDR 标准 EN302550, 两者在工作频段、调制方式和编码形式上不同, 都可为用户提供广播服务。目前, 美国全球通信公司的 ICO G1 卫星和欧洲通信卫星公司的 Eutelsat W2A 卫星采用 DVB-SH 标准, 而美国 WorldSpace 公司的 Afristar 和 Asiastar 2 颗卫星采用了 SDR 标准。作为 DVB-SH 的扩展, ETSI 还制定了适于 S 频段移动交互多媒体通信的标准 TS102721。

针对 BSS、FSS、MSS 的共性内容, ETSI 也制定一系列标准, 如: TR103124、TR103166。这些标准对我国开展卫星通信应用有借鉴意义。

3) 关于卫星通信产业化发展

卫星通信在国外特别是一些发达国家中早已实现产业化, 甚至军事通信应用都是在市场化的

环境下运作的, 早已形成由多个国际竞争力很强的公司牵头的产业链。前面介绍那些典型的卫星通信系统, 就是在市场竞争中涌现的许多产品中的几个代表。

我国卫星通信的发展主要是国家投资军用卫星通信而带动起来的, 虽然也形成过有上百家公司参与的产业链, 包括各种部件和系统的开发和生产、应用工程的设计和安装维护、卫星网络的运营等, 但是没有像电信行业那样出现具有国际竞争力的大型企业。

我国在卫星通信市场竞争方面还有一些其他的短板, 例如, 卫星多波束天线技术、Ka 波段及更高频段的设备制造、航天级 FPGA 芯片制造技术等。此外我国所拥有的重要专利太少, 这些都将使我们在国际市场竞争中处于不利地位。而目前用于接入互联网的宽带卫星发展势头很猛, 在民用通信中的市场占有率迅速上升, 因此很有必要就即将到来的市场竞争有关问题进行深入讨论。例如, 卫星通信在民用通信市场中占有份额的增长是否即将出现前所未有的大飞跃而达到相当大的比例、我国的这块市场是否不得不完全被国外公司占领、我国在这方面的国际竞争力差距是否可能导致一场严重危机等。

6 卫星通信的前景展望

有线电信网、计算机局域网和有线电视网已实现三网融合并入骨干网, 地面移动通信蜂窝网通过其无线核心网与骨干网互联, 卫星通信网也应该是通过其无线核心网与骨干网互联。随着卫星通信的 IP 化, 各种不同性质和不同业务的卫星通信终端, 都将变成类似的因特网接入设备, 可见 IP 化确实是大势所趋。但是此处 IP 化不等于卫星通信网内部的传输与交换全部 IP 化, 保留部分特别的传输和交换方式, 有利于发挥卫星通信的特点而获得更高的卫星资源利用率和达到更高的业务质量。

由于基于 Ka 频段的 LEO 卫星群蜂窝网的发展, 不仅使可用频率资源和通信容量大幅度增长, 而且使用户终端的成本大大降低, 卫星通信无缝覆盖的优势凸现, 在国际民用通信市场中确实可以占据一个不小比例。但是我国的情况略有不同。由于基于 4G 的地面蜂窝网在我国民用通信市场中占有比例明显高于国外大多数国家, 而卫星通信接入因特网的竞争力还远不如 4G, 目前卫星通信可实现

的可用频率资源的地域覆盖密度,比4G的覆盖密度低几个数量级。尽管Google公司正在与SpaceX公司合作,发射700颗LEO小卫星支持因特网接入,还提出将来扩大到4000颗卫星的雄心勃勃计划(参见纽约时报2015年1月27日, <http://www.jiemian.com/article/229397.html>),该公司很可能在国际民用通信市场中占相当大的份额,但预计近期还不大可能在我国市场中占很大份额。

笔者认为,卫星通信接入因特网的应用,在我国近期内仍然只是对地面网络覆盖不足的一种重要补充。当然,卫星通信无缝覆盖的优势可以产生很高的实用价值和社会效益,这是无法用市场份额大小衡量的。民用卫星通信在规模和实际效益将会超过军用卫星通信,我国卫星通信产业将由政府主导转变为市场主导。因此,卫星通信的发展无疑是前途光明而且意义重大的。我们应该以更强的创新意识和更大的创新勇气去迎接竞争和挑战。

7 结束语

本文综述了卫星通信的近期发展,包括卫星平台、频率资源和主要相关技术、卫星通信的应用和产业化发展的现状,概述了一些典型的卫星系统的性能特点,讨论了产业化与标准化方面的一些问题,展望了卫星通信及其应用的发展前景。

参考文献:

- [1] LUTZ E, WERNER, JAHN A. *Satellite Systems for Personal and Broad Communications*[M]. Berlin: Springer, 2000.
- [2] MARAL G, BOUSQUET M. *Satellite Communications Systems*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- [3] CIANCA E, ROSSI T, YAHALOM A, *et al.* EHF for satellite communications: the new broadband frontier[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(11):1858-1881.
- [4] 信息产业部无线电管理局. 中华人民共和国无线电频率划分规定[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
Radio Administration Bureau of Ministry of Information Industry. People's Republic of China Regulations on the Radio Frequency Allocation[M]. Beijing: the People's Posts and Telecommunications Press, 2002.
- [5] PROAKIS J G. *Digital Communications Fifth Edition*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009.
- [6] 易克初, 孙永军. *数字通信理论与系统*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
YI K C, SUN Y J. *Digital Communication Theory and System*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013.
- [7] EL-SWADY R, BAHIE ELDIN M A, GERGIS L F. Performance of concatenated turbo-trellis coded modulation for mobile satellite channels[A]. *IEEE Proceedings of 18th National Radio Science Conference*[C]. Mansoura, Egypt, 2001. 369-377.
- [8] BHASKARAN R, KIM J, KWATRA S C. Performance of RS encoded TCM-D8PSK on a vegetative shadowed land mobile satellite channel[A]. *IEEE Military Communications Conference*[C]. Fort Monmouth, America, 1994.1034-1042.
- [9] 陈晖. 星地高速调制解调技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
CHEN H. *Research on Satellite- to-Ground High Data Rate Modulation and Demodulation*[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [10] CHUANG J, SOLLENBERGER N. Beyond 3G: wideband wireless data access based on OFDM and dynamic packet assignment[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 37(7): 78-87.
- [11] WANG Y C, YI K C, TIAN B. PAPR reduction of OFDM signals with minimized EVM via semi-definite relaxation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(9): 4662-4667.
- [12] THOMPSON S C, AHMED A U, PROAKIS J G, *et al.* Constant Envelope OFDM[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2008, 56(8): 1300-1312.
- [13] THESLING W, VANDERAAR M, THOMPSON M, *et al.* Two-way Internet over iPSTAR using advanced error correction and dynamic links[A]. *AIAA International Communication Satellite System Conference*[C]. Montreal, Canada ,2002.
- [14] BURGER R A, JACOVONI G, READER C, *et al.* A survey of digital TV standards China[A]. *IEEE Conference on Communications and Networking*[C]. Shanghai, China, 2007.687-696.
- [15] GY/T220.1-2006. 中华人民共和国广播电影电视行业标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
GY/T220.1-2006. Radio, film and television industry standard of the People's Republic of China[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [16] 杨庆华. 中国移动多媒体广播标准体系介绍[J]. *现代电视技术*, 2008, 2: 14-18.
YANG Q H. The introduction of China mobile multimedia broadcasting standards[J]. *Modern Television Technology*, 2008, 2: 14-18.
- [17] BERROU C, GLAVIEUX A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1996, 44(10):1261-1271.
- [18] KYUHYUK C, JUN H. Upper bounds for the performance of turbo-like codes and low density parity check codes[J]. *Journal of Communications and Networks*, 2012, 10(1):5-9.
- [19] FEBVRE P, BOUTHORS X, MAALOUF S. Efficient IP-multicast via Inmarsat BGAN, a 3GPP satellite network[J]. *Satellite Communication Network*, 2007, 25: 459-480.
- [20] CHUNG S Y, FOMEY G D, RICHARDSON T J. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit[J]. *IEEE Communications Letters*, 2001, 5(2): 58-60.
- [21] 郭锐, 胡方宁, 刘济林. H-ARQ 信道上高性能全分集 LDPC 码的构造与性能分析[J]. *通信学报*, 2012, 33(4): 69-76.

- GUO R, HU F N, LIU J L. High performance full diversity LDPC codes construction and performance analysis for H-ARQ channels[J]. *Journal on Communications*, 2012, 33(4):69-76.
- [22] 袁瑞佳, 白宝明, 童胜. 10 Gbit/s LDPC 编码器的 FPGA 设计[J]. *电子与信息学报*, 2011,33(12):2942-2947.
- YUAN R J, BAI B M, TONG S. FPGA-based design of LDPC encoder with Throughput over 10 Gbit/s [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33 (12): 2942-2947.
- [23] BISCHL H, BRANDT H, DE COLA T, *et al.* Adaptive coding and modulation for satellite broadband and networks: from theory to practice[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2009, 28(2):59-111.
- [24] RINALD O, VAZQUEZ-CASTRO M A, MORELLO A. DVB-S2 ACM modes for IP and MPEG unicast applications[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2004, 22(3): 367-399.
- [25] CHEN J, LIU Y, NIU H B. Performance appraisal of anti-interference technology with adaptive nulling antenna based on SINR of array output[A]. *IEEE International symposium on Antennas, Propagation & EM Theory*[C]. Xian, China,2012.686-689.
- [26] 张邦宁,张健,郭道省. 应用 DS扩频信号的卫星重叠通信研究[J].*通信学报*,2005,26(5):57-62.
- ZHANG B N, ZHANG J, GUO D S. Overlay communication based on satellite with DSSS signal[J]. *Journal on Communications*, 2005, 26(5):57-62.
- [27] 梅文华,杨义先,周炯荣.跳频序列设计理论的研究进展[J].*通信学报*,2003,24(2):92-101.
- MEI W H, YANG Y X, ZHOU J P. Survey of theoretical bounds and practical constructions for frequency hopping sequences[J]. *Journal on Communications*, 2003, 24(2):92-101.
- [28] HORSTEIN M. Odyssey-a satellite-based personal communication system[A]. *IEEE International Conference on Universal Personal Communications*[C]. Ottawa, Canada,1993.291-298.
- [29] NAKAMARU K, KONDO K, KATAGI T, *et al.* An overview of Japan's engineering test satellite VI project[A]. *IEEE International Conference on Communications*[C]. Boston, America, 1989.11-14.
- [30] METZEN P L. Globalstar satellite phased array antennas[A]. *IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*[C]. Dana Point, America, 2000.207-210.
- [31] SCHUSS J J, UPTON J, MAYERS B, *et al.* The IRIDIUM main mission antenna concept[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1999, 47(3):416-424.
- [32] 易克初,田斌,李怡等.基于多波束 GEO 卫星的宽带移动通信方法及系统[P].中国专利: 201410168372.5, 2014-04-25.
- YI K C, TIAN B, LI Y, *et al.* A Broadband Mobile Communication System Based on Multi-beam GEO Satellite[P]. Chinese patent: 201410168372.5, 2014-04-25.
- [33] ANANASSO F, ENRICO D R. Techniques and Technologies for Multicarrier Demodulation in FDMA/TDM Satellite Systems, *Satellite Integrated Communications Networks*[M]. Elsevier Science Publishers, 1988. 243-251.
- [34] KOGLER W, SCHLEMMER H, KOUDELKA O. Timing synchronization in MF-TDMA systems for geostationary satellites[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(12):36-42.
- [35] MARK D. Paired carrier multiple access (PCMA) for satellite communications[A]. *Pacific Telecommunications Conference*[C]. Honolulu, Hawaii, 1998. 787-791.
- [36] Wideband InterNetworking satellite engineering test and demonstration satellite "KIZUNA"(WINDS)[EB/OL]. http://www.jaxa.jp/projects/sat/winds/index_e.html.
- [37] FARSEROTU J, PRASAD R. A survey of future broadband multimedia satellite systems, issues and trends[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2000,38 (6): 128-133.
- [38] DONNER A, BERIOLI M, WERNERM. MPLS-based satellite constellation networks[J]. *IEEE Journal on selected areas in Communications*, 2004, 22(3):438-448.
- [39] KUMAR R, TAGGART D, MONZINGO R, *et al.* Wideband gapfiller satellite (WGS) system[A].*IEEE Aero Conference*[C]. Big Sky, America.2005.1-8.
- [40] 易克初.带限信号时分复用传输方法[P]. 中国专利: 981128467, 1998-04-11.
- YI K C. Time Division Multiplexing Technique for Band-Limited Signals[P]. Chinese Patent: 98112846, 1998-04-11.
- [41] 易克初,王勇,易鸿锋等.准正交时分复用传输方法与系统[P].中国专利:200510042910.7, 2005-01-11. 国际发明 PCT/CN2006/001304, 2006-06-11.
- YI K C, WANG Y, YI H F, *et al.* Quasi-Orthogonal Time Division Multiplexing Transmission Method and System[P] .Chinese Patent: 200510042910.7, 2005-01-11. International Patent: PCT/CN2006/001304, 2006-06-11.
- [42] YI K C, GU C Y, WANG C T. Continuous wave time-division-multiplexing and its applications[J].*IEICE Transactions on Communications*, 2005, E88-B(11): 4266-4273.
- [43] BEGLEY D L. Free-space laser communication: a historical perspective[A]. *IEEE Annual Meeting, Lasers and Electro- Optics Society*[C]. Piscataway, America, 2002.391-392.
- [44] TOYOSHIMA M. Trends in satellite communications and the role of optical free-space communications[J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, 4:300-311,
- [45] TOYOSHIMA M, TAKAYAMA Y, TAKAHASHI T, *et al.* Ground-to satellite laser communication experiments[J]. *IEEE A&E Systems Magazine*, 2008, 23(8):10-18.
- [46] SPIRIDONOV V V. Inmarsat systems and services[A]. *IEEE Proceedings of International Conference on Satellite Communications*[C]. Moscow, Russia,1994.45-52.
- [47] STERLING D E, HARLELID E. The Iridium system-a revolutionary

satellite communications system developed with innovative applications of technology[A]. Proceedings of IEEE Military Satellite Communications Conference[C]. McLean, America, 1991. 436-440.

- [48] DIETRICH F, METZEN P, MONTE P. The golbalstar cellular satellite system[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(6):935-942.
- [50] TAYLOR S C, ADIWOSO A R. The Asia cellular satellite system[A]. AIAA International Communications Satellite Systems Conference[C]. Washington, America, 1996. 1239-1249.
- [51] <https://www.viasat.com/broadband-satellite-networks/high-capacity-satellite-system>[EB/OL].
- [52] <http://www.o3bnetworks.com/o3b-advantage/our-technology>[EB/OL].
- [53] MALESKI M, ZIMBLER A E. Internetworking through milstar[A]. IEEE Military Communications Conference[C]. San Diego, America, 1995. 474-478.
- [54] 郝学坤, 孙晨华, 李文铎. MF-TDMA 卫星通信系统技术体制研究[J]. 无线电通信技术, 2006, 32(5):1-3.
HAO X K, SUN C H, LI W D. The investigation of MF-TDMA satellite communication system[J]. Radio Communications Technology, 2006, 32(5):1-3.
- [55] 张乐, 金晓晨. 国外卫星通信标准体系框架研究[J]. 卫星应用, 2014, 7:28-31.
ZHANG L, JIN X C. Research on oversea satellite communication standard system[J]. Satellite Applications, 2014, 7:28-31.

作者简介:



易克初 (1943-), 男, 湖南涟源人, 博士, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、无线信号处理、通信信号处理等。



李怡 (1983-), 女, 陕西宝鸡人, 西安电子科技大学博士生, 主要研究方向为卫星通信等。

孙晨华 (196410-), 男, 河北邢台人, 中国电子科技集团公司第 54 研究所研究员、副总工程师, 主要研究方向为卫星通信等。

南春国 (1973-9), 男, 河北高邑人, 中国电子科技集团公司第 54 研究所高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、多媒体技术、模式识别、计算机视觉等。