

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.027

引用格式:花江,王永胜,喻火根.卫星通信新技术现状与展望[J].电讯技术,2014,54(5):674-681. [HUA Jiang, WANG Yong-sheng, YU Huo-gen. Status and Prospect of New Techniques for Satellite Communication[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(5):674-681.]

卫星通信新技术现状与展望*

花江^{1,**}, 王永胜², 喻火根¹

(1. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036; 2. 空军装备部 科研订货部, 北京 100843)

摘要:卫星通信技术已成为陆海空天一体化信息网络系统的重要组成部分。介绍了卫星通信新技术中星上载荷、物理层传输、卫星通信天线和更高频段卫星通信等技术的现状,深入分析了它们的发展趋势,提出了有待进一步研究的关键技术,为我国卫星通信系统设计提供借鉴和思路。

关键词:卫星通信;星上载荷;物理层传输;先进天线

中图分类号:TN927 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2014)05-0674-08

Status and Prospect of New Techniques for Satellite Communication

HUA Jiang¹, WANG Yong-sheng², YU Huo-gen¹

(1. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;
2. Scientific Research Indent Branch, Airforce Equipment Department, Beijing 100843, China)

Abstract: Satellite communication has become an important part of integrated information network system in which land, sea, air and space are united. This paper introduces the status of satellite payloads, physical layer transmission, communication antennas and high-frequency satellite communication in satellite communication system, analyzes the development trends of these new techniques and presents key techniques to be further studied. Related contents and suggestions provide reference and ideas for the design of China's satellite communication systems.

Key words: satellite communication; satellite payload; physical layer transmission; advanced antenna

1 引言

自从 Arthur C. Clarke 于 1945 年提出卫星通信^[1]概念后,经过 60 多年的发展,卫星通信已在通信广播、军事侦察、气象预报、导航定位等领域得到广泛应用。相比于地基通信方式,卫星通信具有覆盖面广、多址传输、基本不受地形地物限制、不依赖已有通信设施、能迅速布设/撤收通信网、能按战场的瞬息变化动态组合网络形式、利于协同通信和越级指挥通信等特点。但随着信息全球化和互联网、数字多媒体通信需求的不断增长,传统的卫星通信技术已经很难满足高速通信的要求。

近年来,为了适应现代卫星通信业务的需求,研究人员提出了大量卫星通信新技术。其中,一些新技术已被欧美应用于实际卫星通信系统中。相比之下,现阶段我国卫星通信虽然取得了一定的成绩,但与国外发展水平相比仍存在较大差距。在市场需求和国家强力扶持下,应充分消化和利用卫星通信先进技术,从而快速缩小与国外的差距。

本文重点关注卫星通信中的星上载荷、物理层传输、卫通天线和更高频段卫通等新技术,在总结这些新技术发展现状的基础上,进一步指出了未来的发展趋势。

* 收稿日期:2014-01-02;修回日期:2014-04-23 Received date:2014-01-02;Revised date:2014-04-23

** 通讯作者:15328000188@163.com Corresponding author:15328000188@163.com

2 先进星上载荷技术

为了提高竞争力,通信卫星服务商应在降低服务成本的同时进一步提升系统容量。其中,星上载荷技术在增加通信卫星灵活性和容量方面发挥了重要作用^[2]。

2.1 多波束天线载荷

早期卫星通信系统通常采用多波束天线(Multi-Beam Antenna, MBA)载荷来增加通信容量。图 1 给出了模拟弯管式 MBA 载荷结构示意图,其中, LNA(Low Noise Amplifier)代表低噪声放大器, D/C 代表下变频器, U/C 代表上变频器, HPA(High Power Amplifier)代表高功放放大器。在满足天线限定和特定信扰比限定的条件下, MBA 载荷通过合理选择波束和子频带数量来最大化频率复用因子。然而,该载荷技术的子频带交换能力有限,且只有在通信业务均匀分布的场景下才能最大化通信容量。不幸的是,波束间的通信业务通常是非均匀的。

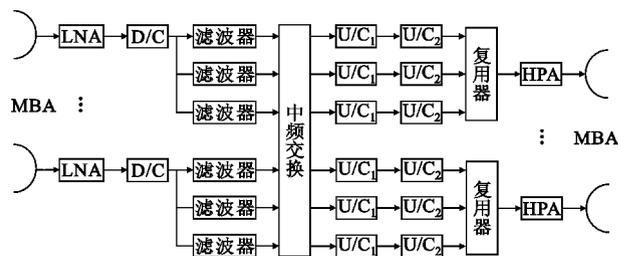


图 1 模拟弯管式 MBA 载荷结构示意图

Fig. 1 Analog bent pipe multi-beam antenna (MBA) payload

2.2 数字信道化载荷

为了克服 MBA 载荷技术的缺点,数字信道化(Digital Channelizer, DC)载荷技术被提出。该载荷技术可通过实际通信业务流量从空间和时间上动态匹配波束带宽。图 2 给出了基于 MBA 的 DC 载荷结构示意图。图中 MCD(Multi-Channel Demultiplexer)实现多路信号的解复用, MCM(Multi-Channel Multiplexer)实现多路信号的复用, A/D 代表模数转换器, D/A 代表数模转换器。由图 2 可知, DC 位于 MBA 系统的中心,其主要包括模数/数模转换器、多波束信道去复用/复用器和数字信道化器。DC 可将输入波束的任何信道路由至输出波束的任何信道,同时可自动调整信道的绝对和相对增益。基于 MBA 的 DC 载荷技术与模拟弯管式 MBA 载荷技术的明显区别在于:前者的信号交换在数字域中实现,且交换频带可灵活变化;后者的信号交换在模

拟域中实现,交换带宽通常为一个子频带带宽。基于 MBA 的 DC 载荷技术陆续在一些商用和军用卫星通信系统中得到应用,如亚洲蜂窝卫星通信系统(ACeS)、“瑟拉亚”(Thuraya)系统、移动目标用户系统(MUOS)和宽带全球卫星通信系统(WGS)。

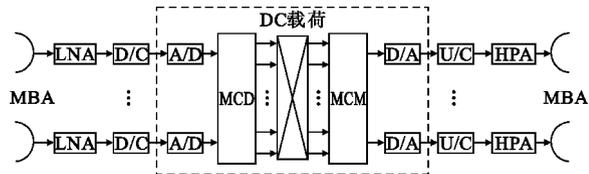


图 2 基于 MBA 的 DC 载荷结构示意图

Fig. 2 Digital channelizer (DC) based on MBA payload

当采用灵活的行波管功率放大器时,DC 载荷技术可在有限增加系统开销的前提下提升卫星有效容量。分析表明,相比于 MBA 载荷,基于 MBA 的 DC 载荷技术在典型业务场景下可提升 10% ~ 30% 的系统容量^[3],在业务需求变化剧烈的场景下可成倍提升系统容量^[4]。并且,分单元可重构的 DC 载荷设计可提供标准的输入输出接口。

2.3 数字信道化波束成形载荷

图 3 给出了数字信道化波束成形(Digital Channelizer Beamformer, DCB)载荷结构示意图,图中 BFN(Beamforming Network)表示波束成形网络。相比于 DC 载荷,DCB 载荷添加了控制相控阵天线的波束成形网络。DCB 载荷接收来自相控阵天线的模拟输入,经过处理后为发射相控阵天线提供模拟输出。DCB 载荷可为每个激活的接收和发射信道配置单独的波束,也可基于业务需求和潜在干扰波束位置自适应地产生信道波束偏转权重,从而动态地改变每个波束的带宽、位置和形状。因此,DCB 载荷可减少同频干扰和增加有效信扰比。同时,DCB 载荷可通过配置数字波束成形权值来补偿由模拟多波束相控阵天线相位幅度响应变化带来的损耗。

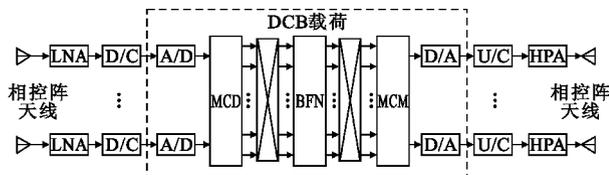


图 3 DCB 载荷结构示意图

Fig. 3 Digital channelizer beamformer (DCB) payload

DCB 载荷技术一般应用于移动卫星业务(Mobile Satellite Service, MSS),该业务的需求变化剧烈,

并且该业务渴望的天线性能一般超过了实际可配置模拟 MBA。为了支持高有效容量需求的 MSS 系统, Thuraya 和国际移动卫星 (Inmarsat-4) 系统都配置了 DCB 载荷。

2.4 全再生处理载荷

图 4 给出了全再生处理 (Fully Regenerative Processor, FRP) 载荷结构示意图, 图中 MCD³ (Multi-channel Demultiplexer, Demodulator, Decoder) 实现对多路信号的解复用、解调和解码, MCEM² (Multi-channel Encoder, Modulator, Multiplexer) 实现对多路信号的编码、调制和复用。FRP 星上处理系统首先对进入 MBA 的上行模拟输入信号采样, 然后通过数字频分分路技术将每路输入信号转变为单路单载波信号, 最后对每路单载波信号进行解调解码, 从而恢复出上行链路的原始信息流。FRP 载荷的核心部件是快速分组交换器 (Packet Switch)。该交换器通过对数据的高效分组和搬移来获得统计复用增益。相比于 DC 载荷和 DCB 载荷, FRP 载荷的分组交换器可支持至少 25 倍于 DC 载荷和 DCB 载荷的数字交换带宽。此外, 当图 4 中的模拟 MBA 换成相控阵天线时, FRP 星上处理系统在频分分路操作后同样可进行数字波束成形。

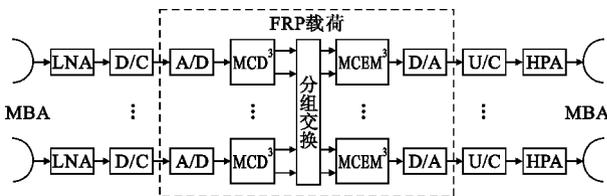


图 4 FRP 载荷结构示意图

Fig. 4 Fully regenerative processor (FRP) payload

在 FRP 载荷中, 上行信道的编码调制方案可与下行信道不同。并且, FRP 载荷的上行信道和下行信道也可采用不同的链路协议。然而, 为了最小化载荷体积、重量和功率 (SWaP), MCD³ 和 MCEM² 均采用 ASICs 实现。这将导致 FRP 星上处理系统不够灵活, 如: 不能支持使用不同于 FRP 载荷通信协议的上行或下行终端。Iridium 和 Spaceway 两种商用卫星通信系统使用了 FRP 载荷。

2.5 软件定义载荷

为了兼具灵活性和高有效容量性, 基于软件无线电 (Software defined Radio, SDR) 的软件定义载荷 (Software Defined Payload, SDP) 被提出。SDP 能够灵活地实现卫星载荷的重构, 以便支持卫星上下行

链路协议中关于信号处理、交换以及终端接入等需求的变化。在现阶段, 无论从设备的体积、重量还是功耗上来说, 实现 SDP 都要花费巨额资金。虽然随着器件工艺和空间数字处理技术的发展, 实现 SDP 的代价和风险在逐步降低, 但 SDP 的最终实现仍需如下一些技术的发展: ASIC 技术、DSP 和 FPGA 技术、高速低功率数模和模数转换器技术、高速串行链路技术、高密度模块化封装技术和架构/算法的跨层设计和优化技术。图 5 给出了 SDP 载荷处理流程和架构^[2], 图中 GPP (General Purpose Processor) 表示通用处理器, GPU (General Purpose Processor) 表示图形处理单元。

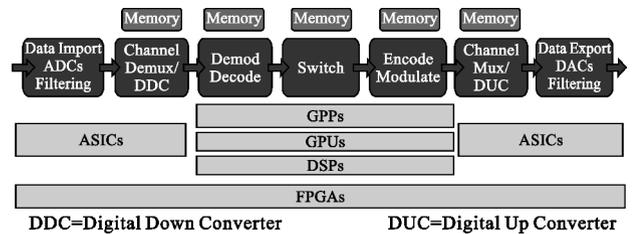


图 5 SDP 载荷处理流程和架构

Fig. 5 Software defined communications payload processing flow and architecture

为了获取星上 SDR 的专业知识, 2012 年美国宇航局 (NASA) 将航天通信与导航 (SCaN) 试验台发送到国际空间站。SCaN 试验台是采用新一代 SDR 技术的先进综合通信实验设备, 可以在空间进行先进的通信、组网和导航技术研究、试验和验证。SCaN 试验台上装有 3 部 SDR 电台, 这些电台能采用信号处理硬件 (如 FPGA、DSP) 和通用处理器进行波形重构。通过 SCaN 试验台, NASA 希望为确定和发展星上 SDP 载荷积累经验。

2.6 小结

在 MBA、DC、DCB、FRP 和 SDP 5 种卫星载荷中, 系统容量依次递增, 系统实现复杂度也依次递增; 但在系统灵活性方面, SDP 最大, 其次依次是 DCB、DC、FRP 和 MBA。

3 先进物理层传输技术

为了进一步提升卫星通信系统的容量、可用性和灵活性, 很多先进的物理层传输技术被提出应用于卫星通信系统。以下介绍卫星通信系统物理层领域的一些技术发展。

3.1 编码调制技术

近年来, 许多新一代卫星通信传输标准纷纷在

信道编码模块中用低密度奇偶校验码(Low-Density Parity-Check Code, LDPC)^[5]取代 Turbo 码。其原因如下:

(1) 相比于 Turbo 码, LDPC 码不需通过采用很长的交织器来获得好的纠错性能;

(2) LDPC 码具有逼近香农极限的性能, 且几乎可适用于所有信道;

(3) LDPC 码描述简单, 硬件实现复杂度较低;

(4) LDPC 码可与其他码组成级联码。如在欧洲数字电视卫星广播标准(DVB-S2)中, LDPC 码与 BCH 码组成了内外级联码。LDPC 码由于其优异的性能表现正逐步成为卫星通信系统编码技术中的关注热点^[6]。

另一方面, 为了提高卫星频谱效率, 卫星通信系统在信号传输中越来越多考虑幅度和相位相结合的调制方式, 如 MQAM 和 MAPSK。在相同平均功率条件下, MQAM 比 MPSK 的误码率低。但传统的矩形 MQAM 信号存在较多幅度。当通过卫星非线性转发器时, 那些离饱和点较远的星座点的功率效益不高, 那些接近饱和点的星座点非线性失真严重。与传统 MQAM 相比, MAPSK 是一种星座形状呈圆形, 圆周个数较少的幅度相位调制方式。在同进制和相同误码率下, MAPSK 所需功率比 MPSK 小, 且 APSK 调制的幅度比 QAM 调制的幅度要少。APSK 调制方式便于实现变速率调制, 且易于对转发器的非线性进行补偿。目前, MQAM 和 MAPSK 调制方式已被多种卫星数字视频广播商业标准所采用。同时, 为了获得更高频谱效率, 高阶 QAM 和 APSK 调制(如 256QAM、64APSK)在卫星通信系统中得到了广泛研究。

此外, 随着通信技术的不断发展, 人们逐渐接受将编码与调制作为一个整体来考虑以提高通信系统性能的设计。基于此, 文献[7]研究了网格编码调制(Trellis Coded Modulation, TCM)技术在 W 频段低轨卫星通信系统下的应用; 文献[8]指出比特交织编码调制(Bit-interleaved Coded Modulation, BICM)技术可提升 DVB-S2 系统频谱效率。在加性白高斯噪声信道条件下, TCM 通过信号集合扩展、子集划分标识, 以及联合编码和调制设计, 使得在不增加带宽和不降低有效信息传输速率的前提下提高约 3 ~ 6 dB 的编码增益。BICM 通过在编码和调制之间增加比特交织器来获得星座分集的提高, 从而改善衰落信道下编码调制性能。然而, 研究发现, BICM 在加性白高斯噪声信道条件下性能不理想。为此,

BICM-ID(BICM with Iterative Decoding)技术^[9]应运而生。BICM-ID 将经过译码器后产生的外信息反馈到解调端重新加以利用, 从而借助该外信息进一步修正解调器端的比特度量值, 然后将该度量值输入到下一轮的译码迭代当中进行译码。如此循环, 从而提升 BICM 方案的性能。为了进一步提升系统性能, LDPC 等高效信道编码可加入 BICM 和迭代系统结构中。对于卫星通信系统来说, 编码调制技术为进一步优化卫星系统性能提供了研究的新天地。

3.2 多载波技术

随着卫星通信宽带化发展, 以正交频分复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)为代表的多载波技术被用来提高卫星通信系统抗频率选择性衰落性能和带宽利用率。OFDM 的基本思想是把高速数据流通过串并变换成多路并行传输的低速数据流, 从而解决频率选择性衰落问题。但相比于地面通信系统, 卫星通信系统中 OFDM 的峰均比问题更加严重, 这将大大降低卫星转发器的效率, 故卫星通信系统需结合信道编码技术和非线性失真补偿技术来克服峰均比问题。同时, 为了进一步改进 OFDM 性能, 编码 OFDM(COFDM)、频带分段传输 OFDM(BTS-OFDM)和时域同步 OFDM(TDS-OFDM)等被提出用于卫星通信系统。特别地, 文献[10]提出在卫星通信系统中使用恒包络 OFDM(CE-OFDM)技术。该技术是恒包络调制技术与传统 OFDM 的结合, 它将 OFDM 信号调制到恒包络载波信号的相位中, 使 CE-OFDM 峰均比为 0, 从而有效解决 OFDM 系统高峰均比问题。CE-OFDM 可看作对 OFDM 信号进行二次变换。图 6 给出了 CE-OFDM 的基带模型。

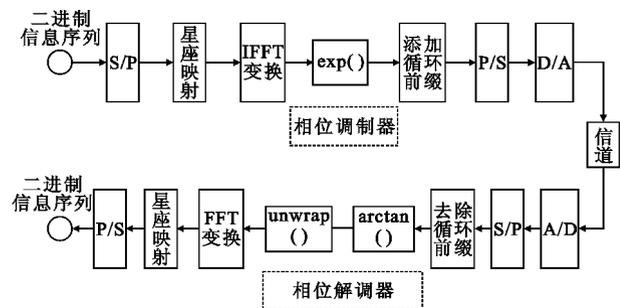


图 6 CE-OFDM 基带模型

Fig. 6 Baseband model of CE-OFDM

近年来, 随着小波理论体系的不断发展与完善, 小波多载波传输技术也逐步引起学者注意并开展研究。其中, 小波包多载波传输方式是一种基于小波

包变换的多路传输技术。该技术具有抗频率选择性衰落和抗干扰能力,其带宽利用率和功率谱密度带外衰减性能优于 OFDM,且其峰均比抑制算法较 OFDM 更加灵活多样。同时,由于小波包树结构的多样性,小波包多载波传输方式可以非均匀划分信道。这不但可实现卫星上行和下行链路的非对称传输,而且可根据用户情况实现信道非均匀分配。然而,小波包多载波传输方式依赖于小波和消失矩的选择设计,其对同步干扰较 OFDM 敏感,同步过程较 OFDM 复杂。

自小波包多载波传输方式提出以来,其已被 DVB-H 和 DVB-T 标准选为技术方案。同时,美军空军实验室已于 2003 年研制出小波包多址通信测试平台,正式对小波包调制系统在实际中的应用进行测试。此外,日本名古屋大学和加拿大国家通信研究中心都提出将小波包多载波传输方式应用于卫星通信系统。

3.3 多天线技术

为了缓解卫星通信业务急剧增长和频带亟待增加的窘境,多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)技术引起了卫星通信研究者的广泛关注^[11]。MIMO 技术可在不增加卫星端或地面端发射功率和使用带宽的情况下,仅通过增加接收与发送天线的数量来提高系统容量和改善系统误码率性能。目前,有 3 种可行的卫星 MIMO 传输构建方式被提出^[12],即多极化方式^[13-14]、多地面站方式和多颗卫星方式。这 3 种方式均适用于星上透明弯管载荷和星上再生处理载荷。

在多极化方式中,单颗卫星和单个地面站利用不同极化方式的天线在 L、S 和 C 频段构建 MIMO 传输。然而,为了保证天线极化方式的正交性,卫星和地面站所能装备的天线很有限,一般只能装配 2 根。并且,由于所装备天线间的距离较近,不同星地链路间的信道容易受到影响,故该方式在 Ku 和 Ka 等高频段上不适用。考虑到多极化方式下信道间的独立性十分有限,故该方式下获得的性能增益有限。

在多地面站方式中,一颗卫星装载多幅天线,每个地面站装载一副天线。为了充分发挥 MIMO 传输技术优势,多个地面站间的相互间隔应足够大,一般在几十公里的距离。相比多极化方式,多地面站方式可通过设置多根天线和多个地面站来获得更大的 MIMO 复用和分集增益。并且,多地面站方式中多个地面站可分散分布,这将增大系统抗军事打击的能力。

在多颗卫星方式中, MIMO 传输通过多颗卫星和一个或多个地面站构建。多颗卫星间的距离应足够大,而地面站间的距离可相对缩短。在这种方式下,卫星系统可获得最大的系统容量。但由于卫星数量的增加,系统的复杂度和成本将大幅增大。

当前卫星 MIMO 传输系统的研究尚处于起步阶段,很多关键技术需解决,如信道估计技术、分集合并接收的信号处理技术、信号到达同步技术、空时编码技术、卫星 MIMO 系统容量与增益理论分析等。

3.4 链路自适应技术

在卫星通信系统中,链路自适应技术是指系统根据卫星无线信道在时间、频率和空间等维度上的变化,动态地调整发射机和接收机传输参数,从而使系统在维持不同业务的传输质量的前提下,进一步提高系统平均频带利用率,使无线信道资源得到最大限度的利用。

自适应编码调制技术(Adaptive Coding and Modulation, ACM)是克服信道时变性和补偿链路损耗的一项重要链路自适应技术^[15-16]。ACM 可根据接收端反馈的接收信道状况,动态调整发射端编码速率与调制方式。同时,ACM 可根据不同接收气候环境提供不同编码码率和调制方式。随着近年来编码调制技术的深入发展,自适应网格编码调制、Turbo 码自适应编码调制技术、LDPC 码自适应编码调制技术和自适应比特交织编码调制技术等得到越来越多的研究。研究表明,结合 AMC 和高效编码调制方案可进一步提升卫星信道容量,提高卫星传输质量。

随着卫星通信新理念和新技术的快速发展,卫星通信系统链路自适应技术也体现出不同的研究特征,如:如何有效地针对物理层、链路层以及应用层的不同特点,并参考不同的服务质量需求合理设计有效的跨层方案和自适应体系;联合多载波技术、多天线技术、先进信道编码技术等进行联合自适应方案设计;考虑链路自适应的资源分配策略。

4 先进天线技术

天线作为卫星通信设备中的前端部件,对卫通质量起着至关重要的作用。随着卫通的发展及技术的进步,传统的卫通天线形式和功能在一定程度上跟不上发展的需求。现代卫通天线技术正朝着如下几个主要方向发展:小型化、宽频带天线技术;相控阵天线技术;智能天线技术;可重构天线技术。

4.1 小型化、宽频带天线技术

随着大规模集成电路与空间技术的发展,各种电子设备都在朝着小型化与微型化方向研制,这使得天线往往成为系统中最笨重的部位而显露出来,因此要求研制出能与小型化设备相适应的小型天线。天线小型化主要从加载技术、使用特殊材料基片、采用特殊形式、优化天线外形结构和利用宽带匹配网络等方面来实现。如超短波卫通天线可利用宽带匹配网络来降低天线高度,采用有源匹配网络来提高天线性能。

同时,为了支持多种应用需求,卫通终端往往需要具有多频段工作的能力,从而满足多种卫星通信的需求。传统的卫通终端往往通过配置多根天线来实现多频段工作能力。然而,为了小型化设备,卫星终端应尽量减少天线数量。因此,卫通天线需要更宽的工作带宽。宽频带天线技术可通过两种方式来实现,一是对传统天线进行改进设计,二是研究新的天线形式。如对于偶极子或单极子天线,可采用附加宽带匹配网络、振子变形设计和周期性设计等方法实现宽频带性能;对于微带天线,展宽带宽可采取降低等效谐振电路 Q 值、增加厚度、降低介电常数等手段。此外,分形天线、TEM 喇叭天线和 Vivaldi 天线是近年来研究较多的新形式天线。具体地,分形天线具有自相似性,可实现多频段性能;TEM 喇叭天线和 Vivaldi 天线具有渐变结构,可实现宽频带性能。

4.2 相控阵天线技术

相控阵天线是由许多辐射单元组阵所构成的定向天线,各单元的幅度激励和相位关系可控。典型的相控阵天线利用数控移相器改变天线阵元的相位分布实现波束的快速扫描,即电子扫描。用于移动卫星终端的相控阵天线有两种形式:采用一维相控阵体制的低轮廓相控阵天线;采用全相控阵体制的共形相控阵天线。低轮廓相控阵天线只在俯仰面利用相控阵扫描,而方位面采用传统的机械扫描;共形相位阵天线可安装在具有复杂表面的各种载体上,不影响载体的空气动力性能,并可充分利用其表面积和增加天线有效孔径面积。

星载相控阵天线按照波束功能的不同,可分别划分为区域覆盖相控阵天线、宽角扫描区域相控阵天线和有限区域扫描相控阵^[17]。星载相控阵天线的频段正在向高频段扩展,Ku 以下频段相对比较成熟,Ka 频段是目前国内外正在快速发展的领域,而

毫米波段、亚毫米波段乃至丝米波段是进一步发展的领域。目前,光控相控阵天线技术、相控阵天线的抗干扰技术、扫描平面发射阵技术和相控阵新型器件技术等得到越来越多关注。

4.3 智能天线技术

智能天线技术通过调整天线阵列中各个天线单元上的可编程器件来改变各个天线单元的权值,从而产生定向的空间波束。产生的天线波束的主波束对准期望信号方向,旁瓣或零陷对准干扰信号,有效接收期望信号,并消除干扰。智能天线相位控制和幅度控制在数字电路部分实现,而不采用类似相控阵天线的射频移相器和衰减器。

智能天线技术是在软件无线电基础上提出的天线设计新概念,是数字多波束形成技术与软件无线电完美结合的产物。智能天线技术除具有相控阵天线跟踪速度快、精度高的优点外,还可实现多波束、自适应抗干扰等功能,并可利用具体安装条件进行灵活布阵。智能天线的实质是自适应天线阵列,采用自适应算法和数字波束形成技术。

4.4 可重构天线技术

随着卫星通信的飞速发展,对天线的要求也越来越高。一方面,需要使天线能够工作在多个频带,具有多种工作模式并具有良好的传输性能。另一方面,又要减轻天线的重量、减小天线体积并降低成本。正是在这种需求的推动下,“可重构天线”的概念被提出^[18],它是采用同一天线或天线阵,通过动态改变其物理结构或尺寸,使其具有多个天线的功能。可重构天线相当于多个天线共用一个物理口径,这样有利于降低通信系统的整体成本、减轻重量、减小雷达散射截面,而且可以避免存在于多个天线之间的电磁兼容问题。

可重构天线按功能可分为频率可重构天线(包括实现宽频带和实现多频带)、方向图可重构天线、极化可重构天线和多电磁参数可重构天线。通过改变可重构天线的结构可以使天线的频率、方向图、极化方式等多种参数中的一种或几种实现重构,这样可以通过切换天线不同的状态使天线具有多种工作模式,有利于在传输中实现多种有效的分集。

可重构天线作为一种新型的天线,已取得了很大的成果。然而,以下几个方面有待我们进行深入的探索与研究:可重构天线的体系结构和设计方法;开发水平更高的可重构天线仿真工具,探索更有效的优化方法;研制开关特性优良、大功率的射频开关。

5 更高频段卫星通信技术

未来的卫星通信将向着极高频(Extremely High-frequency, EHF)甚至激光频段发展。由于拥有极宽的带宽资源,更高频段卫星通信技术可解决频谱资源日益拥挤的问题,进一步提高系统容量。并且,由于天线尺寸小、波束窄和发射功率小等特点,更高频段卫星通信技术可获得更好的抗干扰、低截获和机动性等特性。

在30~300 GHz的 EHF 频段上,研究的重点集中在35 GHz、94 GHz、130 GHz和220 GHz等几个“窗口”频率。与 EHF 其他频点相比,这些“窗口”频率的大气损耗衰减较小。并且,随着器件、技术、设备等方面的基础日趋成熟,基于 Q/V 频段(40~75 GHz)和 W 频段(76~110 GHz)的 EHF 卫星通信系统已被应用^[19]。美国的军事战略战术中继卫星通信(Milstar)和先进极高频(Advanced Extremely High Frequency, AEHF)卫星是 Q/V 频段卫星通信系统的典型代表;意大利太空总署的 DAVID(Data and Video Interactive Distribution)任务和 WAVE(W-band and Verification)项目是 W 频段卫星通信系统^[20-22]的典型代表。当然,EHF 卫星通信系统还存在许多待解决问题,如相位噪声过大问题、功率放大器的非线性问题等。

卫星通信高码率传输需求促进了激光卫星通信技术的应用。激光卫星通信技术使用激光进行数据传输,主要用于卫星之间、卫星与地面站或飞机之间的通信。美国、欧洲和日本已从概念和单元技术等方面对激光卫星通信进行了大量研究,目前已进入应用性测试阶段。相比于微波卫星通信系统,激光卫星通信系统具有功耗低、体积小、重量轻、保密性好、数据传输率高、抗干扰能力强、建造和维护费用较低等优点。虽然激光卫星通信技术具有很多优点,但其一些关键技术还有待于进一步研究^[23],如:高功率、高速率激光调制发射技术;高灵敏度、复杂环境下的光信号接收技术;高精度捕获、跟踪和瞄准(ATP)技术;发射接收光学系统及基台技术;大气信道研究。

6 结束语

发展卫星通信新技术是进一步提高卫星通信系统容量和服务质量的重要手段。本文归纳总结了星

上载荷、物理层传输、卫星通信天线和更高频段卫星通信等新技术的现状,并指出了这些新技术的未来发展趋势。充分理解和掌握这些新技术对于推进我国卫星通信产业的发展具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] Clarke A C. Extra-terrestrial relays[J]. Wireless World, 1945(2):305-308.
 - [2] Butash T C, Marshall J R. Leveraging digital on-board processing to increase communications satellite flexibility and effective capacity[C]// Proceedings of 2010 International Communications Satellite Systems Conference. Anaheim, California: AIAA, 2010:1-10.
 - [3] Anzalchi J, Couchman A, Gabellini P, et al. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems[C]// Proceedings of 2009 International Communications Satellite Systems Conference. Edinburgh, Scotland, UK: AIAA, 2009:1-8.
 - [4] Rusch R. Where is Ka-band service headed[C]// Proceedings of 15th Ka and Broadband Communications Conference. Cagliari, Italy: [s. n.], 2009:1-5.
 - [5] Gallager R G. Low density parity check codes[J]. IRE Transactions on Information Theory, 1962(IT-8):21-28.
 - [6] Li H, Gao Z, Pan W, et al. Partial decode-and-forward of LDPC codes for on-board processing satellite platform[C]// Proceedings of 2013 International Communications Satellite Systems Conference. Florence, Italy: AIAA, 2013:1-8.
 - [7] El-Awadi R, Eldin M A B, Gergis L F. Performance of concatenated turbo-trellis coded modulation for mobile satellite channels[C]// Proceedings of 18th National Radio Science Conference. Mansoura, Egypt: IEEE, 2001:369-377.
 - [8] Alagha N, Gaudenzi R D, Ginesi A. Physical layer enhancements beyond DVB-S2[C]// Proceedings of International Communications Satellite Systems Conference. Nara, Japan: AIAA, 2011:1-11.
 - [9] Li X, Ritcey J A. Trellis-coded modulation with bit interleaving and iterative decoding[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1999, 17(4):715-724.
 - [10] Thompson S C, Ahmed A U, Proakis J G, et al. Constant envelope OFDM[J]. IEEE Transaction on Communications, 2008, 56(8):1300-1312.
 - [11] Arapoglou P D, Liolis K, Bertinelli M, et al. MIMO over satellite: a review[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2011, 13(1):27-51.
 - [12] 刘贤, 刘爱军, 潘小飞, 等. MIMO 传输技术在卫星移动通信系统中的应用[J]. 军事通信技术, 2013, 34(1):96-100.
- LIU Xian, LIU Ai-jun, PAN Xiao-fei, et al. Application of MIMO Technique in Satellite Mobile Communications

- Systems[J]. Journal of Military Communications Technology, 2013, 34(1): 96-100. (in Chinese)
- [13] Kobayashi K, Oka T, Nakamoto N, et al. Poly-polarization multiplexing scheme for satellite communications [C]//Proceedings of 2012 International Communications Satellite Systems Conference. Ottawa, Canada: AIAA, 2012:1-5.
- [14] Yofune M, Webber J, Yano K, et al. Performance evaluation of enhanced poly-polarization multiplexing scheme for satellite communications [C]// Proceedings of 2013 International Communications Satellite Systems Conference. Florence, Italy: AIAA, 2013:1-5.
- [15] Shewan G. Alternative measure of performance for satellite links employing adaptive coding and modulation [C]// Proceedings of 2012 International Communications Satellite Systems Conference. Ottawa, Canada: AIAA, 2012:1-5.
- [16] Arnau J, Mosquera C. Open loop adaptive coding and modulation for mobile satellite return links [C]// Proceedings of 2013 International Communications Satellite Systems Conference. Florence, Italy: AIAA, 2013:1-12.
- [17] 阎鲁滨. 星载相控阵天线的技术现状及发展趋势 [J]. 航天器工程, 2012, 21(3): 11-17.
YAN Lu-bin. Technology status and developing trends of satellite phased array [J]. Spacecraft Engineering, 2012, 21(3): 11-17. (in Chinese)
- [18] Schaubert D, Farrar F, Hayes S, et al. Frequency-agile, polarization diverse microstrip antennas and frequency scanned arrays; US, Patent 4367474 [P]. 1983-01-04.
- [19] 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.
- [20] Lucente M, Stallo C, Rossi T, et al. Analysis and design of a point-to-point radio link at W-band for future satellite telecommunication experiments [C]//Proceedings of 2011 IEEE Aerospace Conference. Rome, Italy: IEEE, 2011:1-10.
- [21] Fantinato A, Conci N, Rossi T, et al. Performance analysis of W-band satellite HDTV broadcasting [C]// Proceedings of 2011 IEEE Aerospace Conference Proceedings. Rome, Italy: IEEE, 2011:1-12.
- [22] Sacchi C, Rossi T, Ruggieri M, et al. Efficient waveform design for high-bit-rate W-band satellite transmissions [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(2): 974-995.
- [23] 付强, 姜会林, 王晓曼, 等. 空间激光通信研究现状及发展趋势 [J]. 中国光学, 2012, 5(2): 116-125.
FU Qiang, JIANG Hui-lin, WANG Xiao-man, et al. Research status and development trend of space laser communication [J]. Chinese Optics, 2012, 5(2): 116-125. (in Chinese)

作者简介:



花江(1973—),男,四川成都人,高级工程师,主要研究方向为航空通信技术;

HUA Jiang was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1973. He is now a senior engineer. His research concerns aeronautical communication.

王永胜(1979—),男,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为通信工程;

WANG Yong-sheng was born in Yuncheng, Shanxi Province, in 1979. He is now a graduate student. His research concerns communication engineering.

喻火根(1984—),男,江西高安人,2013年于电子科技大学获通信与信息系统专业博士学位,主要研究方向为无线通信。

YU Huo-gen was born in Gao'an, Jiangxi Province, in 1984. He received the Ph. D. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2013. His research concerns wireless communication.

Email: yuhuogen@163.com