

文章编号: 2095-4980(2015)05-0736-04

空间通信中调制与编码热点技术探析

闫 峥, 王梦源

(中国空间技术研究院 航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘 要: 深空探测、卫星导航及卫星遥感技术的迅猛发展对空间通信的数据处理速率和抗干扰性能提出了更高要求。因此, 更高的频谱利用率和抗强干扰能力是未来空间通信的发展方向。本文分析了空间通信中制约信息传输性能的主要因素, 着重对近年来空间通信中调制及编码热点技术的工作原理、性能及应用情况进行描述, 并针对复杂电磁环境下新型调制与编码技术的联合应用提出了解决方案。分析表明, 联合应用方案可以同时提高频谱利用率和抗干扰能力。

关键词: 正交频分复用; 极化码; 低密度奇偶校验码; 最大似然概率

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0736

Hot technology analysis of modulation and coding in space communication

YAN Zheng, WANG Mengyuan

(Space Star Technology Co., Ltd., China Academy of Space Technology, Beijing 100086, China)

Abstract: With the rapid development of deep space exploration, satellite navigation and satellite remote sensing technology, higher data processing rate and stronger anti-interference performance are required in space communication. Therefore, communication with higher frequency spectrum utilization and stronger anti-interference will be the brilliantly prominent consideration in the future space environment. In this paper, the restriction factors on the performance when transmitting data are analyzed firstly, then the principle, the performance and application of new modulation and coding technology are explained in detail. Finally, a scheme that combines novel modulation and coding technology is proposed under complex electromagnetic environment. By analysis, it is shown that the combined scheme can improve the spectrum utilization and anti-interference performance.

Key words: Orthogonal Frequency Division on Multiplexing(OFDM); polar code; Low Density Parity Check code(LDPC); Maximum a Posterior(MAP)

空间通信在民用、军事和各行业领域中都被广泛应用, 其通信环境复杂多变, 主要有几个特点: 传输距离远, 覆盖地域广, 电磁环境较复杂, 频带资源日趋紧张, 在卫星通信网络中卫星以及各终端的移动速度较高等。这些特点尤其是远距离信号传输造成了巨大的信号能量损耗和较大的传输延迟。同时, 不同地域的天气情况、地形地貌和复杂电磁信号干扰都对信息传输系统的抗干扰能力和整体性能提出了极高的要求。卫星及各终端的高速移动产生的多普勒频移和码间干扰也是卫星通信中需要解决的关键问题。频带资源日趋紧张, 要求空间信息调制技术必须有更高的频谱利用率, 这也成为制约信息传输性能的重要因素。因此, 在这种通信环境下, 空间通信中的抗干扰技术和信息调制技术将变得至关重要。

1 空间通信的信道编码技术研究状况

在信道编码技术方面, Turbo 码和 LDPC 码是近十几年来研究热点。1993 年 Berrou C 等人提出了 Turbo 码^[1], 随后 Robetson 又对 Turbo 码的性能进行了深入研究。Turbo 码最初采用并行级联卷积码的方法, 随后又出现了串行级联卷积码的方法。Turbo 码巧妙地将卷积码和随机交织器结合, 在实现随机编码的同时, 通过交织器实现了由短码构造长码。其中, 以并行级联方法构造的 Turbo 码的编码器和译码器结构如图 1 和图 2 所示, 其性

能非常逼近于香农极限。国际上 Turbo 码被 DVB-RCS(通过卫星回传信道的数字视频广播)标准采用, 并且 3GPP(第 3 代合作伙伴计划)组织已将 Turbo 码作为第 3 代移动通信系统的信道编码方案之一。Turbo 码的基于最大似然概率(MAP)译码的串行迭代算法决定了其吞吐率有限, 对于低码率的长码需要多路的分量译码器, 其实现复杂度成为高速空间通信中应用的瓶颈。

LDPC 码是 Gallager 于 1962 年提出的, 但受当时计算机水平和硬件资源的制约, LDPC 码没有得到推广。1995 年 Mackay 和 Neal^[2]发现 LDPC 码的性能在某些应用场合几乎超过了 Turbo 码, 于是 LDPC 码重新成为了研究热点。到 1998 年, Luby, Mitzenmacher^[3]等人提出了构造不规则二元 LDPC 码的方法, 这相对于 Gallager 提出的规则 LDPC 码性能有了较大改进。目前 LDPC 码已经写入到 3G 移动通信的 Wimax 标准中。随着计算机技术和大规模可编程逻辑器件的迅猛发展, LDPC 码的研究热点已经转向了基于 FPGA 的硬件实现术, 其研究重点是设计更低的实现复杂度和并行处理技术, 以在有限的片上资源实现更高的吞吐率和相当的纠错性能。因此, LDPC 码在高速空间通信中具有良好的应用前景。

Turbo 码和 LDPC 码的技术已经趋于成熟, 虽然实际应用中逼近香农的极限信道容量, 但理论上还无法证明这 2 种编码方法可以达到香农极限, 并且 Turbo 码和 LDPC 码要么译码复杂度较高, 要么编码复杂度较高, 所以在有限资源内的性能提升已比较困难。Polar 码是 Arikan 于 2009 年提出的^[4-5], Polar 码是一种线性分组码, 也是通过信息比特与生成矩阵相乘得到码字。采用较低复杂度的连续取消(Successive Cancellation, SC)译码就可以达到二进制离散无记忆信道(Binary Input Discrete Memoryless Channel, B-DMC)的信道容量。Polar 码的核心思想就是“信道极化”现象, 即随着编码长度的不断增大, 通过信道合并和拆分算法将信道极化成“有噪”的比特信道和“无噪”的比特信道, 其信道合并与拆分的原理如图 3 所示。该现象可以很自然地归纳出 Polar 码的编码方法, 即在高可靠性地“无噪”比特信道中传输信息比特, 在“有噪”的比特信道中传输固定的冗余比特(通常设置为“0”比特)。目前关于 Polar 码的研究在理论和实际应用上都有了一些突破性成果, 而其在抗干扰方面的应用正是目前信道编码方向的研究热点^[6-7]。

2 空间通信的新型调制技术研究状况

空间信息传输的性能很大程度上受制于信息系统的调制方式。由于空间通信的频谱资源日趋紧张, 同时卫星通信领域内卫星带宽资源也是相当昂贵的, 这就要求先进的调制技术不仅要有良好的抗干扰性能, 还要保证较高的频谱资源利用率。

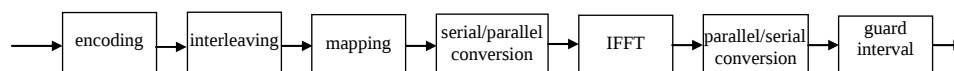


Fig.4 Diagram of generating OFDM signal
图 4 OFDM 信号生成框图

正交频分复用(OFDM)技术是一种高效的多载波调制技术, 其主要思想是将信道分成若干正交子信道, 将高速数据信号转换成并行的低速子数据流, 调制到每个子信道上进行传输。多径信道下的 OFDM 调制采用图 4 所

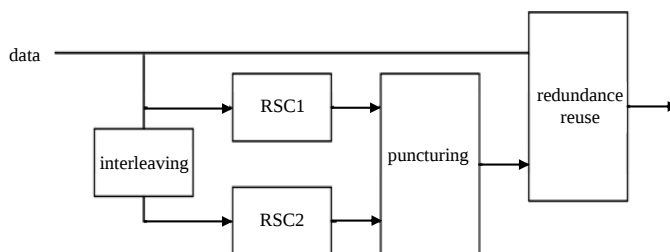


Fig.1 Diagram of turbo encoder
图 1 Turbo 编码器结构框图

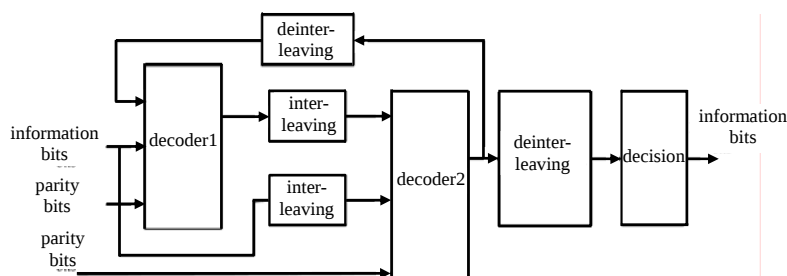


Fig.2 Diagram of turbo decoder
图 2 Turbo 译码器结构框图

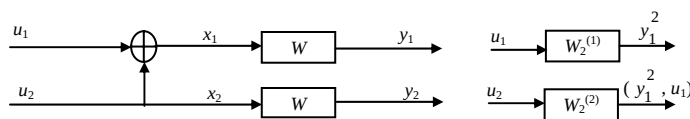


Fig.3 Channel combining and splitting operation for polar codes
图 3 Polar 码的信道合并与拆分原理图

示的结构,发射端对输入的数据编码、交织、映射、串并转换后对调制的数据进行快速傅里叶逆变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT),最后插入保护间隔即可得到 OFDM 调制信号。OFDM 技术具备频谱利用率高,抗多径衰落能力和消除码间干扰能力强的特点,非常适用于高速无线通信,已被列入 4G 无线通信系统解决方案。

在日趋复杂的电磁环境中,当 OFDM 调制信号的正交性在传输过程中被干扰和破坏时,其传输性能将急剧恶化。因此,基于非正交思想的调制技术可以在频谱利用率和抗干扰能力之间取得更好的平衡。Viterbi 最早于 1990 年提出利用非正交的低速率卷积码来取代传统的正交扩频码,获得了比码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)正交码更佳的理论容量。2004 年, XIAO Ma 和 LI Ping^[8]指出,在中低阶调制的情况下,非正交调制技术的仿真性能可以突破传统正交调制的理论极限。近几年电子科技大学 XIAO Yue, DAN Lilin 等人开展了基于非正交调制的分层高阶编码技术的研究,其结构框图如图 5 所示。国内对于非正交调制研究尚处于起步阶段,仅有一些探索型的算法提出,能够应用于空间通信的高阶非正交调制技术研究成果较少。

速率兼容调制(Rate Compatible Modulation, RCM)技术是一种速率灵活的新型调制方式,在与信道自适应的过程中不需要提供信道信息,并且可以连续地调整速率,实现无缝自适应,具有逼近信道容量的潜力。RCM 技术于 2011 年提出,是一种比特到符号的映射,首先将来自上层的数据包分割成长度为 N 的比特块,然后基于映射矩阵生成符号,其生成的符号

直接用于调制信号幅度。基于 RCM 的技术特点,一些学者研究了调制技术的速率兼容算法,对未来移动通信技术中的多速率兼容问题的解决起到了一定的推进作用^[9-12]。

为了使编码和调制方式具有自适应的特性,就必须使发送速率随着信道容量变化而变化,这样可以充分地利用信道容量,在有限的频谱资源上高速地传输数据,提高系统在空间通信中的频谱利用率。自适应编码调制(Adaptive Coding and Modulation, ACM)技术^[13]是一种具有信道自适应特性、适用于卫星等无线通信的传输技术。与 RCM 技术不同的是,它建立在信道估计的基础之上,通过回传信道将信道的状态信息回传给发送端,使其根据不同的信噪比状态自适应地改变编码和调制方式,从而使整个系统获得最佳的传输性能,最终达到高效性、可靠性传输的目的。

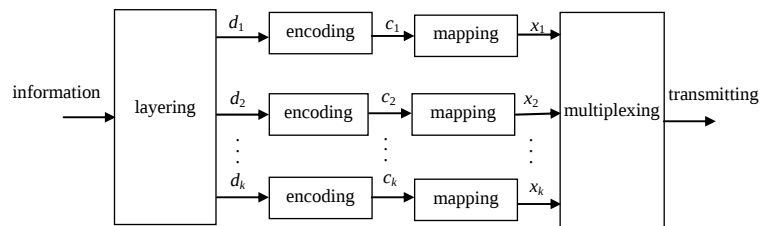


Fig.5 Diagram of non-orthogonal modulation
图 5 非正交调制技术框图

3 复杂电磁环境下新型调制与编码技术的联合应用

针对空间通信的复杂电磁环境特点,为了克服影响频谱利用率和抗干扰性能的制约因素,将新型的调制技术与信道编码技术联合应用就可以决定整个信息传输系统的性能。一般来说,采用联合应用技术的抗干扰能力要优于单一的抗干扰技术,这主要是因为每种抗干扰技术都存在着自身的弊端和适用条件,所以采用多种抗干扰技术联合应用的方式可以有效地弥补不同技术的缺点,从而获得更优的抗干扰效果。为了实现系统的最佳性能,首先需要在抗干扰能力、频谱利用率和硬件实现复杂度 3 个方面综合分析考虑,然后再根据具体的应用场景和通信体制,选择合适的调制和编码联合应用技术。

高阶调制技术可以提高频谱效率,且 Polar 码的实现复杂度低并能够达到香农极限。因此, CHEN K 等人提出了一种最优星座映射的极化编码联合抗干扰方案^[13],该方案基于多级编码的框架,把调制看成一种广义的极化过程,该方案具有较低的复杂度和较好的纠错性能,是一个典型新型调制技术与新型编码技术联合应用方案。在 OFDM 系统中结合 Polar 码的特点可以构造 Polar-OFDM 联合优化方案,OFDM 信号分散在各个子信道,通信中由于多径效应会使某些子信道的信道环境特别差,而通过 Polar 码对 OFDM 各个子载波进行编码,能够实现较强的抗衰落能力。在非正交调制系统中,针对选取的非正交调制技术框架,对卷积码、Turbo 码、LDPC 码、乘积码进行分析和优选,同时将常用的扩频、跳频等抗干扰技术进行联合分析与优化,可提高整个通信链路的性能。

然而,需要注意的是,在将不同抗干扰技术联合使用的过程中,存在着较多的技术困难有待解决,同时会使得抗干扰设备的复杂程度大大增加。以数字卫星电视广播(Digital Video Broadcasting-Satellite, DVB-S)为例,目前最新的 DVB-S2X 标准采用了多种信道编码和调制方案组合,能够将不同的数据流组合并调制在一个载波上,支持可变编码及调制(Variable Coding and Modulation, VCM)^[13]和 ACM 技术。DVB-S2X 采用 BCH 码和 LDPC 码级联的纠错编码方案,支持 1/4,1/3,2/5,1/2,3/5,2/3,3/4,4/5,5/6,8/9,9/10 等多种编码码率,可采用的调制方式主要是

相移键控(Phase Shift Keying, PSK), 包括 QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK 以及最高可达 256APSK 的更高阶数的 PSK 调制。同时, 它能够逐帧使用不同的纠错编码和调制方式, 通过 VCM, 不同类型的业务如标准数字电视(Standard Definition Television, SDTV)、高清晰度电视(High Definition Television, HDTV)、音频等可以使用各自的调制方式与编码速率, 因而频谱利用率以及传输效率得以大大提高, 更接近香农极限。由此可见, 将编码技术与调制技术相联合以实现抗干扰能力, 其获得的信号处理增益并非仅仅是两者简单的相加。通过联合应用可以获得更宽的频谱及更高的抗干扰效果。但是其缺点是相比单一的技术, 联合应用技术的成本投入相对较大, 设备的实现复杂程度有所提高。

随着无线通信所处的电磁环境越来越复杂, 相应的抗干扰技术也需要不断地提升。在具体的抗干扰技术选择过程中, 还需要对技术性能、成本以及复杂程度等进行综合考虑, 以获得最佳的抗干扰性能。

4 结论

调制和编码是提升空间通信性能的重要技术之一, 对它们的研究具有重要意义。本文主要研究与介绍了目前空间通信中主要用到的调制和编码技术, 并对它们的联合应用进行了分析与讨论, 所得出的结论对于以后如何在实际中提高空间通信系统的抗干扰能力, 实现更好的无线传输性能提供了理论指导。

参考文献:

- [1] Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes[J]. IEEE Transactions on Communications, 1996, 44(10): 1261–1271.
- [2] MacKay D J C, Neal R M. Good codes based on very sparse matrices[C]// 5th IMA Conference on Cryptography and Coding. Berlin, Germany: Springer, 1995: 100–111.
- [3] Luby M G, Mitzenmacher M, Shokrollahi M A, et al. Improved low-density parity-check codes using irregular graphs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2001, 47(2): 585–598.
- [4] Sasoglu E, Telatar E, Arikan E. Polarization for arbitrary discrete memoryless channels[C]// 2009 IEEE Information Theory Workshop. Taormina: [s.n.], 2009: 144–148.
- [5] Arikan E. A performance comparison of polar codes and Reed-Muller codes[J]. IEEE Communications Letters, 2008, 12(6): 447–449.
- [6] Eslami A, Pishro-Nik H. On finite-length performance of polar codes stopping sets, error floor, and concatenated design[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(3): 919–929.
- [7] Goela N, Abbe E, Gastpar M. Polar codes for broadcast channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2015, 61(2): 758–782.
- [8] MA X, LI P. Coded modulation using superimposed binary codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2004, 50(12): 3331–3343.
- [9] CUI H, LUO C, TAN K, et al. Seamless rate adaptation for wireless networking[C]// Proceedings of the 14 International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. Miami, Florida, USA: [s.n.], 2011: 437–446.
- [10] RAO W, LU F, CHEN S, et al. Low-complexity rate compatible modulation via variable weight sets[C]// 2014 IEEE Global Communications Conference. Austin, TX: [s.n.], 2014: 3874–3879.
- [11] 孙钰林, 王菊花, 吴增印. LDPC 码在深空通信中的兼容编码技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012, 10(1): 18–21. (SUN Yulin, WANG Juhua, WU Zengyin. Universal encoder for LDPC codes in deep space communications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012, 10(1): 18–21.)
- [12] ETSI EN 302 307-2: Digital Video Broadcasting(DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part 2: DVB-S2 Extensions(DVB-S2X) [EB/OL]. [2015]. http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302300_302399/30230702/01.01.01_60/en_30230702v010101p.pdf.
- [13] CHEN K, NIU K, LIN J R. Polar coded modulation with optimal constellation labeling[C]// 2013 National Doctoral Academic Forum on Information and Communications Technology. Beijing, China: [s.n.], 2013: 1–5.

作者简介:



闫 峰(1982–), 男, 山东省泰安市人, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信系统、信号处理技术. email: nuaayz@aliyun.com.

王梦源(1981–), 男, 湖南省张家界市人, 工程师, 主要研究方向为卫星通信系统、信号处理技术.