

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.10.024

优化卫星数传链路效率的 VCM 流程设计

李炯卉^{1,2}, 熊蔚明¹, 梅凡^{1,2}

(1.中国科学院 国家空间科学中心,北京 100190; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为提高探测卫星数据传输链路的传输效能,采用可变编码调制体制(VCM),在不增加卫星与地面站能量消耗和设备成本的条件下,降低链路资源浪费,优化星-地数据传输的吞吐量.在卫星VCM数传体制的基础上,分析了近地轨道卫星数传链路的动态链路预算,并详细讨论了链路传输效能的数学模型,给出了一种在有效数传时间内优化数传吞吐量的VCM流程设计算法.结果表明:该算法对于预知轨道的卫星系统,根据其动态的星-地链路预算结果,在保证误码率要求的前提下,选用不同的编码调制方式,从而拟合链路预算曲线,保持较为固定的链路余量,实现链路效率的优化;根据所述流程算法,针对一颗近地太阳同步轨道卫星设计VCM数传系统.通过数值仿真,与传统固定编码调制设计对比,说明这种VCM设计在提高链路有效性方面的突出优势.

关键词: 可变编码调制; 卫星数据传输; 链路有效性; 数传吞吐量; 链路预算; 流程设计

中图分类号: TN927

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)10-0162-06

Design of a VCM-based satellite data transmission architecture for down-link efficiency enhancement

LI Jionghui^{1,2}, XIONG Weiming¹, MEI Fan^{1,2}

(1.National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The dynamic link budget of low earth orbit (LEO) satellite data transmission link is analyzed, and the mathematical model of link efficiency is discussed. In order to enhance the data transmission link performance for exploration satellites, Variable Coding Modulation (VCM) system is applied to reduce link resource waste and improve the satellite-ground transmission throughput without increasing power consumption and design cost. A VCM schedule designing algorithm is illustrated for optimizing link throughput within the data transmission period. For a satellite system with foreseeable orbit and based on its dynamic link budget results, the proposed algorithm selects variable coding modulation combination under the bit error rate requirement to fit the link budget curve and keep a relatively constant link margin to achieve optimal link efficiency. Finally, on the basis of the proposed algorithm, a VCM data transmission system is designed for a LEO sun-synchronous satellite. According to the simulation results, the remarkable advantage of the proposed method is proved by comparison with traditional constant coding modulation design.

Keywords: variable coding modulation (VCM); satellite data transmission; link efficiency; data transmission throughput; link budget; schedule design

近年来,有效载荷传感器的精度不断提高,如高分辨率的光学载荷^[1]、SAR 载荷等,这些应用对卫星数据传输效能提出了更高的要求.同时,随着微小卫星的发展,遥感系统星座化已成为一种发展趋势^[2].由于体积、质量的约束,小卫星往往具有更加严格的能源设计限制^[3].如何在有限的数传时间内,

以尽可能小的能耗完成将大量数据下传给地面站的任务,已成为卫星数传工程领域亟待解决的问题.虽然具有更高带宽的Ka频段已被广泛认为未来对地探测卫星下行数据链路的发展方向^[4],但是,目前我国存在大量技术成熟的X波段地面站设备,改造成为Ka波段需要投入大量的经费和时间成本.因此,研究通过新型数传体制以提高X波段数传链路效能仍然非常必要.

可变编码调制(variable coding modulation, VCM)是在通信过程中快速切换信道编码和调制方式的方法.VCM要求预先设计好编码调制方式选用

收稿日期: 2016-04-22

基金项目: 中国科学院专项创新基金(0-5&Y62133A64S)

作者简介: 李炯卉(1989—),女,博士研究生;

熊蔚明(1963—),男,教授,博士生导师

通信作者: 李炯卉, jionghui@nssc.ac.cn

的流程. 遥感卫星的动态信道条件是可以预测的, 无须设计信息反馈结构, 因此其数传系统满足使用 VCM 的条件. 例如, 随着卫星轨道位置的变化, 链路余量会形成规律性的动态变化. 传统的卫星数传系统设计采用固定编码调制体制 (constant coding modulation, CCM), 为保证误码率要求, 须根据最小的链路余量设计编码调制方式. 那么, 在整个数传过程中随着链路余量增大, 必然存在较大的链路资源浪费. 通过 VCM 技术可以降低这种浪费, 从而更加充分地利用链路资源.

VCM 的研究依托于信道编码和信号调制的设计. 空间数据咨询委员会 (the consultative committee for space data systems, CCSDS) 针对于星地链路提出了两种支持 VCM 的通信协议: 一种是蓝皮书^[5]中给出的串联级联卷积码 (serially concatenated convolutional codes, SCCC); 另一种是基于欧洲电信标准化协会 (European telecommunication standards institute, ETSI) 于 2003 年制定的 Digital Video Broadcasting by satellites (DVB-S2) 协议^[6], 使用 Bose-Chaudhuri-Hochquenghem (BCH) 为外码, Low Density Parity Check (LDPC) 为内码的级联编码方式. 2013 年美国喷气动力实验室 (jet propulsion laboratory, JPL) 在 CCSDS 会议上提议制定关于 VCM 帧结构的标准化协议, 从而推动并规范 VCM 在工程中的使用. 2014 年 11 月, VCM 协议紫皮书^[7]进入修订阶段.

JPL 的 Hamkins 等^[8-10]在 DVB-S2 协议的基础

上, 阐述了基于 AR4JA LDPC 的编码调制子系统, 并在不同调制阶数和编码率下详细地仿真分析了系统性能, 为设计基于 LDPC 的 VCM 系统奠定基础. MAPSK 高阶调制技术针对卫星数传应用的研究和实现^[11-13], 为卫星数传 VCM 系统提供了关于高阶调制的技术基础. Cossu 等^[14]提出将 VCM 思想应用到低轨地球观测卫星数据传输体制设计中, 给出 VCM 系统软件设计体系结构框图, 并基于 SCCC 的 VCM 技术评估了某 K 波段遥感卫星的链路效率; 张旭^[15]设计了 VCM 的系统设计框图, 使用 DVB-S2 中推荐的 4 种调制方式和 LDPC 编码, 结合低轨卫星过境时间内的链路预算, 使用一种简单的 VCM 流程, 使卫星下行数据的传输量提高 35.5%. 可见, VCM 在卫星数传领域的应用价值已经得到较为全面的分析和认识. 在现有研究的基础上, 本文从通信有效性的原理角度出发, 通过分析链路预算, 设计出一套针对卫星数传链路环境和给定编码调制方式的最佳 VCM 流程设计算法. 该算法能够保证在有效数传时间内获得最大的信息吞吐量.

1 可变编码调制原理与体系模型

1.1 VCM 概念与应用模型

在卫星数传应用中, 信道条件具有一定的规律性变化. 例如一颗在高度为 600 km 的太阳同步轨道上的卫星 (简称“例星 1”). 当它经过地面站时, 向地面站传输数据. 卫星在仰角大于 5° 时建立数传链路. 例星 1 的链路设计参数见表 1.

表 1 某遥感卫星的 X 波段数传链路设计参数

Tab.1 Design parameter for a X-band remote sensing satellite data transmission link

链路参数	工作频率/GHz	发射机功率/W	馈线损耗/dB	天线增益/dBi	大气损耗/dB	指向性损耗/dB	极化损耗/dB	调制解调损耗/dB	地面站 G/T 值/(dB _i · K ⁻¹)	信道带宽/MHz	预留链路余量/dB
符号取值	f	P_t	$[L_f]$	$[G_t]$	$[A_A]$	$[AML]$	$[PL]$	$[ML]$	$[G/T]$	B	$[Margin]$
	8.3	20	1	2	1	1	1	3	33	375	3

注: 1. 玻尔兹曼常数 $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; 2. [] 表示的参数量纲为 dB.

卫星与地面站之间的距离, 即数传链路长度 R 随仰角而变化, 从而带来了动态的链路预算结果, 如图 1 所示.

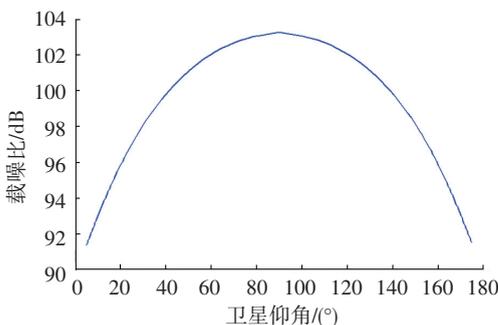


图 1 例星 1 对地面站的动态数传链路预算

Fig.1 Dynamic data transmission link budget of E_Sat1 to its ground station

图 1 中横坐标为地面站对卫星仰角, 纵坐标为链路预算的 S/N_0 . 从图 1 中可以看出, 随着仰角的增大, 链路预算充裕度增加. 在本例中, 卫星过境期间存在着 11.8 dB 的余量波动.

图 2 为 6 种编码调制方案下的系统归一化吞吐量的仿真示意图. 仿真中认为误码率大于 10^{-5} 时, 数据有效传输. 从图 2 中可以看出, 低阶调制编码方案在信噪比较低时其系统吞吐量比高阶调制编码方案高, 但是随着信噪比的增大, 吞吐量稳定在一个较低的水平; 而高阶调制编码方案在信噪比较低时由于信道噪声的影响, 误码率较高, 不能实现有效传输. 但是随着信道状况的改善, 采用高阶调制编码方式, 可获得更高的系统吞吐量.

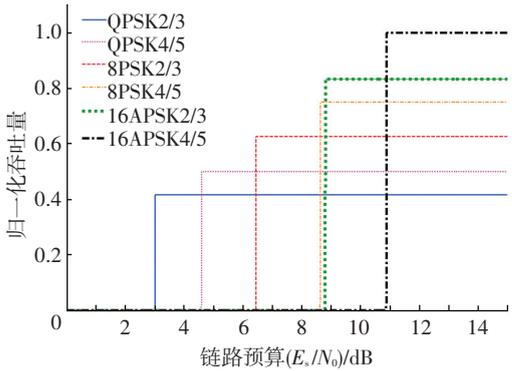


图 2 不同编码调制方案之下的归一化吞吐量

Fig.2 Normalized throughput with different modulation and code rate

因此 VCM 思想应运而生,即根据某一预定的流程采用不同的编码调制传输模式,以适应不同的信道条件(例如,传输距离),最大限度地利用链路增益余量,降低链路资源浪费,从而在不增加能量消耗和设备成本的条件下,提高数据传输系统的总吞吐量。

1.2 VCM 体系数学模型

对于本文所讨论的低轨遥感卫星,其信道可以近似视为加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)信道。在这种近似假设下,暂不讨论多普勒、衰落等因素的影响,以便于独立地分析可变编码调制子系统的性能。同时,假设模型中接收设备有理想的载波和同步性能,无相位噪声。

在 AWGN 信道中,根据香农公式,例星 1 在数传时间内,信道容量表现为图 3 的变化规律。

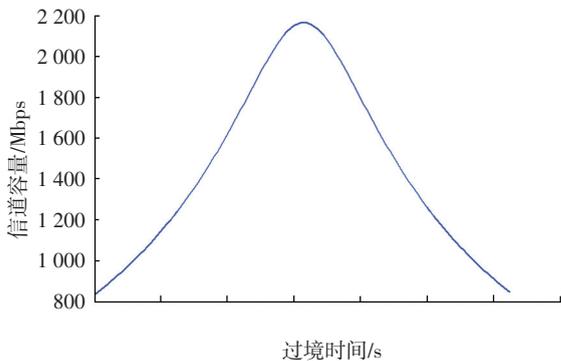


图 3 例星 1 数传链路容量的变化规律

Fig.3 Variation of E_Sat1's transmission link capacity

根据上述分析,VCM 流程设计的原则就是:有效的数传时间内,在带宽限制的条件下,满足传输误码率要求的同时使有效比特率尽可能地靠近链路容量曲线,从而获得尽可能大的数据吞吐量。这个问题,用数学表示为优化问题:

$$\begin{aligned} & \text{maximize } T \\ & \text{s.t.} \\ & B \leq B_{\text{limit}}, \\ & P_e \leq P_{e, \text{target}}. \end{aligned}$$

式中: B 为系统所用的实际带宽; B_{limit} 为可用的最大带宽; P_e 为系统的误比特率; $P_{e, \text{target}}$ 是设计要求得目标误比特率; T 为数据吞吐量(bits),即卫星在数传时间内,向地面传输的总信息量为

$$T = \int_{T_p} R_b(t) dt.$$

式中: $R_b(t)$ 为有效信息比特速率,其取值可随时间变化,因此表示为时间 t 的函数; T_p 为卫星过境时数传链路保持的时间。

设信道编码方式集合为 C ,其元素个数为 n_c ;调制方式集合为 M ,其中包含 n_m 种不同的调制方式。为了方便表达,本文只讨论 PSK、APSK 调制方式和 LDPC 编码。定义 ε_M 为调制阶数, ε_C 为编码码率。对于 M 中的元素, ε_M 取 1、2、3、4、5 分别表示 BPSK、QPSK、8PSK、16APSK 和 32APSK。

对于 PSK、APSK,符号速率 $R_s = \frac{1}{2}B$ 。因此,为了获得最大的速率并充分利用带宽,取

$$R_s = \frac{1}{2}B_{\text{limit}}. \quad (1)$$

VCM 的目标是:在限制条件内选用合适的调制编码,使得有效信息比特速率 R_b 尽可能大。

$$R_b = R_s \cdot \varepsilon_M \cdot \varepsilon_C,$$

式中 η 为频谱利用率。因此,对于单载波系统有

$$\eta = \frac{R_b}{B} = \frac{1}{2}\varepsilon_M\varepsilon_C,$$

由此可见,VCM 体系的核心内容是对数传过程中编码调制方式变化流程的设计(即选择合适的 ε_M 和 ε_C),从而求解对 T 的优化问题。

2 VCM 流程设计方法

以 Δ 为编码调制方式变化的最小时间单位,将卫星的过境时间 T_p (一般设定仰角 5° 以上为可见)

量化为 $T_p = \{t_k | k = 1, \dots, N\}$, $N = \lceil \frac{T_p}{\Delta} \rceil$ 对于 $t_m, t_n \in T_p$,且 $m, n \neq N$,有 $|t_m - t_n| = |m - n| \cdot \Delta$; $t_N - t_{N-1} = T_p - (N-1) \cdot \Delta$ 。

对所有的 $t_k \in \{T_p \setminus t_N\}$,通过链路预算得出 $S(t_k)/N_0$ 。设 E_s 表示经过调制映射后的平均符号能量,则由式(1)有

$$E_s(t_k)/N_0 = \frac{S(t_k)/N_0}{R_s} = \frac{2 \cdot S(t_k)/N_0}{B_{\text{limit}}}.$$

设某种编码调制方式在 AWGN 信道中的解调门限为 $\gamma([\varepsilon_M, \varepsilon_C], P_{e, \text{target}})$ 。它表示使用 M 中阶数为 ε_M 的调制方式和 C 中码率为 ε_C 的编码方式组,使系统在 AWGN 信道中达到目标误比特率 $P_{e, \text{target}}$

时所需的最小 E_s/N_0 。

定义 1 有效编码调制组合。

设 $[\varepsilon_M, \varepsilon_C]^i$ 是 \mathbf{C} 及 \mathbf{M} 中编码和调制方式的一种组合, ($i=1, 2, \dots, K$), 其中 $K=n_M \cdot n_C$ 。该组合对应的解调门限和频谱利用率分别为 γ_i 和 η_i 。若对于任意满足 $\gamma_i - \gamma_j \geq 0$ 的组合 $[\varepsilon_M, \varepsilon_C]^j$ ($j=1, 2, \dots, K$) 且 $j \neq i$, 都有 $\eta_i - \eta_j > 0$, 那么 $[\varepsilon_M, \varepsilon_C]^i$ 称为有效编码调制组合。

否则, 存在一种组合 $[\varepsilon_M, \varepsilon_C]^j$ 具有更低的解调门限, 同时又能够得到更高(或相等)的频谱利用率, 那么 $[\varepsilon_M, \varepsilon_C]^i$ 在 VCM 系统中就不存在使用价值了, 便称其为无效组合。

定义 $\mathbf{\Gamma}$ 为 \mathbf{C} 和 \mathbf{M} 构建的全部有效编码调制组合的解调门限集合。将 $\mathbf{\Gamma}$ 中的元素按数值从小到大排序, 得到:

$\mathbf{\Gamma} = \{\gamma_i([\varepsilon_M, \varepsilon_C]^i, P_{e, \text{target}}) \mid i = 1, 2, \dots, K; \gamma_i < \gamma_{i+1}\}$, 由定义 1 可知, $\eta_i < \eta_j$ 。

比较 $E_s(t_k)/N_0$ 和 $E_s(t_{k+1})/N_0$, 若

$$E_s(t_k)/N_0 \leq E_{s+1}(t_k)/N_0, \quad (2)$$

寻找 $\gamma_i \in \mathbf{\Gamma} \cup \{\gamma_0=0, \gamma_{K+1}=\infty\}$, 使其满足:

$$\gamma_i \leq E_s(t_k)/N_0 < \gamma_{i+1}. \quad (3)$$

如果只有 γ_0 满足式(3), 则表示: 在 $t_k \sim t_{k+1}$ 的时间段内, 无法建立有效数传链路, 暂不传递信息。否则, 有 $\gamma_i([\varepsilon_M^m, \varepsilon_C^c]^i, P_{e, \text{target}})$ 满足式(3), 那么, 在 $t_k \sim t_{k+1}$ 的时间段内安排 ε_M^m 阶调制和 ε_C^c 码率编码建立数传链路。因为根据定义 1, 可以断定, 组合 $[\varepsilon_M^m, \varepsilon_C^c]^i$ 给出满足误码率要求条件下的最大频谱利用率, $\eta^{(k)} = \varepsilon_M^m \varepsilon_C^c$ 。

同理, 若 $E_s(t_k)/N_0 \leq E_{s+1}(t_k)/N_0$, 视为链路余量在 $t_k \sim t_{k+1}$ 的时间段内减性变化。为了保证误码率要求, 以较小的 $E_s(t_{k+1})/N_0$ 为判断依据, 寻找 $\gamma_i \in \mathbf{\Gamma} \cup \{\gamma_0=0, \gamma_{K+1}=\infty\}$, 满足:

$$\gamma_i \leq E_s(t_{k+1})/N_0 < \gamma_{i+1}, \quad (4)$$

并按照其对应的组合建立数传链路, 或者暂停数传。

最终, 根据上述的流程规划, 得到卫星过境时间内的信息吞吐量为 E_s/N_0 。

$$T = \sum_{k=1}^{N-1} \Delta \cdot R_b^{(k)} = \sum_{k=1}^{N-1} \Delta \cdot \eta^{(k)} \cdot B_{\text{limit}},$$

其中, $\eta^{(k)}$ 为 $t_k \sim t_{k+1}$ 时间段内的频谱利用率。

3 仿真与结果分析

针对例星 1 的数传链路, 设计 VCM 数传体系, 并讨论其对链路效率的影响。

\mathbf{M} 中的元素为 QPSK、8PSK、16APSK 和 32APSK, 即 ε_M 的可能取值为 2、3、4、5。 \mathbf{C} 中为各码率的 AR4JA LDPC 编码, ε_C 的可能取值为 2/3、3/4、

4/5、5/6。

表 2 中总结了通过计算机仿真得到的编码调制子系统解调门限, 满足 $P_{e, \text{target}} = 10^{-5}$ 。

表 2 编码调制子系统满足 $P_e = 10^{-5}$ 的解调门限
Tab.2 Demodulation threshold for $P_e = 10^{-5}$ of the coding modulation sub-system

CODMOD	$[\varepsilon_M, \varepsilon_C]$	$\eta / ((\text{Bit} \cdot \text{s}^{-1}) \cdot \text{Hz}^{-1})$	$\gamma(P_{e, \text{target}})$
QPSK 2/3	[2, 2/3]	0.660	3.01
QPSK 3/4	[2, 3/4]	0.750	3.98
QPSK 4/5	[2, 4/5]	0.800	4.59
QPSK 5/6	[2, 5/6]	0.830	5.09
8PSK 2/3	[3, 2/3]	1.000	6.46
8PSK 3/4	[3, 3/4]	1.125	7.78
8PSK 4/5	[3, 4/5]	1.200	8.64
8PSK 5/6	[3, 5/6]	1.250	9.21
16APSK 2/3	[4, 2/3]	1.333	8.81
16APSK 3/4	[4, 3/4]	1.500	10.07
16APSK 4/5	[4, 4/5]	1.600	10.90
16APSK 5/6	[4, 5/6]	1.667	11.48
32APSK 3/4	[5, 3/4]	1.875	12.62
32APSK 4/5	[5, 4/5]	2.000	13.51
32APSK 5/6	[5, 5/6]	2.083	14.09

图 4 中所示为通过仿真所得的表 2 中各编码调制方式的误码率曲线。为了得出满足 $P_{e, \text{target}} = 10^{-5}$ 的解调门限, 仿真中关注的目标误码率范围在 $10^{-7} \leq P_{e, \text{target}} \leq 10^{-2}$ 之内, 并确保误码率曲线经过 $P_{e, \text{target}} = 10^{-5}$ 刻线。参与仿真的数据量在 10^8 量级, 因此针对于 $P_{e, \text{target}} = 10^{-5}$ 的解调门限仿真结果精确到小数点后两位。

解映射时通过计算接收符号的对数似然比(log-likelihood ratio, LLR) 得到解调的软判决, 以此作为 LDPC 解码器的输入。通过 LDPC 解码获取硬判决信息。仿真中, LDPC 解码采用迭代解码方式, 迭代最高次数为 50 次。

根据定义 1 可以判断, 表 2 中 8PSK 5/6, 即 [3, 5/6] 组合为无效组合。除此之外的 14 个组合的解调门限构成有效编码调制组合的解调门限集合 $\mathbf{\Gamma}$ 。

算例 星 1 的过境时间 $T_p = 630$ s, 取 VCM 最小变化周期 $\Delta = 5$ s, 将 T_p 量化为 126 段。在轨道的上行阶段, 链路余量变化满足式(2), 按式(3)原则选取最优编码调制组合; 在轨道下行阶段, 组合选择遵循式(4)。如此所得的 VCM 流程见表 3。

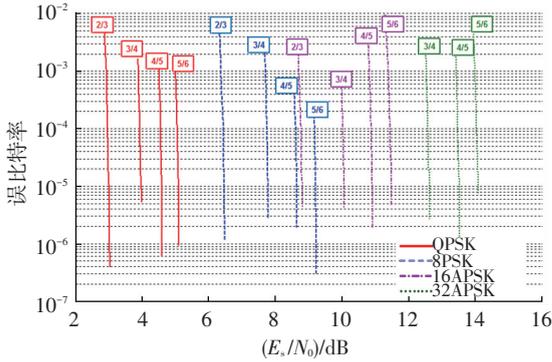


图 4 表 2 中各编码调制组合的误码率曲线

Fig.4 Bit error rate curve with the CODMOD listed in Tab.2

表 3 VCM 流程设计

Tab.3 VCM schedule design

过境时间/s	$[\epsilon_M, \epsilon_C]$	持续时间/s
0~34	[2, 5/6]	35
35~79	[3, 2/3]	45
80~104	[3, 3/4]	25
105~109	[3, 4/5]	5
110~139	[4, 2/3]	30
140~159	[4, 3/4]	20
160~174	[4, 4/5]	15
175~199	[4, 5/6]	25
200~214	[5, 3/4]	15
215~229	[5, 4/5]	15
230~399	[5, 5/6]	170
400~414	[5, 4/5]	15
415~429	[5, 3/4]	15
430~454	[4, 5/6]	25
455~469	[4, 4/5]	15
470~489	[4, 3/4]	20
490~519	[4, 2/3]	30
520~524	[3, 4/5]	5
525~549	[3, 3/4]	25
550~594	[3, 2/3]	45
595~629	[2, 5/6]	35

由于算例中星 1 轨道对称的特点, VCM 流程变化也呈现上下行对称。

图 5 中给出根据表 3 中 VCM 流程所获得的信息比特率随卫星过境时间变化的规律。可以看出, 与

CCM 相比, VCM 设计下的比特率曲线呈现与图 2 中理论信道容量曲线相似的变化趋势。该 VCM 设计和几种传统的 CCM 设计性能对比见表 4。

可见, 相比于传统的 CCM 数传体系, 表 3 中的 VCM 数传体系将吞吐量提高了 70% 以上。这种 VCM 流程设计方法, 在保证系统误码率要求的前提下, 最佳地安排了给定编码调制组合的使用时间和顺序, 使链路效率得到了明显的优化。

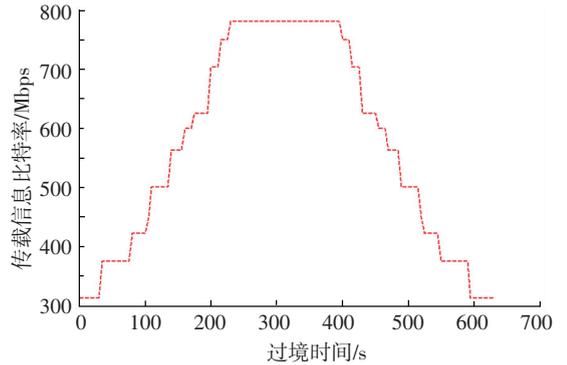


图 5 VCM 有效信息比特率

Fig.5 VCM effective information bit rate

表 4 数传链路效率对比

Tab.4 Comparison of data transmission link efficiency

编码调制方式	有效数传时间 t_e/s	时间利用率 $\eta_t/\%$	总吞吐量	
			T/Gbits	相对于 VCM/%
QPSK 5/6	630	100.0	196.6	54.58
8PSK 2/3	560	88.9	210.6	58.47
8PSK 4/5	420	66.7	189.5	52.61
16APSK 5/6	280	44.4	175.5	48.72
32APSK 5/6	170	27.0	133.2	36.98
VCM	630	100.0	360.2	1.00

4 结 论

1) 本文针对低轨道探测卫星的应用模型提出卫星对地数传体制的优化问题。给出一种基于可变编码调制的低轨卫星对地数传体制设计方法, 以降低链路资源浪费、提高星-地数据传输的吞吐量, 从而达到优化链路传输效率的目的。

2) 通过数学描述、定义及推导, 重点阐述 VCM 流程的设计方法, 通过最佳安排给定的编码调制组合, 求解链路效率优化问题。最后, 针对某太阳同步轨道遥感卫星的 X 波段数传链路, 应用所述流程算法设计其 VCM 流程。通过仿真计算对比, 证明所设计的 VCM 体系明显地提高了过境时间内的吞吐量, 优化了链路效率, 更加充分地利用了数传链路能力。

参考文献

- [1] DI ROBERTO R, NASCETTI A, PAOLOZZI A, et al. Optical payloads for high-resolution earth imaging suitable for microsatellites [C]//Proceeding of the 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Rome, Italy: IEEE, 2015. DOI:10.1109/EEEIC.2015.7165456.
- [2] 吴国强, 孙兆伟, 赵丹, 等. 编队小卫星间通信系统的发展和趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(11): 1699-1703. DOI:10.3321/j.issn:0367-6234.2007.11.005.
WU Guoqiang, SUN Zhaowei, ZHAO Dan, et al. Development and trend research of inter-satellite communication system on formation small satellites[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(11): 1699-1703. DOI: 10.3321/j.issn:0367-6234.2007.11.005.
- [3] LAN Shengchang, CHEN Qing, ZHANG Jinxiu, et al. A taxonomy of energy efficiency strategies for cubesat cluster formation networks [C]//Proceeding of the 64th International Astronautical Congress (IAC), Beijing: International Astronautical Federation, 2013: 11486-11493.
- [4] MCCARTHY K P, STOCKLIN F J, GELDZAHLE B J, et al. NASA's evolution to K_a -band space communications for near-earth spacecraft [C]//Proceedings of the Space Ops Conference. Huntsville, AL: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2010.
- [5] Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS). Blue Book: TM Synchronization and Channel Coding; CCSDS 131.0-B-2[S]. Washington DC: CCSDS, 2011, 8.
- [6] European Telecommunications Standards Institute (ETSI). European Standard: Digital Video Broadcasting (DVB); Second Generation Framing Structure, Channel Coding and Modulation Systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other Broadband Satellite Applications; ETSI EN 302 307 V1.2.1 (2009-08)[S]. Sophia-Antipolis: ETSI, 2014, 3.
- [7] Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS). Magenta Book: Variable Coded Modulation Protocol; CCSDS 131.5-M-1.1[S]. Washington DC: CCSDS, 2014, 3.
- [8] HAMKINS J. Performance of Low-Density Parity-Check Coded Modulation[C]//Proceeding of 2010 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, U.S.: IEEE, 2010.
- [9] MITCHELL D G M, LENTMAIER M, COSTELLO D J. New families of LDPC block codes formed by terminating irregular photograph-based LDPC convolutional codes[C]//Proceeding of the International Symposium on Information Theory (ISIT). Austin: IEEE, 2010. DOI:10.1109/ISIT.2010.5513633.
- [10] 王秀妮. 基于 LDPC 码的编码调制技术研究[D]. 广州: 中山大学, 2013.
- [11] 雷菁, 黄英, 刘志新. 非线性卫星信道中 APSK 信号星座优化设计研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006; 28(8): 117-121. DOI:10.3321/j.issn.1671-4431.2006.08.032.
LEI Jing, HUANG Ying, LIU Zhixin. Optimization of APSK signal constellation for nonlinear satellite channels[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(8): 117-121. DOI:10.3321/j.issn.1671-4431.2006.08.032.
- [12] GUO Shuxiao, HUANG Guodong, LIU Bing, et al. Research of MAPSK modulation based on the no-linear satellite channel[C]//Proceeding of the 3rd Broadband Network and Multimedia Technology. Beijing, China: IEEE, 2010. DOI: 10.1109/ICBNT.2010.5705279.
- [13] DENG Yuance, WANG Zhugang. Modulation recognition of MAPSK signals using template matching[J]. Electronics Letters, 2014, 50(25): 1986-1988. DOI:10.1049/el.2014.2700.
- [14] COSSU M, ROSCIGNO R, GIANCRISTOFARO M, et al. Effects of link availability on the achievable performance with variable coding modulation earth observation satellites[C]//Proceedings of the 1st AESS European Conference on Satellite Telecommunications (ESTEL). Rome, Italy: IEEE Computer Society, 2012. DOI:10.1109/ESTEL.2012.6400108.
- [15] 张旭. 基于 VCM 的对地探测卫星数据传输体制分析[J]. 电讯技术, 2014, 54(1): 15-16. DOI:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.003.
ZHANG Xu. Analysis of VCM data transmission method for earth exploration satellite system[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(1): 15-16. DOI:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.003.

(编辑 张红)