

近地卫星 Ka 频段数传链路抗雨衰自适应模式设计*

张颖^{1,2}, 熊蔚明¹, 王竹刚¹

(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:针对近地卫星数传时的信道时变性和严重的 Ka 频段雨衰现象,采用自适应编码调制(Adaptive Coding and Modulation, ACM)技术能够充分利用链路资源,相对于传统的固定编码调制方式,进一步提高链路的数据吞吐量。提出近地卫星 Ka 频段数传链路 ACM 模式设计方法,在降雨环境下建立 Ka 频段数传链路模型,根据链路预算的信道状况确定 ACM 选用模式;采用基于导频符号的最大似然信噪比估计算法结合移动平均的平滑方法实现信道估计,有效地减小了估计值的波动。仿真结果表明,无论晴天还是雨天,采用提出的卫星数传链路 ACM 模式设计方法,能够在保证系统可靠性的同时获取较高的数据吞吐量。

关键词: Ka 频段; 自适应编码调制模式设计; 链路雨衰模型; 数据吞吐量; 信噪比估计
中图分类号: TN927 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2019)06-149-07

Adaptive mode design of near-earth satellite data transmission link for resistance to rainfall attenuation at Ka band

ZHANG Ying^{1,2}, XIONG Weiming¹, WANG Zhugang¹

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

Abstract: For channel's time variability and severe rain attenuation at Ka band when near-earth satellites transmit data, using ACM (adaptive coding and modulation) technology can make full use of link resources, and further improve data throughput relative to traditional constant coding and modulation. The design method of the near-earth satellite data transmission link with ACM mode was proposed. The data transmission link model was established under the rainfall environment, then the ACM selection mode was determined depending on the channel condition. The maximum likelihood signal to noise estimation algorithm based on pilot symbols and the moving average smoothing method were adopted at channel estimation to reduce the fluctuation of the estimated value effectively. Simulation results show that no matter on clear or rainy days, the proposed satellite data transmission link ACM mode design method can obtain high data throughput while ensuring system reliability.

Keywords: Ka band; adaptive coding and modulation mode design; link rainfall attenuation model; data throughput; signal to noise estimation

近年来,随着有效载荷对卫星数传码率的要求越来越高,X波段的375 MHz带宽已经不能满足卫星业务的需求,带宽高达1.5 GHz的Ka频段将成为卫星数传的发展趋势^[1]。但是,大气环境对Ka频段通信链路造成的影响远大于对X波段的,其中主要是降雨对毫米波的吸收和散射作用引发了较大的信号衰减^[2]。

针对信号雨衰的影响,在不增加发射功率的前提下,通常采用添加链路备余量的方式。固定编码调制(Constant Coding and Modulation, CCM)方式为了保证可靠的通信链路,使用仅在最大降雨量、最远星地距离下满足门限(留有余量)的模式,卫星过境自由空间损耗变小或天气好转时会

存在很大的链路增益浪费。

可变编码调制(Variable Coding and Modulation, VCM)方式能够根据链路预算的信道情况提前设计好编码调制模式(Coding and Modulation Schemes, CMS)选用流程^[3],提升链路有效性,对能够提前确定卫星轨道信道的情况具有良好的适应性,但无法适应随机的天气情况,仍需要预留出较大的链路余量,在天气好转时存在较大的链路增益浪费。

故将开环的VCM结合实时信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)估计及回传信道实现闭环的自适应编码调制(Adaptive Coding and Modulation, ACM)系统^[4]。随着卫星过境信道(距离及雨衰)

* 收稿日期:2018-08-20

作者简介:张颖(1989—),女,河南新乡人,博士研究生,E-mail:zhangyingnssc@163.com;
熊蔚明(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:xwm@nssc.ac.cn

的动态变化,当信噪比小时选取低阶的调制方式和较低的编码码率,当信噪比大时选取高阶的调制方式和较高的编码码率,从而能够选取紧跟信道状况变化的模式,特别适合对付雨衰,能够大大提高链路的数据吞吐量。

本文针对雨衰较严重的 Ka 频段数传信道,提出链路 ACM 模式设计方法。在降雨环境下建立 Ka 频段数传链路模型,通过链路预算得到卫星过境时信道的变化特性,确定 ACM 选用模式;信道估计采用基于数据传输帧中导频符号的最大似然信噪比估计算法和移动平均方法平滑估计值,并由估计误差确定模式切换的移位门限大小。对晴天和降雨率为 100 mm/h 的雨天进行 ACM 模式设计仿真,结果表明该方法能够在保证系统可靠性的同时获取较高的数据吞吐量。

1 ACM 原理与系统设计流程

与传统 CCM 方式采用固定一种信道编码调制不同,ACM 方式可根据实际信道的信噪比情况自适应改变信道编码调制模式,以提升整个链路吞吐量。ACM 原理框图如图 1 所示。

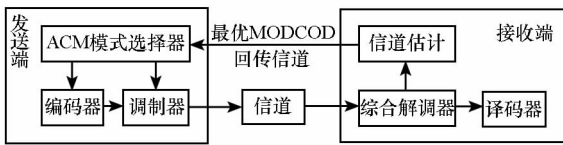


图 1 ACM 原理框图

Fig. 1 Functional block diagram of ACM

发送端采用 DVB - S2 标准,依次进行 BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) 外码和低密度奇偶校验 (Low Density Parity Check, LDPC) 内码级联编码、星座映射、物理层成帧与加扰、成型滤波与正交调制。发射信号经信道送达接收端,接收端首先进行综合解调,包括时钟同步、帧同步和载波同步,同步后进行相应的解调和译码;同时还需要对接收信号的信噪比进行实时估计,模式切换算法利用估计值将最优编码调制模式 (MODulation and CODing, MODCOD) 信息通过回传信道反馈给发送端,发送端切换到相应的编码调制模式,在满足误码率要求的前提下实现编码调制方式的闭环控制,使链路都能工作在最高数据传输效率的模式上。

对于给定轨道参数与链路参数的 ACM 系统,其设计与应用流程如图 2 所示。

首先通过雨衰预测和链路预算估计该场景下卫星过境时信道变化特性,根据链路预算的信噪

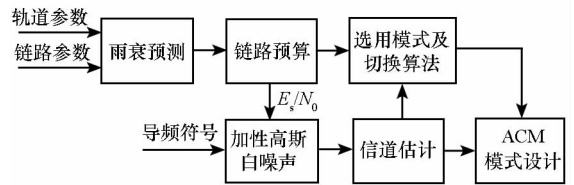


图 2 ACM 系统设计与应用流程

Fig. 2 Systematic design and application flow chart of ACM

比变化范围确定 ACM 的选用模式,并按照预算的信噪比值对编码调制后的导频符号加入高斯白噪声,再对接收到的导频数据进行信噪比估计,通过信噪比估计的绝对误差范围确定模式切换的移位门限大小,最终根据卫星过境的实际信道估计值来选择满足门限条件的模式,并自适应地切换最佳的编码调制模式。该设计方法是通用的,可以适用于各种近地卫星数传链路。

2 含动态雨衰的数传链路模型

由于雨滴的形状、大小和下雨速率无法实时掌控,采用最新的 ITU - R P. 618 - 13 雨衰预测模型^[5]估计近地卫星过境的雨衰变化特性,雨衰计算所需参数有:地面站所在纬度 φ 、地面站的海拔高度 d_0 、地面站到卫星的仰角 θ 、电磁波的极化角 τ 、载波频率 f 和可用度 p_a 。

首先由地面站纬度确定该区域的降雨层高度 h_R ,通过建议书^[6]确定平均一年超过 0.01% 时间的降雨率 $R_{0.01}$,计算衰减率 g_R (单位: dB/km) 为

$$g_R = k(R_{0.01})^\alpha \tag{1}$$

其中, k 和 α 为衰减因子,主要由极化角、地面站到卫星仰角和载波频率 f 决定^[7]。

简化建议书中参数 L_R (单位: km) 的计算公式为

$$L_R = \begin{cases} L_s \cdot r_{0.01} & r_{0.01} < 1 \\ L_s & r_{0.01} \geq 1 \end{cases} \tag{2}$$

其中, L_s 为倾斜路径长度, $r_{0.01}$ 是发生概率为 0.01% 的水平缩短因子^[5]。

则有效路径长度 L_E (单位: km) 为

$$L_E = L_R \cdot v_{0.01} \tag{3}$$

其中, $v_{0.01}$ 是发生概率为 0.01% 的垂直缩短因子^[5]。

平均一年超过 0.01% 时间的降雨衰减 $A_{0.01}$ (单位: dB) 为衰减率与有效路径长度的乘积,即

$$A_{0.01} = g_R \cdot L_E \tag{4}$$

最后估计平均一年超过其他时间的降雨衰减 A_p (单位: dB) 为

$$A_p = A_{0.01} \left(\frac{p}{0.01} \right)^{-[0.655 + 0.033 \ln(p) - 0.045 \ln(A_{0.01}) - \beta(1-p)\sin\theta]} \quad (5)$$

其中, $p \in [0.001, 5]$ 。链路可用度 $p_a = 1 - p\%$, 表示一年内用户可用链路通信的时间百分比, 当可用度低于 99.99% 时, $\beta = 0$ 。

链路预算的总衰减 $[L]$ 公式为

$$[L] = [L_0] + [L_p] + [L_{am}] + [L_m] + [A_p] \quad (6)$$

其中, $[\cdot]$ 表示单位为 dB, $[L_0]$ 为自由空间损耗, $[L_p]$ 为指向性损耗, $[L_{am}]$ 为极化损耗, $[L_m]$ 为调制解调损耗, $[A_p]$ 为雨衰大小。

选取某近地卫星一次通过三亚地面站的轨道数据, 星地距离最远为 2206.37 km、最近为 724.51 km, 起始仰角为 10° 、最高仰角为 88° , 共 583 s。三亚地面站纬度为 18.12° , 经度为 108.58° , 海拔为 14 m, 年均降雨率为 80 mm/h。针对 Ka 波段的卫星数传, 链路参数如表 1 所示。

表 1 某近地卫星 Ka 频段数传链路设计参数

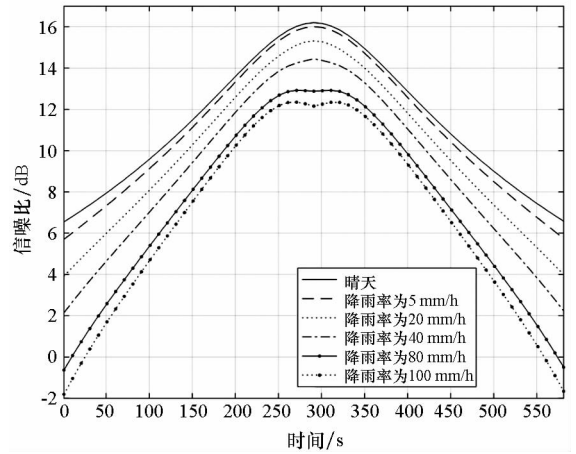
Tab. 1 Data transmission link design parameters of a near-earth satellite in Ka band

下行载波频率/GHz	有效全向辐射功率/dBW	极化角/ $(^\circ)$	指向性损耗/dB	极化损耗/dB	调制解调损耗/dB	地面站 G/T 值/(dBi/K)	信道带宽/GHz	成型滤波波滚降系数	符号速率/Gsps	可用度/%
符号 f	$[EIRP]$	τ	$[L_p]$	$[L_{am}]$	$[L_m]$	$[G/T]$	B	a	R_s	p_a
取值 26	14	45	0.5	0.5	2	45	1.5	0.35	1.11	97

注:有效全向辐射功率 $[EIRP]$ 的大小需通过链路预算确定, 保证信道变化范围接近 DVB-S2 模式门限的动态范围。

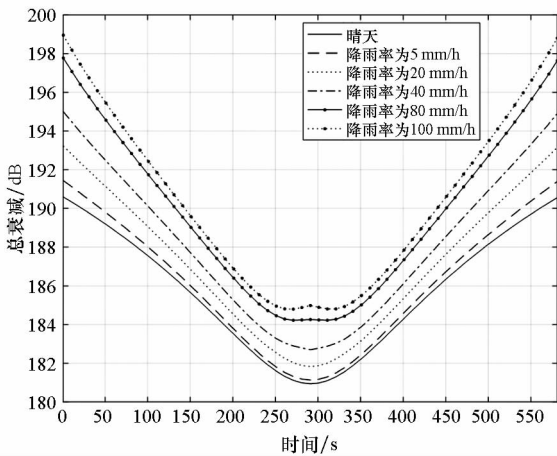
当可用度为 97% ($p = 3$) 时, 分别对晴天、降雨率为 5 mm/h 的小雨、降雨率为 20 mm/h 的中雨、降雨率为 40 mm/h 的大雨、降雨率为 80 mm/h 的暴雨和降雨率为 100 mm/h 的大暴雨进行链路预算, 链路预算的总衰减和信噪比变化情况如图 3 所示。

从图 3 中可看出, 该场景及 97% 可用度下, 最大降雨率 100 mm/h 的最小信道信噪比和晴天的最大信道信噪比跨度约 18 dB。为了满足晴天和降雨率 100 mm/h 以内的雨天下近地卫星过境的信道信噪比变化范围能够接近 DVB-S2 模式门限的动态范围, 选取 $[EIRP] = 14$ dBW。



(b) 信道情况

(b) Channel situation



(a) 总衰减

(a) Total attenuation

图 3 卫星一次过境三亚站的总衰减和信噪比变化
Fig. 3 Total attenuation and SNR variation of transit of a low earth orbit satellite at Sanya station

3 ACM 模式设计方法

3.1 信道估计算法

信噪比估计算法中较突出的是 DA-ML 算法和 M2M4 算法^[8], DA-ML 算法需要依据发送序列的数值, 对估计有一定的局限性, 但估计精确度较高; M2M4 算法不需要先验信息, 但在低信噪比下估计性能非常差。

假设理想同步后的信号表达式为

$$r_k = s_k + n_k \quad (7)$$

其中, s_k 为第 k 个发送符号, n_k 为第 k 个信号的高斯白噪声。

采用基于数据辅助的最大似然 DA-ML 信噪比估计算法^[9], 公式为

$$\widehat{SNR} = \frac{\left[\frac{1}{k_0} \sum_{k=1}^{k_0} (r_{lk}s_{lk} + r_{Qk}s_{Qk}) \right]^2}{\frac{1}{k_0} \sum_{k=1}^{k_0} (r_{lk}^2 + r_{Qk}^2) - \left[\frac{1}{k_0} \sum_{k=1}^{k_0} (r_{lk}s_{lk} + r_{Qk}s_{Qk}) \right]^2} \quad (8)$$

其中, k_0 为信号序列长度, r_{lk} 和 r_{Qk} 分别为第 k 个接收符号的实部和虚部值, s_{lk} 和 s_{Qk} 分别为第 k 个发送符号的实部和虚部值。

用对数表示(单位: dB)为

$$\widehat{SNR}_L = 10 \lg(\widehat{SNR}) \quad (9)$$

当星地距离逐渐减小或逐渐增大时信道信噪比均呈近似线性变化趋势, 故可采用移动平均方法对估计值平滑以减小估计值的波动。设平滑窗 W , 在估计次数超过 W 次时, 将最近的 W 次估计值的平均值更新为该时刻信噪比估计结果。

$$\widehat{SNR}'_L(t) = \frac{1}{W} \sum_{i=1}^W [\widehat{SNR}_L(t - i + 1)] \quad (10)$$

其中, $\widehat{SNR}'_L(t)$ 为第 t 时刻平滑后信噪比估计值。

采用错误标准偏差 ESD 和绝对误差 SNR_{AE} 衡量算法性能

$$ESD = |\widehat{SNR}_L - SNR_L| \quad (11)$$

$$SNR_{AE} = SNR_L - \widehat{SNR}_L \quad (12)$$

其中, SNR_L 为实际的信道信噪比取对数。

DVB-S2 标准每个时隙有 90 个符号, 每 16 个时隙插入一组 36 符号的导频, DVB-S2 标准 64 800 长帧的一帧至少有 8 个导频域。考虑算法性能和复杂度, 分别对接收到的 1~6 个导频域, 即分别对 36、72、108、144、180 和 216 个接收的导频符号进行 DA-ML 算法估计, 信噪比范围选取 $[-3 \text{ dB}, 15 \text{ dB}]$, 对每个信噪比进行 50 次仿真, 得到不同序列长度的平均错误标准偏差如图 4 所示。

从图 4 中可看出, 当选取序列长度为 180 时, DA-ML 算法的平均错误标准偏差已低于 0.6 dB, 性能较好, 故选取 $k_0 = 180$ 的 DA-ML 信噪比估计算法。

再分别对晴天和降雨率为 100 mm/h 的雨天采用不同平滑窗 ($W = 5, 10, 20, 30, 40, 50$), 对三亚站模型进行仿真, 仿真结果如图 5 所示。

从图 5 中可看出, 平滑窗越大, 估计误差波动

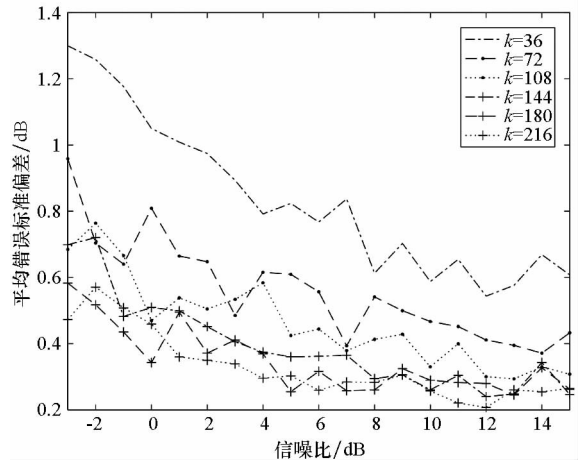
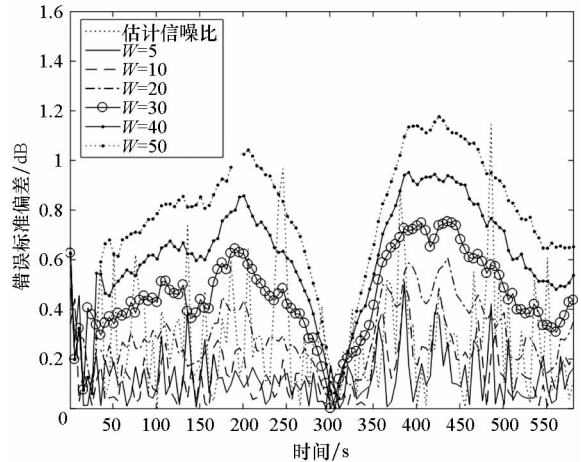
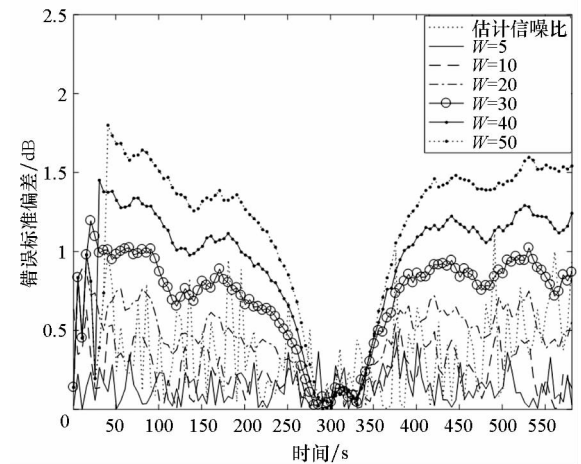


图 4 不同序列长度下信噪比估计的平均错误标准偏差
Fig. 4 Mean error standard deviation of SNR estimation under different sequence length



(a) 晴天
(a) Clear day



(b) 降雨率为 100 mm/h
(b) Rainfall rate in 100 mm/h

图 5 不同平滑后信噪比估计的错误标准偏差
Fig. 5 Error standard deviation of SNR estimations for different smooth window

越小,但估计出来的值会逐渐向实际值右侧移动,错误标准偏差反而会越大。 $W=5$ 和 $W=10$ 的平均错误标准偏差均比无平滑的仿真结果要小,且误差相近,但 $W=10$ 的估计误差波动较小,故选择 $W=10$ 的平滑窗。

3.2 ACM 选用模式的确定

DVB-S2 具有 QPSK、8PSK、16APSK、32APSK 共 4 种调制方式和 1/4、1/3、2/5、1/2、3/5、2/3、3/4、4/5、5/6、8/9、9/10 共 11 种 LDPC 码率。基于最大化数据传输效率,使得模式的 E_s/N_0 门限和数据传输效率均为递增变化,故将 DVB-S2 中的 QPSK 8/9、QPSK 9/10、8PSK 8/9、8PSK 9/10、16APSK 2/3、16APSK 8/9 和 16APSK 9/10 这 7 种模式省去。选取参数 64 800 码长,LDPC 为迭代译码方式,迭代最高次数为 50 次,仿真得到误码率为 10^{-5} 时各模式的 E_s/N_0 门限与数据传输效率 η ,如表 2 所示。

表 2 DVB-S2 各模式的 E_s/N_0 门限与数据传输效率

Tab.2 E_s/N_0 threshold and data transmission efficiency of each mode for DVB-S2

编号	MODCOD	η /(bit/symbol)	E_s/N_0 门限/dB
1	QPSK 1/4	0.477 0	-2.50
2	QPSK 1/3	0.642 5	-1.40
3	QPSK 2/5	0.769 1	-0.50
4	QPSK 1/2	0.967 7	0.88
5	QPSK 3/5	1.162 4	2.12
6	QPSK 2/3	1.293 8	3.01
7	QPSK 3/4	1.454 4	3.98
8	QPSK 4/5	1.560 5	4.59
9	QPSK 5/6	1.618 0	5.09
10	8PSK 3/5	1.743 0	5.39
11	8PSK 2/3	1.939 6	6.46
12	8PSK 3/4	2.180 9	7.78
13	8PSK 4/5	2.326 9	8.64
14	8PSK 5/6	2.426 2	9.21
15	16APSK 3/4	2.901 0	10.07
16	16APSK 4/5	3.095 2	10.90
17	16APSK 5/6	3.227 3	11.48
18	32APSK 3/4	3.629 3	12.62
19	32APSK 4/5	3.872 2	13.51
20	32APSK 5/6	4.037 4	14.09
21	32APSK 8/9	4.309 5	15.50
22	32APSK 9/10	4.362 9	15.79

每种模式的数据传输效率 η 为 BCH 编码效率 η_{BCH} 、LDPC 编码效率 η_{LDPC} 、调制效率 η_{MOD} 与组帧率 η_a 的乘积,如式(13)所示。

$$\eta = \eta_{\text{BCH}} \cdot \eta_{\text{LDPC}} \cdot \eta_{\text{MOD}} \cdot \eta_a \quad (13)$$

组帧率为有效数据与有效数据加上帧头和导频符号总帧长的比值。对于 DVB-S2 64 800 长帧, QPSK、8PSK、16APSK 和 32APSK 的组帧率分别为 0.973 5、0.973 2、0.970 9 和 0.971 7。

在确定了 ACM 各种模式的情况下,可以根据各模式的数据传输效率得到卫星一次过境的数据吞吐量。各模式的比特速率为

$$R_b = R_s \cdot \eta \quad (14)$$

将整个数传链路的模式选取结果分为 N 段,每一段连续采用同一个模式,则数据吞吐量为

$$T = \int_{\Delta t} R_b(t) dt = \sum_{n=1}^N R_b(n) \cdot \Delta t(n) \quad (15)$$

其中, $R_b(n)$ 为第 n 段模式传输的比特速率, $\Delta t(n)$ 为采用该模式的持续时间。

3.3 模式切换算法

由于信噪比估计必然存在误差,当实际信噪比低于由估计信噪比选取的模式门限时,接收端会发生错误译码,从而引起数据吞吐量的下降。解决这个问题可采用移位门限技术^[10]。

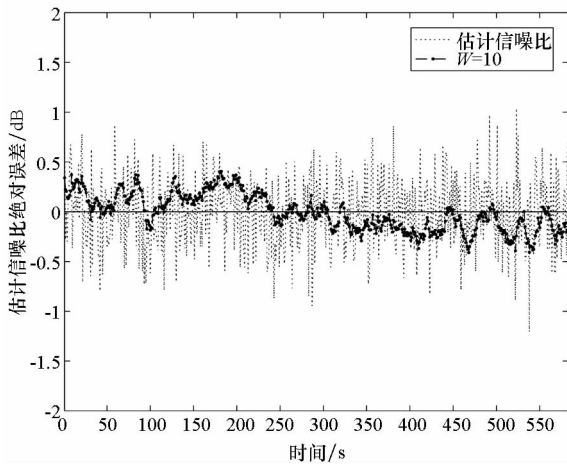
选取 $k_0=180$, $W=10$ 的 DA-ML 算法,晴天和降雨率为 100 mm/h 的雨天的信噪比估计平滑后的绝对误差如图 6 所示。

从图 6 中可看出,需将该曲线移到绝对误差为 0(直线)的上方区域,即需增加各模式的门限值,并根据平滑后绝对误差的范围将移位门限操作分成两部分,第一部分为星地距离持续减小的时候,此时绝对误差低于 0 的范围较小,故移位 m_1 dB;第二部分为星地距离持续增大的时候,此时绝对误差低于 0 的范围较大,故移位 m_2 dB。

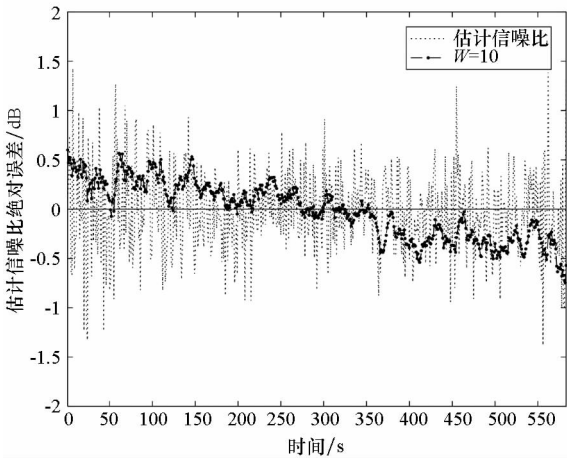
设 ACM 的 22 种编码调制模式表示为 CMS_k ,各自的 E_s/N_0 门限值为 λ_k ,数据传输效率为 η_k , $k=1,2,\dots,22$, $\widehat{SNR}(i)$ 表示第 i 次信噪比估计, $CMS_k(i)$ 表示第 i 次估计后选择第 k 种模式, $i=1,2,\dots,t$, t 为卫星过境总时间(单位为 s)。

则模式切换算法为

$$CMS_k(i) = \begin{cases} CMS_k & \lambda_k + m \leq \widehat{SNR}(i) < \lambda_{k+1} + m \\ & k = 1, 2, \dots, 21 \\ CMS_{22} & \widehat{SNR}(i) \geq \lambda_{22} + m \end{cases} \quad (16)$$



(a) 晴天
(a) Clear day



(b) 降雨率为 100 mm/h
(b) Rainfall rate in 100 mm/h

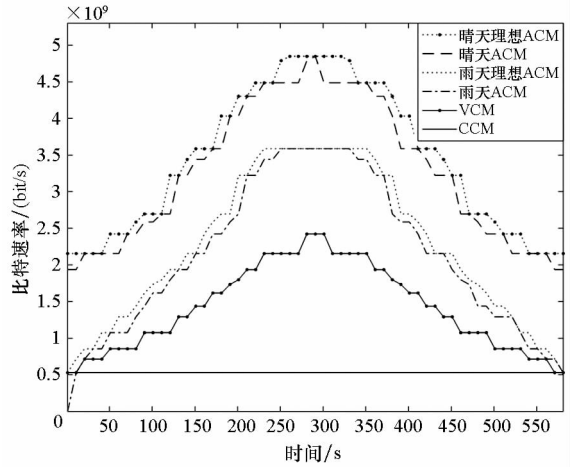
图 6 信噪比估计平滑后的绝对误差

Fig. 6 Absolute error after SNR estimation and smooth

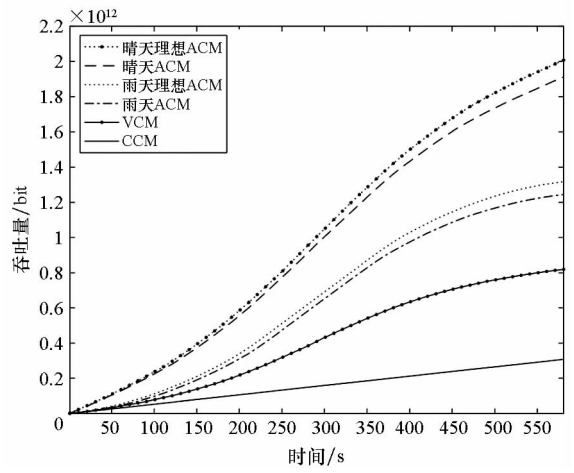
若 $SNR < \lambda_1$ 则需等待信道条件好时再进行数传, 通过多次仿真, 将最小绝对误差的相反数作为移位门限值的大小。当星地距离减小时, 移位 $m = m_1 = 0.4$ dB; 当星地距离增大时, 移位 $m = m_2 = 0.8$ dB。

4 仿真与结果分析

采用 $k_0 = 180$, $W = 10$ 的 DA-ML 信噪比估计算法, 移位门限 $m_1 = 0.4$ dB, $m_2 = 0.8$ dB。分别对晴天和降雨率为 100 mm/h 的雨天进行 ACM 链路模式设计, 并与 VCM 和 CCM 进行吞吐量比较, 其中 VCM、CCM 设定最远星地距离时的最大雨衰值为添加的备余量值, 备余量为 8.36 dB, CCM 为 QPSK 1/4 模式。仿真结果如图 7 所示, 三种传输体制数据吞吐量比较如表 3 所示。



(a) 比特速率比较
(a) Comparison in bit rate



(b) 吞吐量比较
(b) Comparison in throughput

图 7 三种传输体制的性能比较

Fig. 7 Performance comparison of three transmission systems

表 3 三种传输体制数据吞吐量比较

Tab. 3 Comparison of data transmission throughput of three transmission systems

传输体制	吞吐量/Gbit		相比于 ACM/%	
	晴天	雨天	晴天	雨天
理想 ACM	2012.0	1318.4	105.1	105.9
ACM	1915.1	1244.9	100.0	100.0
VCM		820.2	42.8	65.9
CCM		309.0	16.1	24.8

从图 7 中可看出, 晴天时 ACM 模式设计吞吐量比 VCM 吞吐量提升了 133.49%, 比 QPSK 1/4 CCM 吞吐量提升了 519.77%。降雨率为 100 mm/h 的雨天时 ACM 模式设计吞吐量比 VCM

吞吐量提升了 51.78%,比 QPSK 1/4 CCM 吞吐量提升了 302.88%。仿真结果表明,ACM 设计的数据吞吐量明显优于传统添加备余量的 VCM 和 CCM 体制传输的吞吐量。

5 结论

针对雨衰严重的近地卫星 Ka 频段数传提出 ACM 系统设计方法,首先通过链路预算估计晴天和最大降雨率下的信道变化范围,然后在信道估计和模式切换算法上分别采用平滑和移位门限技术,从而提高了估计精度和可靠性。ACM 传输体制能够根据信道情况自适应变化编码调制模式,无论晴天还是雨天,都能充分利用链路资源;ACM 模式设计传输的数据吞吐量远高于 VCM 和 CCM 传输的吞吐量。该设计方法同样能够适用其他卫星的数传链路。

参考文献 (References)

[1] McCarthy K, Stocklin F, Geldzahler B, et al. NASA's evolution to Ka-band space communications for near-earth spacecraft[C]//Proceedings of the SpaceOps Conference. Huntsville, AL: American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., 2010.

[2] Argota J A R, Fernandez A, Anitzine I, et al. Analysis of a rain attenuation time series from synthesizer and experimental satellite measurements[C]// IEEE Asia Pacific Microwave

Conference, 2017: 49-52.

- [3] 李炯卉,熊蔚明,梅凡. 优化卫星数传链路效率的 VCM 流程设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(10): 162-167.
- LI Jionghui, XIONG Weiming, MEI Fan. Design of a VCM-based satellite data transmission architecture for down-link efficiency enhancement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(10): 162-167. (in Chinese)
- [4] ETSI TR 102 376 V1.1.1 (2005-02). Digital video broadcasting (DVB); second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications[S]. Sophia-Antipolis; ETSI, 2005.
- [5] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems; P.618-13[S]. Geneva; ITU-R, 2017.
- [6] ITU-R. Characteristics of precipitation for propagation modelling; P.837-7[S]. Geneva; ITU-R, 2017.
- [7] ITU-R. Specific attenuation model for rain for use in prediction methods; P.838-3[S]. Geneva; ITU-R, 2005.
- [8] Cioni S, de Gaudenzi R, Rinaldo R. Adaptive coding and modulation for the forward link of broadband satellite networks[C]//IEEE Global Telecommunication Conference, 2003: 3311-3315.
- [9] Albertazzi G, Cioni S, Corazza G E, et al. On the adaptive DVB-S2 physical layer; design and performance[J]. IEEE Wireless Communications, 2005, 12(6): 62-68.
- [10] Pauluzzi D R, Beaulieu N C. A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(10): 1681-1691.