

卫星遥感数据高频谱效率传输模型及效能分析

蒋应富 刘波 刘辉 郭强

(上海卫星工程研究所,上海,201109)

摘要:提出了遥感卫星高频谱效率数据传输模型,根据遥感卫星高速数据传输链路余量预留较大的特点,充分利用自由空间损耗变化和雨衰预留余量,在满足信道误码率要求条件下,通过信道估计以最大数据传输量为目标实时调整卫星编码调制方案,可较大程度解决目前遥感卫星高速数据传输遇到的硬件资源和频率资源瓶颈问题,适用于各类轨道遥感卫星的星地通信和星星通信,具有较好工程应用价值。通过对多类卫星数据传输场景的效能分析,表明其相对传统低频谱效率技术可明显提高数据传输量。

关键词:遥感卫星;高频谱效率;传输模型;效能分析

中图分类号: V411.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2018)S1-0012-06

High Spectral Efficiency Transmission Model and Performance Evaluation for Remote Sensing Satellite

JIANG Yingfu, LIU Bo, LIU Hui, GUO Qiang

(Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai, 201109, China)

Abstract: According to the large link margin for high-speed data transmission on remote sensing satellite, an efficient transmission method based on adaptive coding and modulation (ACM) technology for remote sensing satellite is developed in this paper, which makes the best use of free-space loss and rain attenuation margin to achieve the most data transmission, for the satellite adjusting the modulation coding scheme (MCS) during the transmission. This method can effectively resolve the bottle-neck about hardware and frequency resource on high-speed data transmission of remote sensing satellite, which can be applied to satellite-satellite and satellite-earth station data transmission for almost all satellites. Finally, the efficiency of ACM for LEO and HEO remote sensing satellite is analyzed, and result proves that ACM is three times as large as CCM about data transmission.

Key words: remote sensing satellite; high spectral efficiency; transmission model; performance evaluation

国内遥感卫星探测正朝着高时间分辨率、高空间分辨率和高光谱分辨率方向发展,卫星载荷探测数据量越来越大,传输速率越来越高,而卫星通信频率资源受限,传统低频谱效率的数据传输方法面临巨大挑战。近年来,虽然星载激光、太赫兹等通信技术取得了诸多进展,但是微波通信依然具有其无可比拟的固有优势,发展高频谱效率数据传输方法将成为解决高数据率传输的重要手段。

传统的卫星数传系统采用高发射功率、低阶调制方式和大编码冗余,以保证地面终端的数据接收质量,其链路具有以下特性:(1)雨衰预留余量大,利用率低。如:对于 Ka 频段星地通信系统预留的降雨(暴雨)衰减一般约为 15 dB,以实现 99.99% 时间内可靠通信,而实际能达到或接近此种雨衰程度的降雨概率低于 0.01%,绝大部分天气情况为非雨天气(降雨衰减为 0),从而造成近 15 dB 信道

收稿日期: 2018-03-23; **修订日期:** 2018-05-30

通信作者: 蒋应富,男,硕士,工程师, E-mail: jiangyf5413@163.com。

引用格式: 蒋应富,刘波,刘辉,等. 卫星遥感数据高频谱效率传输模型及效能分析[J]. 南京航空航天大学学报,2018,50(S1):12-17. JIANG Yingfu, LIU Bo, LIU Hui, et al. High spectral efficiency transmission model and performance evaluation for remote sensing satellite[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(S1): 12-17.

资源长期浪费。(2)收发通信距离变化大,自由空间损耗波动大。对于低轨卫星(LEO)、中轨卫星(MEO)和大椭圆轨道(HEO)卫星等,星地通信的自由空间损耗变化范围较大,以 800 km 轨道高度的 LEO 卫星为例,20 GHz 星地通信的自由空间损耗由低接收仰角(5°)到高接收仰角(90°)的变化范围为 187.3~176.5 dB,波动达到了 10.8 dB。若卫星数传系统可灵活地根据通信链路环境实际情况,自动调节编码、调制方式以提高信道使用效率,可极大提升系统的数据传输量,针对于此,采用具有高频谱利用率、高链路使用率的自适应编码调制(Adaptive coding and modulation, ACM)技术^[1-2]将会成为解决数据传输压力的新颖手段,ACM 技术是系统对信道参数进行实时估计,以最大限度提高信道使用率为目标调整系统的调制与编码策略(Modulation coding scheme, MCS),从而实现信道高效利用和数据高速传输。

ACM 技术是第 II 代数字广播通信卫星(DVB-S2)的核心技术之一,但是遥感卫星与通信卫星数据传输方式具有较大区别,包括数据产生源头不同、数据传输路径不同和卫星轨道类型不同等,所以需对数字广播通信卫星的 ACM 技术进行改进,才能应用于遥感卫星,本文研究并提出适用于遥感卫星数据传输特点的 ACM 技术方案。

1 遥感卫星自适应编码调制技术

1.1 自适应编码调制技术改进方法

数字广播卫星轨道为地球同步轨道(GEO),具有通信卫星的典型特点:数据的发送端和接收端均位于地面,卫星转发器对上行数据进行转发,其 ACM 技术^[3-4]信息流向如图 1 所示。

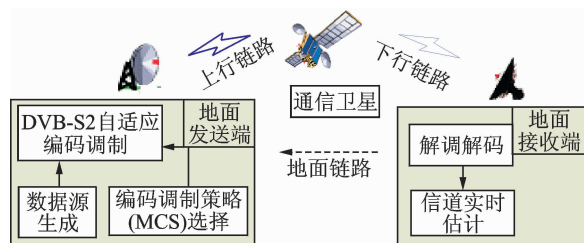


图 1 DVB-S2 广播卫星 ACM 技术信息流向

Fig. 1 Information flow of DVB-S2 broadcasting satellite's ACM

此种方案数据传输流向为“地面(发)-卫星(转)-地面(收)”,分别对应地面发送端、广播卫星和地面接收端 3 部分,由于遥感卫星与通信卫星工作方式区别较大,本文提出的新颖遥感卫星 ACM 技术方案见图 2。

对于“星地”传输方案,数据传输流向为“卫星

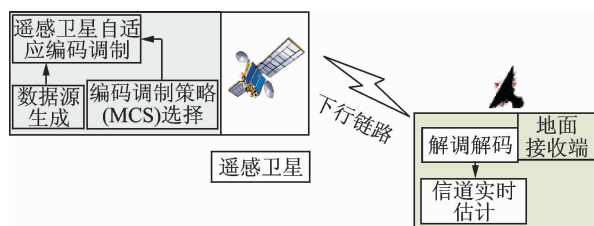


图 2 遥感卫星(星地)ACM 技术信息流向图

Fig. 2 Information flow of remote sensing satellite's ACM

(发)-地面(收)”,分别对应遥感卫星和地面接收端两部分。其工作流程如下:(1)卫星(发)载荷探测产生源数据,由数传分系统完成数据编码、调制等处理,通过下行链路发送地面(收);(2)地面(收)接收数据,同时对信道状态进行估计,将结果通过上行链路发送到卫星;(3)卫星根据信道状态切换到最佳 MCS,调整编码调制组合使链路工作在最优状态。对于“星星”传输方案,数据传输流向为“卫星 1(发)-卫星 2(收)”,卫星 1(发)根据收发两端的距离实时计算得到链路余量,实时切换 MCS 使链路工作在最优状态。

1.2 自适应编码调制系统典型模型

卫星遥感数据传输可分为星地通信和星星通信两类典型模型,卫星各种通信链路可由两类典型模型组合而成,两类通信模型工作流程分别如图 3 和图 4 所示。

星地通信模型信道环境具有多样性、复杂性和突发性等特点,基于星地距离实时计算,采用信道估计技术对信道环境进行实时、准确分析,从而合理选择自适应控制策略,自适应控制策略采用“闭环”控制方法。星星通信模型的信道环境单一(自由空间),信道环境具有可预知性等特点,基于星星距离实时计算可对信道环境进行比较准确预估,此种模型下自适应控制策略采用“开环”控制方法。

(1)星地信道状态分析:星地通信模型中,系统初始工作时,卫星对地发送导行码,用于探测星地信道的链路环境,地面对射频信号功率电平进行实时测量,同时对导行码进行解析和误码率统计,得到当前信道状态(信噪比 E_b/n_0)并反馈给卫星。

(2)调制编码策略选择:星地通信模型中,卫星接收到地面发送的信道状态后,综合卫星计算的星地距离,分析并选择优化的调制编码策略(MCS);星星通信模型中,由于星星距离具有可预知性和信道环境的单一性,通过星星链路余量的实时计算,以最大数据传输量为目标实时调整 MCS。

(3)编码调制方式切换:基于 MCS 选择信号,系统切换到对应的编码调制组合;若系统选用高阶

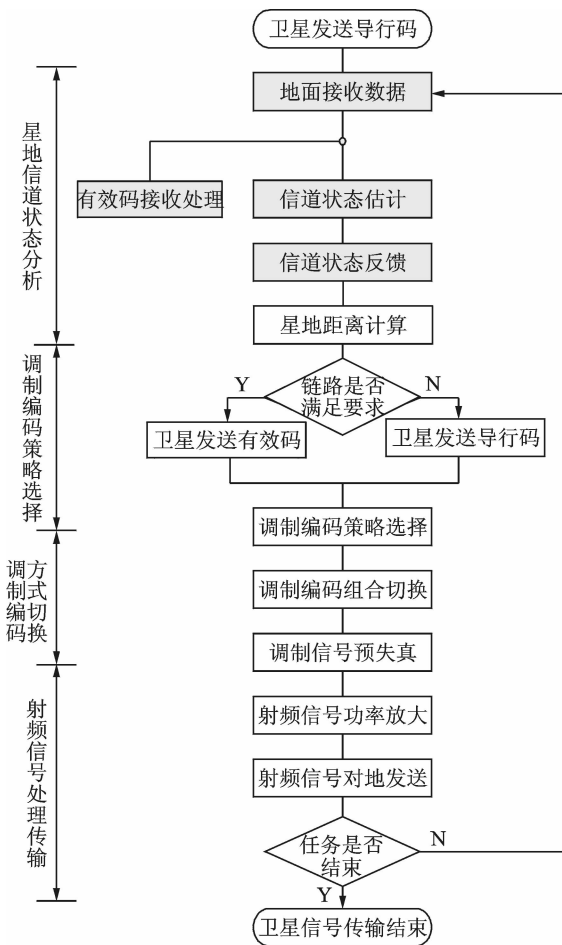


图3 星地通信模型“闭环”工作流程

Fig. 3 The “closed loop” workflow of the satellite-earth communication model

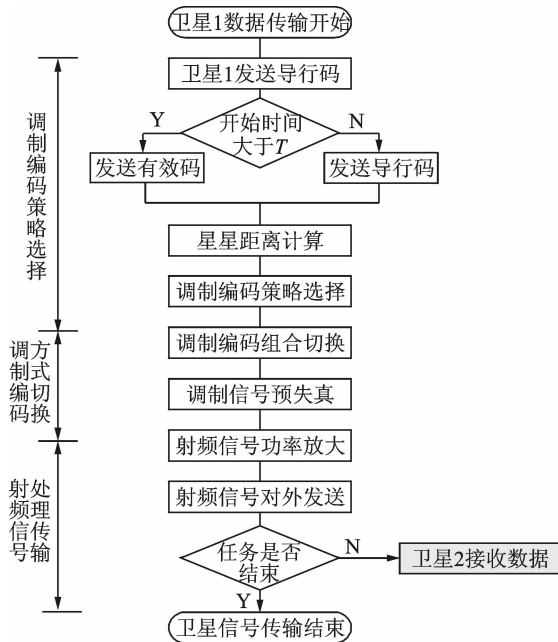


图4 星星通信模型“开环”工作流程

Fig. 4 The “open loop” workflow of the satellite-satellite communication model

导致信号畸变引起信号严重失真,从而影响数据接收质量。

(4) 射频信号处理传输:通过固态功率放大器或行波管放大器对射频信号功率放大,并通过天线对地面(或卫星)发射;也可通过有源相控阵天线直接放大并对地面(或卫星)发射。

1.3 信道估计及编码调制策略

卫星通信开始阶段,发送导行码用于建立星地同步,随后持续发送有效码(载荷探测数据封装其中);地面基于信号功率电平、信道误码率等对信道状态^[5-6]进行测定。其中信道误码率通过对导行码和有效码中插入分布引导符实时统计;分布引导符均匀地分布在码格式中,地面可及时、动态地跟踪到信道变化状态。

MCS 切换算法^[7]根据特定准则确定相应的切换门限。切换门限的准确性关系到自适应编码调制方案是否能发挥出其应有的性能,本文采用“基于信噪比门限判别法”,在满足误码率条件下依据数据传输量(吞吐量)最大准则,以信噪比作为MCS 切换门限的衡量因子。

1.4 调制-编码组合设计

DVB-S2 标准提供了包含 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8 等码率的 LDPC 编码^[8-9]与 QPSK, 8PSK, 16QAM, 32QAM 等调制方式^[10-11]的组合。经分析:(1)某些组合(如:8PSK 7/8)与相近组合(如:16QAM 3/4)相比,在较高信噪比时得到的频谱效率反而较低,或者某些组合(如:8PSK 2/3 与 16QAM 1/2 相比)在较高信噪比时频谱效率却相同;(2)平均频谱效率随着调制-编码组合数量快速上升,但数量增加到一定程度再增加时平均频谱效率将趋于稳定,增加不再明显,而调制-编码组合切换次数则随着数量的增加将会一直增大。本文确定得到以下编码调制方案,见表 1。

表1 ACM 技术编码-调制组合选择表

Tab. 1 MCS of ACM				
序号	MCS 模式	调制/编码组合	频谱效率/ (bit · s ⁻¹ · Hz ⁻¹)	(E _b /n ₀)/ dB
1	MCS-1	QPSK 1/2	1.000	1.35
2	MCS-2	QPSK 3/4	1.500	2.53
3	MCS-3	QPSK 7/8	1.750	3.69
4	MCS-4	8PSK 3/4	2.250	4.89
5	MCS-5	8PSK 5/6	2.500	5.81
6	MCS-6	16QAM 7/8	3.500	7.10
7	MCS-7	32QAM 5/6	4.167	8.57
8	MCS-8	32QAM 7/8	4.375	9.17

2 传输效能仿真

2.1 仿真分析 1

轨道高度为 800 km 的 LEO 卫星,数传工作

调制(如:8PSK, 16QAM 等)方式,则对调制信号进行预失真处理,以防止功率放大器的非线性特性

在 X 波段,设定采用 QPSK 调制、LDPC(1/2)编码的固定编码调制方式时传输码速率为 Q Mb/s,地面接收站接收仰角大于 5° ,其链路余量的变化因素主要为星地距离和降雨引起的射频信号衰减,星站最远距离为 2 872.68 km(5° 仰角),星站最近距离为 800 km(90° 仰角),综合考虑星地距离变化引起的自由空间损耗变化及降雨衰减等因素,分析结果见表 2。

表 2 LEO 轨道 MCS 使用比例分析表

Tab. 2 Proportion of MCS for LEO

序号	MCS 模式	使用时长/s	使用比例/%
1	MCS-1	87.42	11.35
2	MCS-2	75.01	9.74
3	MCS-3	77.63	10.08
4	MCS-4	77.66	10.09
5	MCS-5	76.45	9.93
6	MCS-6	90.55	11.76
7	MCS-7	133.00	17.27
8	MCS-8	152.20	19.77

由表 2 可知,低频谱效率的 MCS-1 模式使用比例为 11.35%,其主要分布在入境初始阶段和出境前,而随着星地距离减少、链路环境变好,系统逐渐切换到高频谱效率编码调制模式,覆盖了 MCS1~8 所有组合,并且高效率组合使用比例相对较大,频谱效率最高的 MCS-8 使用比例达到 19.77%。

由图 5 可知,卫星入境到出境过程中,链路余量变化范围达到了约 10.8 dB,若采用传统 CCM 技术则频谱效率持续不变;而使用 ACM 技术则随链路余量的增大频谱效率也随之增加,从而提高了数据传输量。由图 6 可知,ACM 技术所传输的数据总量达到了 $(2\ 239 \times Q)$ Mbit,而 CCM 计算传输的数据总量为 $(769 \times Q)$ Mbit,前者是后者的 3 倍,传输效能明显提升。

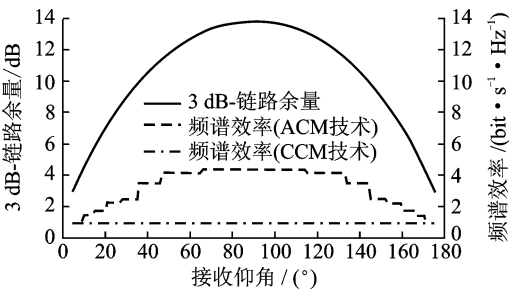


图 5 链路余量-频谱效率对应图(LEO)

Fig. 5 Link margin- spectral efficiency(LEO)

2.2 仿真分析 2

椭圆轨道卫星,其远地点 38 273 km,近地点 2 082 km,轨道倾角 63.4° ,数传工作在 Ka 波段,设定采用 QPSK 调制、LDPC(1/2)编码的固定编

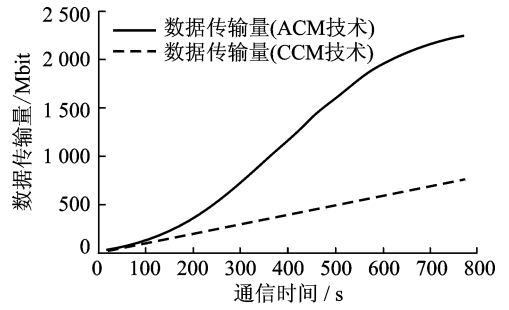


图 6 通信时间-数据总量对应图(LEO)

Fig. 6 Communication time-data size (LEO)

码调制方式时传输的码速率为 Q Mb/s,地面接收站接收仰角大于 5° ,链路余量的变化因素主要为星地距离和降雨引起的射频信号衰减,当地面接收位置设为远地点处的星下点位置时,星站最近距离 19 666.87 km(5° 仰角),星站最远距离 38 273 km (90° 仰角)。由于 Ka 频段对降雨引起的衰减比较敏感,本算例分两种情况进行对比分析。

(1)降雨衰减 10 dB 情况

设定降雨衰减为 10 dB 时,对 ACM 技术效能进行分析,结果见表 3。

表 3 HEO 轨道(雨衰 10 dB)MCS 使用比例分析表

Tab. 3 Proportion of MCS for HEO (Attenuation 10 dB)

序号	MCS 模式	使用时长/s	使用比例/%
1	MCS-1	19 932.33	54.03
2	MCS-2	6 693.12	18.14
3	MCS-3	4 547.41	12.32
4	MCS-4	3 141.42	8.52
5	MCS-5	2 576.51	6.98

由表 3 可知,由于雨衰较大使链路裕度相对较小,系统需维持在低阶调制、低编码效率方式工作获得高编码增益和低解调门限,以保持数据可靠性传输,低频谱效率的 MCS-1 模式使用比例为 54.03%,此种情况下最高用到 MCS-5,其使用比例为 6.98%。

由图 7 和图 8 可知,卫星入境到出境过程中,降雨衰减为 10 dB 情况下,链路余量的变化范围约 6.5 dB,ACM 技术所传输的数据总量为 $(51\ 439 \times$

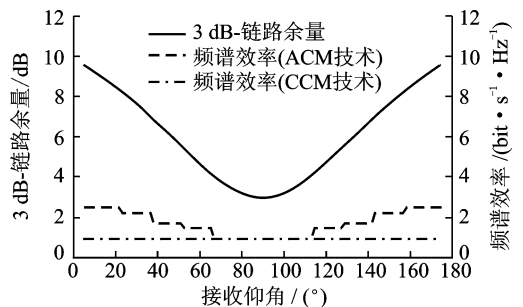


图 7 链路余量-频谱效率对应图(10 dB 雨衰)

Fig. 7 Link margin-spectral efficiency(Attenuation 10 dB)

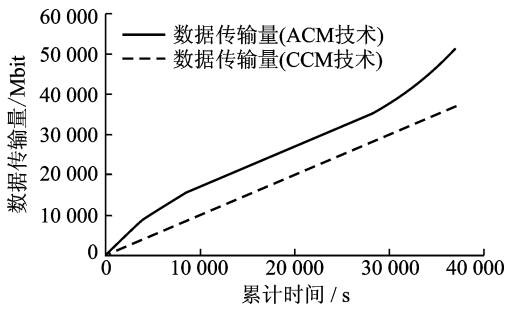


图8 通信时间-数据总量对应图(10 dB雨衰)

Fig. 8 Communication time-data size (Attenuation 10 dB)

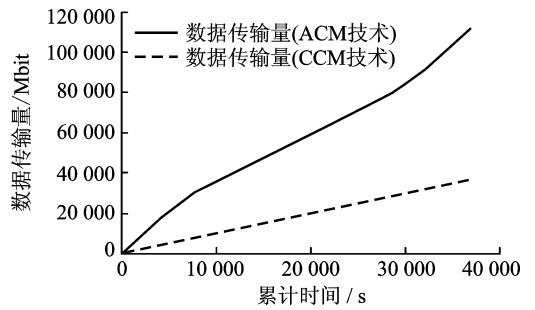


图10 通信时间-数据总量对应图(4 dB雨衰)

Fig. 10 Communication time-data size (Attenuation 4 dB)

Q) Mbit,而CCM技术传输数据总量为(36 890 * Q) Mbit,前者是后者的1.4倍。

(2)降雨衰减4 dB情况

设定降雨衰减为4 dB时,对ACM技术效能进行分析,结果见表4。

表4 HEO轨道(雨衰4 dB)MCS使用比例分析表

Tab. 4 Proportion of MCS for HEO (Attenuation 4 dB)

序号	MCS模式	使用时长/s	使用比例/%
1	MCS-4	10 841.91	29.38
2	MCS-5	10 505.85	28.47
3	MCS-6	6 695.41	18.14
4	MCS-7	4 980.12	13.49
5	MCS-8	3 867.51	10.48

由表4可知,由于雨衰相对较小使链路裕度增大,未使用MCS-1,MCS-2,MCS-3等低频谱效率模式,系统维持在高频谱效率模式工作,开始即工作在MCS-4,其使用比例为29.38%,频谱效率最高的MCS-8使用比例达到了10.48%。

由图9和图10可知,在降雨衰减4 dB情况下,开始通信的信噪比较好(约15.5 dB),直接工作在高频谱效率的MCS-8,随着星地距离增加,逐渐切换到星地距离最远处MCS-4,ACM技术传输数据总量为(111 765 * Q) Mbit,CCM技术传输数据总量为(36 890 * Q) Mbit,前者是后者的3倍。10 dB和4 dB两种雨衰条件下,由于链路裕度差异使得MCS切换策略不同,在相同可视弧段内,传

输的数据量差异明显,体现ACM技术的典型特点即自适应性,其在信道环境较好条件下,充分利用链路余量时系统数据传输效能得到较大提高。

3 结束语

本文提出了遥感卫星高频谱效率数据传输模型及实现方法,其充分利用自由空间衰减变化和雨衰预留余量等,自适应地调整卫星编码调制方式,通过对典型应用场景仿真分析,表明其相对于传统固定编码调制技术可较大提升数据传输效能,适用于各种轨道类型的遥感卫星高速数据传输,具有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 刘合焕. 宽带卫星通信中的高阶调制和高效编码技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
LIU Hehuan. High order modulation and efficient coding technology in broadband satellite communications[D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [2] 王昌怀. 基于DVD-S2标准的宽带卫星通信系统ACM应用研究[D]. 北京:北京邮电大学,2012.
WANG Changhuai. Research on ACM application of broadband satellite communication system based on DVD-S2 standard[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [3] STEFANO C, RICCARDO D G, RITA R. Adaptive coding and modulation for the forward link of broadband satellite networks[J]. IEEE Global Telecommunication Conference, 2003, 6(2): 3311-3315.
- [4] JAEYOON L, DONGWEON Y, WOJU L. Adaptive coding and modulation scheme for Ka band space communications[J]. Journal of Astronomy and Space Sciences, 2010, 27(2): 129-134.
- [5] 郭燕. DVB-S2系统信道估计算法的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
GUO Yan. Research on channel estimation algorithm for DVB-S2 system[D]. Wuhan: Wuhan University

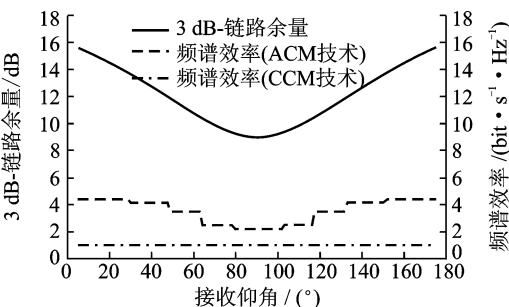


图9 链路余量-频谱效率对应图(4 dB雨衰)

Fig. 9 Link margin-spectral efficiency (Attenuation 4 dB)

- of Technology,2012.
- [6] PAULUZZI D R, BEAULIEU N C. A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel [J]. IEEE Trans on Commun, 2000, 48 (10): 1681-1691.
- [7] GOMES M, FALCAO G, SILVA V, et al. Flexible parallel architecture for DVB-S2 LDPC decoders[C]// Proceedings of the Global Telecommunications Conference. Washington, DC, USA: [s. n.], 2007: 3265-3269.
- [8] 燕威. 低密度奇偶校验码在空间通信中的关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2017.
YAN Wei. Research on key technologies of low density parity check codes in space communication[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [9] 张勇. 自适应 LDPC 编译码技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2017.
ZHANG Yong. Research on adaptive LDPC coding and decoding technology[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University,2017.
- [10] 唐成凯,张玲玲,廉保旺. 卫星高阶调制信号通信下非线性误差修正均衡方法[J]. 通信学报, 2017,38(1): 117-125.
TANG Chengkai, ZHANG Lingling, LIAN Baowang. Nonlinear error modified equalization algorithm in high-order modulation of satellite communication[J]. Journal on Communications, 2017,38(1): 117-125.
- [11] MISHRA J K, PRIYE V, RAHMAN B M A. Augmenting data rate performance for higher order modulation in triangular index profile multicore fiber interconnect[J]. Optics Communications, 2016, 371: 40-46.

(编辑:夏道家)