

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.06.011

引用格式:冯玉龙. 基于星上自适应 FEC 的卫星数据分发[J]. 电讯技术,2014,54(6):753-758. [FENG Yu-long. Satellite Data Distribution Based on Adaptive Packet-level FEC[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(6):753-758.]

基于星上自适应 FEC 的卫星数据分发*

冯玉龙**

(镇江船艇学院,江苏 镇江 212003)

摘 要:为了解决卫星数据分发系统中雨衰对下行链路的异构性影响,建立了基于再生转发器和多波束技术的卫星数据分发系统简化模型,提出了采用星上自适应分组级 FEC(Forward Error Control)的下行链路差错控制方法,针对下行链路的降雨等级自适应选择纠错码率,在不占用上行共享链路的情况下,实现下行链路差错控制的动态调整,给出了采用 RSE 码的星上自适应 FEC 的算法公式,通过 MATLAB 软件和端到端的 FEC 技术进行了仿真比较分析,结果表明,当下行链路降雨率小于 50% 时,网络吞吐率可提高 12% ~25%。该策略可以为多波束宽带卫星数据分发系统的设计提供参考。

关键词:多波束卫星;数据分发;下行差错控制;分组级 FEC;雨衰;异构性

中图分类号:TN927 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)06-0753-06

Satellite Data Distribution Based on Adaptive Packet-level FEC

FENG Yu-long

(Zhenjiang Watercraft College,Zhenjiang 212003,China)

Abstract:To eliminate the influence of rain attenuation on satellite downlink heterogeneity in satellite data distribution system,a satellite data distribution system model which adopts satellite regenerator and multi-beam technology is built,and the downlink error control method based on the technology of adaptive packet-level FEC is presented,which changes the correcting code rate according to the rain grade,and realizes the dynamic adjustment of downlink error control with the uplink not being occupied,the arithmetic expressions of the satellite adaptive forward error control(FEC) which adopts RSE code are deduced. Finally,the method is compared with the end to end FEC technology by simulating in MATLAB software and the result shows that the scheme can improve the network throughput efficiency by 12% ~15% when the downlink rain rate is below 50%. Therefore,the method can be consulted for design of multi-beam satellite data distribution system.

Key words:multi-beam satellite;data distribution;downlink error control;packet-level FEC;rain attenuation;heterogeneity

1 引 言

在传统卫星数据分发系统中,为了解决雨衰等因素对文件分发可靠性的影响,一般采用基于端到端的分组级 FEC(Forward Error Control)技术。但由于卫星接收站所在的地理位置跨度较大,所处区域不同,降雨等级不同,降雨对卫星下行链路的影响往往呈现异构性的特点,而端到端的 FEC 技术采用统一的纠错码率,对于处在不同降雨区域的接收端来说,带宽公平利用的问题一直无法很好地解决,进而影响了卫星数据分发系统的整体性能。

目前,关于改善卫星数据分发系统性能的方法大致有两类,一类是选择新的 FEC 编码方式,提高

* 收稿日期:2013-11-15;修回日期:2014-02-18 Received date:2013-11-15;Revised date:2014-02-18

** 通讯作者:fdragon_11@163.com Corresponding author:fdragon_11@163.com

网络吞吐率,如 Raptor 码^[1]、LDPC 码^[2],缺点是增加了编译码的复杂度;一类是优化现有的 FEC 技术,提高网络吞吐率,如文献[3]中提出了一种包组联合的自适应 FEC 技术,依托该技术网络吞吐率有所提高,但关联冗余包丢失时,性能将急剧恶化;文献[4]给出了一种冗余递增的分组级 FEC 策略,一定程度上改善了吞吐率,但并未考虑到下行链路的异构性问题;文献[5]给出了一种基于 FEC+ARQ 的解决策略,通过接收端对误码率的检测并定时向发送端进行报告,自适应改变 FEC 纠错码率,但过大的回传时延忽略了用户对多媒体数据的视听效果。以上两类方法,都是基于端到端的 FEC 技术进行的优化改善,因为冗余分组占用上行共享链路,所以都无法根本解决降雨对下行链路的异构性影响。文献[6]中提出了一种采用预测估值思想来调整码率的动态控制策略,但由于不同区域降雨规律变化较大,预先估值的不确定性同样可能产生冗余开销,降低网络吞吐率。针对下行链路的异构性问题,本文提出基于星上自适应 FEC 的数据分发解决策略,即依托再生转发器和多波束技术建立卫星数据分发系统,在星上采用分组级 FEC 技术,通过触发式回传信令获取不同下行波束的降雨等级,根据降雨等级选择纠错码率,从而实现对下行链路差错控制的动态调整,提高网络吞吐率。

2 基于再生转发器和多波束技术的卫星数据分发系统模型

为了解决下行链路的异构性问题,构建如图 1 所示的基于再生转发器和多波束技术的卫星数据分发系统模型。

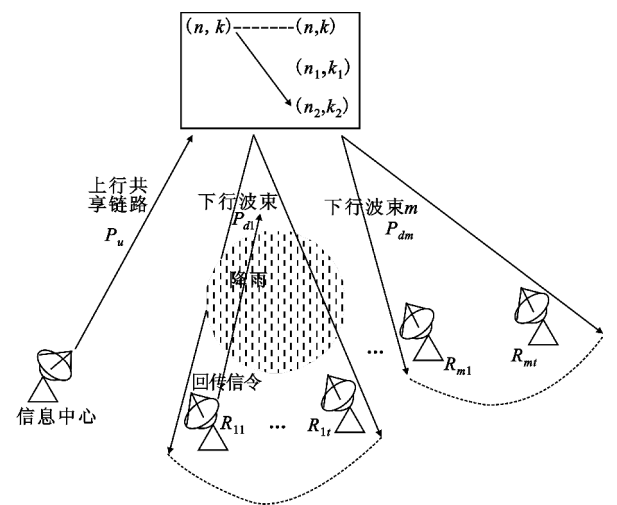


图 1 卫星数据分发系统模型

Fig. 1 Satellite data distribution system model

图 1 中, P_u 表示上行共享链路的分组出错率,假定有 m 个下行波束,各下行波束内的分组出错率为 P_{dm} ,波束内接收端密度为每波束 t 个接收端,接收端配有降雨检测传感器。星上再生处理器设有码率转换开关,根据回传信令自适应调整纠错码率,如没有收到回传信令,则直接转发。

由于卫星数据分发系统通常工作在 Ku、Ka 等频段,降雨衰耗是造成分组出错的主要因素。其中降雨对上行链路的影响通常采用自动上行链路功率控制的方式来消除,所以这里主要针对降雨等因素对下行链路造成的异构性影响,因为卫星是不会因为局部区域降雨而进行星上功率调节的^[7]。假设各波束内接收端受到降雨影响相同,我们参照文献[7]给出了下行链路信道差错模型,其中,当降雨等级在暴雨以上时,数据分发系统将无法正常工作,因而没有给出取样值。

表 1 卫星数据分发系统下行信道差错模型

Table 1 Satellite data distribution system downlink channel error model

类型	误比特率 b_d	b_d 取样值	时间 分布	说明
晴天 多云	$<1\times10^{-11}$	1×10^{-11}	95%	没有雨衰
弱 降雨	$1\times10^{-11} \sim 1\times10^{-6}$	1×10^{-6}	3%	实际雨衰值 小于降雨余量
强 降雨	$1\times10^{-8} \sim 1\times10^{-4}$	1×10^{-4}	1.5%	实际雨衰值 大于降雨余量
暴雨	$>1\times10^{-4}$		0.5%	

3 星上自适应 FEC 的方法描述

结合图 1 建立的卫星数据分发系统模型,星上自适应 FEC 的方法描述如下:初始状态,发送端将文件按照默认纠错码率(对应大部分接收端的多云和晴朗的信道环境)进行编码发送,卫星收到数据后实行直接转发,接收端以默认码率解码;如果卫星收到任何波束内接收端的回传信令,则表示该波束受降雨影响,接收端可能因此无法正确恢复文件,进行同步确认后,停止对相应波束直接转发数据,而是对后续文件进行解码,并以新码率重新编码发送到指定波束覆盖的接收端中,其他未受降雨影响的波束仍实行直接转发。该策略采用触发式回传,回传信令开销只在降雨开始和结束之后,几乎可以忽略不计。

其中,码率调整算法描述如下:假定发送端采用 (n, k) RSE 编码^[8,3],当接收端传感器检测到降雨

时,会根据降雨等级产生相应的码率调整指令回传给卫星,以提高纠错效果,星上处理器收到指令后以 α 为梯度进行码率调整,其中梯度 α 的定义是冗余率的提高比例,调整后编码为 (x, k) , 则

$$\frac{(x-k)/x}{(n-k)/n}=1+\alpha \tag{1}$$

可得出

$$x=\frac{nk}{(1+\alpha)k-\alpha n} \tag{2}$$

梯度 α 的值不能太小,因为太小不能满足纠错效果,而梯度过大会降低传输效率, α 范围应在 $[0.2,0.5]$ 区间内。对照下行信道的差错模型,表 2 给出了降雨等级和码率调整的对应关系。

表 2 降雨等级和码率调整关系表

Table 2 Relation between rain level and code rate changing		
降雨等级	纠错码率	码率调整 指令/b
晴天、多云	(n, k)	
弱降雨	$(\lceil \frac{nk}{(1+\alpha)k-\alpha n} \rceil, k)$	01
强降雨	$(\lceil \frac{nk}{(1+2\alpha)k-2\alpha n} \rceil, k)$	10

注: $\lceil x \rceil$ 表示 x 取上整数。

从表中还可以看出,码率调整指令只有 2 b 开销,所以回传指令几乎就等于 1 个 IP 报头开销,由于是触发式回传,只在降雨前后产生 $a(a = \text{接收端到卫星的传输时延} \times \text{接收端的回传指令速率} \times 2)$ 个回传指令开销,和传输总文件大小相比几乎可以忽略不计。

4 算法性能分析

假设发送文件大小为 f (单位 B),分组中信息长度为 I (单位 B),则一个文件打包为 $\lceil f/I \rceil$ 个分组,分组长度为 s (单位 B),下行波束数量为 r 个,每波束接收机数量为 t 个,受降雨影响的波束为 $y_w (w \in \{1, 2\})$,分别对应弱降雨、强降雨)个,上行链路分组出错率用 p_u 表示,未受降雨影响的波束分组出错率相同均用 p_d 表示,受降雨影响的分组出错率用 p_{d_w} 表示。在评价算法的性能时,我们主要针对文件正确分发率 β 和网络吞吐率 T 两个指标进行分析。

要想使文件成功被分发,则必须使所有 r 个波束内的接收机都成功接收到文件的全部分组,所以在没有采用 FEC 的情况下,文件正确分发率 β 为

$$\beta=[(1-p_u)(1-p_d)^{(r-\sum_{w=1}^2 y_w)t} \prod_{w=1}^2 (1-p_{d_w})^{y_w t}]^{\lceil f/I \rceil} \tag{3}$$

其中

$$p=1-(1-b)^{8s} \tag{4}$$

当采用基于端到端的 FEC 策略(下文简称“普通 FEC”),即 (n, k) RSE 编码,则一个文件被分割成 $\lceil f/I \rceil/k$ 个 FEC 块。要想使文件成功被分发,必须使所有 r 个波束的接收机都能成功收到每个 FEC 块的任意 k 个分组,因而文件正确分发率 β_F 为

$$\beta_F=\left[\frac{\sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1-p_u)^i p_u^{n-i} \cdot \left[\sum_{j=k}^i \binom{i}{j} (1-p_d)^j p_d^{i-j}\right]^{(r-\sum_{w=1}^2 y_w)t}}{\prod_{w=1}^2 \left[\sum_{j=k}^i \binom{i}{j} (1-p_{d_w})^j p_{d_w}^{i-j}\right]^{y_w t}}\right]^{\lceil f/I \rceil/k} = \left[\frac{\sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1-p_u)^i p_u^{n-i} \cdot \left[\sum_{j=k}^i \binom{i}{j} (1-p_d)^j p_d^{i-j}\right]^{rt}}{\left[\sum_{j=k}^i \binom{i}{j} (1-p_d)^j p_d^{i-j}\right]^{rt}}\right]^{\lceil f/I \rceil/k} \tag{5}$$

当采用星上自适应 FEC 策略(下文简称“自适应 FEC”),发送端采用 (n, k) RSE 编码,星上采用 (n_w, k) RSE 编码,则文件正确分发率 β_{ZF} 为

$$\beta_{ZF}=\left[\frac{\sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1-p_u)^i p_u^{n-i} \cdot \left[\sum_{j=k}^i \binom{i}{j} (1-p_d)^j p_d^{i-j}\right]^{(r-\sum_{w=1}^2 y_w)t}}{\prod_{w=1}^2 \left[\sum_{v=k}^{n_w} \binom{n_w}{v} (1-p_{d_w})^v p_{d_w}^{n_w-v}\right]^{y_w t}}\right]^{\lceil f/I \rceil/k} \tag{6}$$

其中

$$n_w=\frac{nk}{(1+w\alpha)k-w\alpha n} \tag{7}$$

下面我们来分析一下网络吞吐率。影响网络吞吐率的主要有编码引起的冗余包开销、分组报头开销和丢包开销,因此,采用普通 FEC 的网络吞吐率 T_F 为^[9]

$$T_F=\frac{k}{n} \cdot \frac{I}{s} \cdot \beta_F \tag{8}$$

采用自适应 FEC 后的吞吐率 T_{ZF} 为

$$T_{ZF}=\frac{k}{n(1-\frac{\sum_{w=1}^2 y_w}{r})+\sum_{w=1}^2 n_w \frac{y_w}{r}} \cdot \frac{I}{s} \cdot \beta_{ZF} \tag{9}$$

5 仿真与分析

下面我们来看一下算法的仿真性能,首先设置

仿真共性参数,考虑到硬件实现的复杂度引起的时延问题,一个 FEC 块的分组数量取 $k=10$,RSE 码长取 8 b,参照文献[9]的仿真结论,RSE 码的最佳分组长度为 128 B,因而这里我们取分组长度为 $s=128$ B,IP 报头长度为 $s-l=24$ B,上行共享链路误比特率取值为 1×10^{-11} ,下行链路误比特率对应不同的降雨程度取样值参照表 1。以受降雨影响的下行波束值变化来反映异构性带来的影响,参照表 1 的降雨时间分布,假定受弱降雨和强降雨影响的波束比例为 2 : 1,其他未受降雨影响的下行波束误比特率相同。

图 2 给出了没有采用 FEC、采用普通 FEC 和自适应 FEC 3 种策略下文件正确分发率随受降雨影响波束值变化的情况。从图 2 中可以得出如下结论:

- (1)没有采用 FEC 的分发系统在有强降雨影响时,无法正常工作;
- (2)初始纠错码率相同时,自适应 FEC 的正确分发率明显高于普通 FEC,但要想保证 99% 以上的正确分发率以确保系统正常工作,初始纠错码率必须达到 $n-k=6$;
- (3)随着降雨影响波束的增多,普通 FEC 文件正确分发率的衰落速度明显高于自适应 FEC。

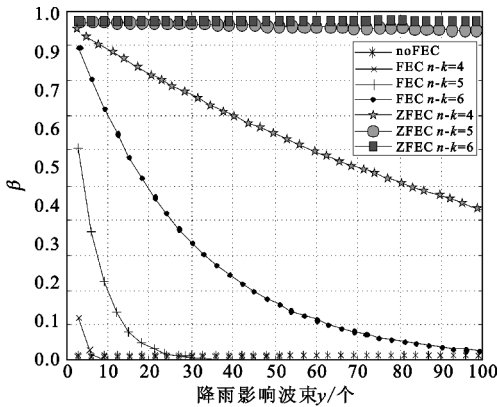


图 2 3 种策略下文件正确分发率与受降雨影响波束的关系 ($f=128$ kB, $\alpha=0.2$)

Fig. 2 The relation between the file right distributing rate and the beams affected by rain ($f=128$ kB, $\alpha=0.2$) under three tactics

图 3 给出了在保证同样文件正确分发率下,采用普通 FEC 和采用自适应 FEC 的网络吞吐率比较。从图 3 中可以看出:

- (1)普通 FEC 要想达到和自适应 FEC 同样的 99% 以上的文件正确分发率,其纠错码率选择至少要达到 $n-k=10$ 以上,这与算法的理论结果是一致的;
- (2)在保证同样的文件正确分发率条件下,采用自适应 FEC 的网络吞吐率明显高于普通 FEC;

(3)随着降雨波束增多,采用自适应 FEC 的网络吞吐率趋近于普通 FEC,这是因为当降雨波束越多时,纠错码的冗余率越高,越接近普通 FEC 的纠错码率,当降雨区域覆盖所有波束时,动态调整策略几乎失效,两者吞吐率接近一致,但实际中,这种情况是极其少见的,否则异构性问题也不会产生,据气象经验统计,较合理的降雨区域概率应该在 5% ~ 40% 之间,这种情况下,从图中可看出,自适应 FEC 的网络吞吐率提高至少在 15% 以上。

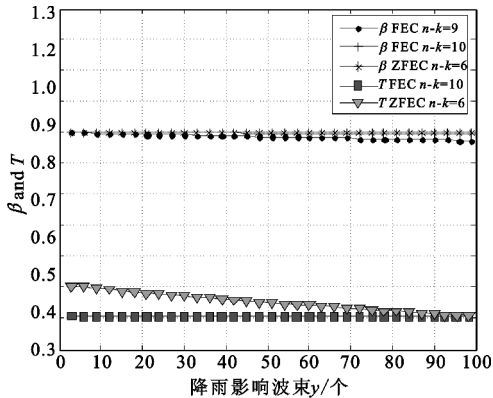


图 3 在保证同样的正确分发率下普通 FEC 和自适应 FEC 的吞吐率比较 ($f=128$ kB, $\alpha=0.2$)

Fig. 3 The throughput comparison between normal FEC and adaptive FEC ($f=128$ kB, $\alpha=0.2$) under the same right distributing rate

由图 3 可知,当文件大小在 128 kB 时,自适应 FEC 需要初始纠错码率达到 $n-k=6$ 才能保证 99% 以上的文件正确分发率,而普通 FEC 必须达到 $n-k=10$,那么随着分发文件的增大,两者的情况又如何呢? 图 4 给出了降雨波束 5% 为时,两种策略下文件正确分发率随着文件 f 大小变化的情况。

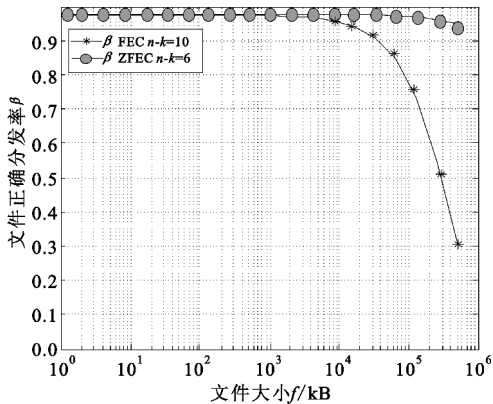


图 4 降雨波束为 5% 时两种策略的文件正确分发率随分发文件大小变化情况 ($y=5$, $\alpha=0.2$)

Fig. 4 The file right distributing rates of the two tactics change as the file size varies ($y=5$, $\alpha=0.2$) when the rate of the beams affected by rain is 5%

从图 4 中可以看出,在降雨波束为 5% 时,要想保证 99% 以上的文件正确分发率,普通 FEC 分发文件最大是 10 MB,而自适应 FEC 则可以达到 256 MB,这是因为尽管普通 FEC 的编码冗余度为 10 时表面上大于自适应编码的冗余度 6,但自适应编码的冗余度只是初始发送端的冗余度,当有降雨时,在星上会根据码率调整公式重新编码发送至降雨波束,此时对应弱降雨和强降雨的自适应编码的冗余度分别为 9 和 12,因此,在文件较小时,虽然两者都能满足 99% 的正确分发率,但随着分发文件的增大,普通 FEC 的性能下降严重;在吞吐率上,由于自适应 FEC 只针对降雨波束进行星上二次编码,不占用上行共享链路和未降雨下行链路,所以优势明显。显然,普通 FEC 对分发文件大小更敏感,不能满足视频等多媒体文件的分发要求,否则就需要提高冗余率,而这将进一步降低网络的吞吐率,影响传输质量。

由图 4 的分析可知,当降雨波束为 5% 时,普通 FEC 对于视频等多媒体文件的传输已经出现了困难,那么随着受降雨影响的波束增多,自适应 FEC 的变现如何呢? 图 5 给出了自适应 FEC 文件正确分发率随着降雨波束和文件大小变化的情况。

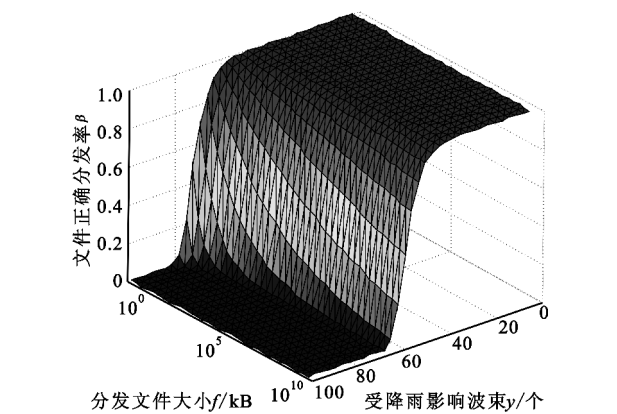


图 5 自适应 FEC 的文件正确分发率随降雨波束和分发文件大小变化情况

Fig. 5 The file right distributing rates of the adaptive FEC change as the beams are affected by rain and the file size varies

从图 5 中可以看出,采用自适应 FEC 对分发文件大小的敏感度不大,其分发正确率主要受降雨波束的影响。图 6(a)通过对图 5 进行水平投影给出了在保证 99% 文件正确分发率下自适应 FEC 对降雨波束和文件大小的要求,更加形象地说明了图 5 的结论。综合图 5 和图 6(a)可以看出,当降雨波束超过 40%

时,文件正确分发率衰减很快,系统将无法正常工作,当然,通过增加梯度值的方法,仍然可以提高文件正确分发率,但也会使网络的吞吐率有所降低。图 6(b)给出了梯度 α 增加 0.1 时,降雨波束和文件大小对分发率影响的变化,从图 6(b)中可以看出,当梯度值增加 0.1 时,降雨波束对分发率的影响下降了 25%。

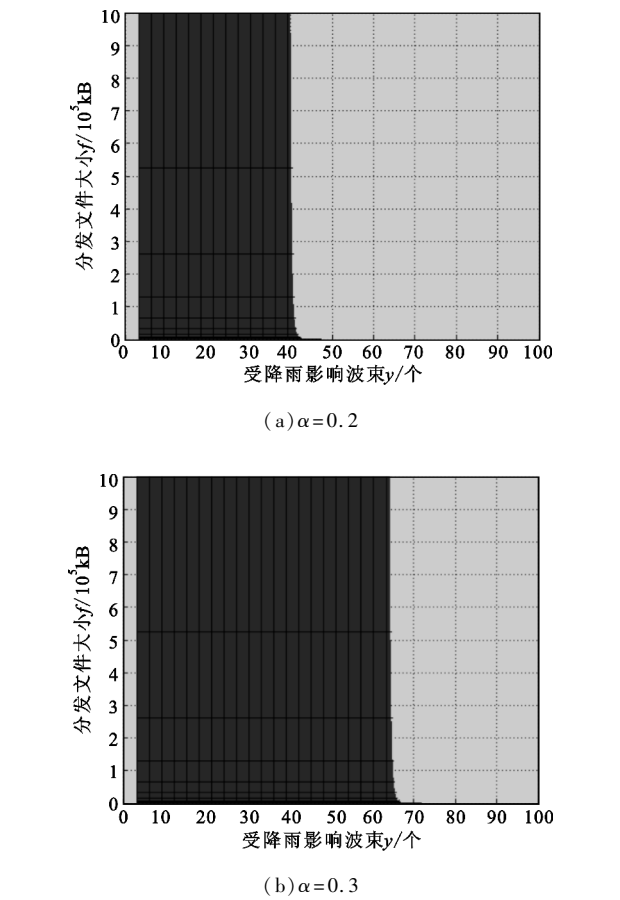


图 6 保证 99% 正确分发率下自适应 FEC 对降雨波束和分发文件大小的要求

Fig. 6 The demand of adaptive FEC to the beams affected by rain and the file size ($\alpha=0.2, 0.3$) when the file right distributing rate is assured to 99%

6 结束语

卫星数据分发系统具有距离和通信成本无关等优势,一直是应急通信和军事通信采用的重要手段。针对降雨对卫星下行链路的异构性影响。本文提出了一种基于星上自适应 FEC 的卫星数据分发策略,并通过仿真和传统的基于端到端的 FEC 策略进行了比较分析。结果表明,采用自适应 FEC 策略的卫星数据分发系统网络吞吐率明显提高,且对分发文件大小不敏感,当降雨波束增加时,鲁棒性更

强,还可以通过调整梯度值来进一步改善降雨波束的影响,该策略的思想可以为多波束卫星数据分发系统设计师提供理论参考。下一步需要继续研究和解决的问题主要有:该策略和端到端 FEC 策略的传输时延仿真分析;当采用不同编码方式时,该策略的可行性如何以及性能变化情况;进一步构建接近实际的虚拟仿真环境,为该策略的硬件实现方案论证奠定基础等。

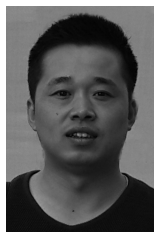
参考文献:

- [1] 葛新,龙红卫,刘榕,等. Raptor 码在卫星广播通信中的应用及其分析[J]. 通信技术,2009,42(5):5-7.
GE Xin, LONG Hong-wei, LIU Wei, et al. Application and analysis of raptor code in satellite broadcast communication[J]. Communication Technology, 2009, 42(5):5-7. (in Chinese)
- [2] 肖扬,范俊,黄希. DVB-S2 标准的 LDPC 码改进[J]. 铁道学报,2011,33(2):52-59.
XIAO Yang, FAN Jun, HUANG Xi. Improvement in LDPC Codes in DVB-S2 standard[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2):52-59. (in Chinese)
- [3] 林晓锋. 自适应 FEC 丢包恢复技术的研究[D]. 北京:北京邮电大学,2010.
LIN Xiao-feng. Research on Adaptive FEC packet loss recovery scheme[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2004. (in Chinese)
- [4] 路利宁,余玉材,刘纯青. 一种卫星单向网络中冗余递增的数据分发机制[J]. 科学技术与工程,2010,10(19):4668-4673.
LU Li-ning, YU Yu-cai, LIU Chun-qing. Incremental redundancy-data distribution scheme over unidirectional satellite networks[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(19):4668-4673. (in Chinese)
- [5] 杨宗凯,彭杰,余江. 实时通信中的自适应前向纠错方案的设计[J]. 计算机工程与科学,2007,29(8):43-45.

YANG Zong-kai, PENG Jie, YU Jiang. Design and implementation of an adaptive Forward Error Correction scheme for real-time video communications[J]. Computer Engineering & Science, 2007, 29(8):43-45. (in Chinese)

- [6] 杨富银,黄焱,张白愚. DVB-S2 网络中优化资源分配的新方案[J]. 电视技术,2012,36(15):1-4.
YANG Fu-yin, HUANG Yan, ZHANG Bai-yu. New approach for optimized resources application in DVB-S2 networks[J]. Video Engineering, 2012, 36(15):1-4. (in Chinese)
- [7] 周坡. Ka 频段卫星信道中 IP 可靠组播协议研究[D]. 南京:解放军理工大学,2004.
ZHOU Po. IP reliable multicast protocol research on Ka band satellite channel[D]. Nanjing: PLA University of Science of Technology, 2004. (in Chinese)
- [8] Rizzo L. Effective erasure codes for reliable computer communication protocols[J]. Computer Communication Review, 1997, 27(2):24-36.
- [9] 张更新,张有志,周坡. 卫星数据分发系统中的分组级 FEC 技术性能分析[J]. 电子与信息学报,2006,28(1):112-115.
ZHANG Geng-xin, ZHANG You-zhi, ZHOU Po. The performance analysis of applying packet level FEC to satellite data distribution systems[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006, 28(1):112-115. (in Chinese)

作者简介:



冯玉龙(1981—),男,黑龙江巴彦人,2006 年于解放军理工大学获硕士学位,现为讲师,主要从事船舶指挥与信息系统方面的教学科研工作。

FENG Yu-long was born in Bayan, Heilongjiang Province, in 1981. He received the M. S. degree from PLA University of Science and Technology in 2006. He is now a lecturer. His research concerns watercraft commanding and information systems.

Email:fdragon_11@163.com