

卫星数据分发系统中的分组级 FEC 技术性能分析

张更新 张有志 周 坡

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)

摘 要 本文根据所给出的信道差错模型和里德所罗门删除码(RSE)编码技术,研究了在卫星数据分发系统中采用分组级前向纠错(FEC)技术的文件成功分发概率和吞吐量效率与文件长度、分组长度、接收站点数及 RSE 码纠错能力之间的关系,所得到的结论对于卫星数据分发系统中的参数选择及性能优化具有指导意义。

关键词 分组级 FEC, 卫星通信, 数据分发

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)01-0112-04

The Performance Analysis of Applying Packet Level FEC to Satellite Data Distribution Systems

Zhang Geng-xin Zhang You-zhi Zhou Po

(Nanjing Institute of Communication Engineering, Nanjing 210007, China)

Abstract Based on the given channel error model and Reed-Soloman Erasure (RSE) coding scheme, the relation between file successful distribution probability as well as throughput efficiency versus length of file, length of packet, number of receiving stations and the error correcting capacity of RSE is studied in the paper. The results are valuable for the parameter selection and performance optimization in satellite data distribution systems.

Key words Packet level FEC, Satellite communications, Data distribution

1 引言

卫星数据分发是一种充分利用了卫星天然广播特性的应用方式,它可以把同一个 IP 数据包通过单播、组播和广播 3 种传输方式同时分发到一个或多个接收者。由于卫星信道的平均分组差错率要远高于地面光纤系统的,并且在某些条件(如恶劣气候、受到干扰等)下其分组差错率会很高,因此,必须要采取一些措施来降低分组差错率,否则可能会严重影响到卫星数据分发系统的有效性、可靠性和实时性。为此,需要采取适当的差错控制措施来降低卫星数据分发系统的平均分组差错率。

2 卫星数据分发系统的信道差错模型

在卫星数据分发系统中,作为信息源的数据分发中心将信息通过同一条上行链路发送到卫星,然后由卫星转发给 r 个接收机。由于各接收机分处不同的地点,其工作环境和地球站技术指标可能各不相同,导致各个接收用户的下行链路不完全相同,也就是说,在卫星数据分发系统中,各接收用户具有相同的上行链路误码特性,但各个用户的下行链路具

有不同的误码特性。图 1 给出了卫星数据分发系统的简化模型^[1,2],图中 b_u 和 p_u 分别为上行链路的误比特率和分组出错概率, b_{d_m} 和 p_{d_m} 分别为第 m 个接收机下行链路的误比特率和分组出错概率。需指出的是,对于目前使用的透明转发器,上行链路噪声是累积到下行链路的,其上、下行链路信道误码实际是归结到接收站来计算的,这里为分析的需要,假设把上行链路和下行链路的误码分别处理。

由于卫星数据分发系统通常工作在较高频段(如Ku、Ka 频段),降雨衰耗是影响信道平均分组差错率的主要因素。降雨分为上行降雨和下行降雨,它们的影响是不同的,上行降雨影响的是共享链路,造成的丢失为相关丢失,但发送方一般能够及时发现,通过采用自动上行链路功率控制(AUPC)的方式来消除降雨的影响。下行降雨则不同,卫星不会因局部覆盖区内的降雨而进行星上功率调节,因此下行降雨直接造成雨区内接收站信道条件的急剧恶化,从而使丢包率增大。与此同时,雨区外的信道条件又维持不变,下行降雨直接造成了卫星分发网络的异构性^[1,2]。

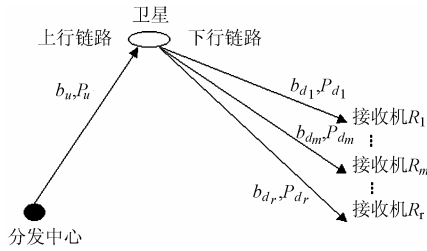


图 1 卫星数据分发系统的简化模型

据此, 对于下行链路, 根据雨衰对通信的影响, 可以分为 3 种情况, 如表 1 所示^[2]。需说明的是, 对于强降雨情况, 其误比特率有时会非常高, 计算中之所以选择 1×10^{-4} 是由于如果误比特率高于此值, 则卫星数据分发系统几乎就不能正常工作了, 分析也就没有意义了。对于上行链路, 我们假设具有比较好的信道条件, 其信道误比特率较低, 本文中均假设 $b_u = 1 \times 10^{-11}$ 。因为, 如果上行链路信道误比特率较高, 则整个分发系统可能都不能正常工作, 也就谈不上分析效率, 因此, 我们不考虑这种情况。

如果信道的误比特率为 b , 分组长度为 s (byte), 则分组出错概率 p 为

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

如果需要分发的文件长度为 f (byte), 每个分组中的信息域长度为 l (byte), 则一个文件需要打包为 $\lceil f/l \rceil$ 个分组, $\lceil x \rceil$ 表示取上整数。则要使该文件成功分发, 必须使所有 r 个接收机都成功接收到该文件的全部分组, 因此一个文件成功分发的概率 β 如式(2)所示^[1]。

$$\beta = \left[(1 - p_u) \prod_{m=1}^r (1 - p_{d_m}) \right]^{\lceil f/l \rceil} = \left[(1 - b_u)^{8s} \prod_{m=1}^r (1 - b_{d_m})^{8s} \right]^{\lceil f/l \rceil} \quad (2)$$

从式(1)和式(2)中可直观地看出, 误比特率越大、分组长度越长、接收机数越多, 分组出错率越大, 文件成功分发概率越低。

3 分组级 FEC 及其差错性能

传统 FEC 一般是在物理层, 它通过对比特流进行前向纠错编码来纠正接收数据比特中的差错, 而分组级 FEC 则是针对分组进行前向纠错编码, 从而达到纠正出错分组的目的^[3-5]。

常用的分组级 FEC 编码方式是里德所罗门删除 (Reed-Soloman Erasure, RSE) 码^[3], 它在常用的 RS 纠错码 (RSC) 的基础上进行了改进, 使得码字只能用来纠正删除错。RSE 码被用来在 k 个数据分组 (称为一个传输组) 上加上 h 个冗余奇偶数据分组, 从而形成 n 个分组, 称为一个 FEC 块, 这样在接收端最多可以纠正 h 个删除错。

RSE 编码是对符号进行的, 每个分组理论上被视为一个符号参与编码的, 但是在实际应用中每个分组的长度通常在几百比特到几千比特之间, 如果将每个分组视为一个符号, 那么 RSE 编码器对如此庞大的符号进行编码在实际中是难以实现的。因此在实际应用中有必要将一个分组划分为若干个符号, 考虑到软硬件的可实现性, 实际 RSE 编码器所采用的符号长度通常为 8 比特或 32 比特。图 2 给出了 RSE 编码的一种实现原理框图^[1]。图中采用多路并行的编码策略, 每次从 k 个原始数据分组中取出第 i ($i = 1, 2, \dots, k$) 个符号: $n_{1,i}, n_{2,i}, \dots, n_{k,i}$, 然后把这 k 个符号送到 RSE 编码器中得到 h 个符号, 这 h 个符号依次为 h 个奇偶数据分组的第 i 个符号: $n_{k+1,i}, n_{k+2,i}, \dots, n_{k+h,i}$ 。当 i 依次从 1 取到 s (实际处理过程是同步的) 时即完成了编码, 译码过程则相反。

当采用 (n, k) RSE 码后, 一个文件需要被分割成 $\lceil \lceil f/l \rceil / k \rceil$ 个 FEC 块后才能被分发出去。因此, 一个文件要被成功分发必须要使所有的 FEC 块都能恢复出传输组; 而在每个 FEC 块中, 只要收到任意 k 个分组就能恢复出传输组。这样, 一个文件被成功分发的概率 β 可表述为^[1]

$$\beta = \left[\sum_{i=k}^n \binom{n}{i} (1 - p_u)^i p_u^{n-i} \cdot \prod_{m=1}^r \left[\sum_{j=k}^i \binom{i}{j} (1 - p_{d_m})^j p_{d_m}^{i-j} \right] \right]^{\lceil \lceil f/l \rceil / k \rceil} \quad (3)$$

表 1 简化的下行链路信道差错特性模型

状态	信道误比特率 b_d	b_d 计算值	时间百分比	说明
晴天	$b_d < 1 \times 10^{-11}$	1×10^{-11}	$\rho_1 = 95\%$	没有雨衰
弱降雨	$1 \times 10^{-11} < b_d < 1 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}	$\rho_2 = 4.5\%$	实际雨衰值小于降雨余量
强降雨	$b_d > 1 \times 10^{-6}$	1×10^{-4}	$\rho_3 = 0.5\%$	实际雨衰值大于降雨余量

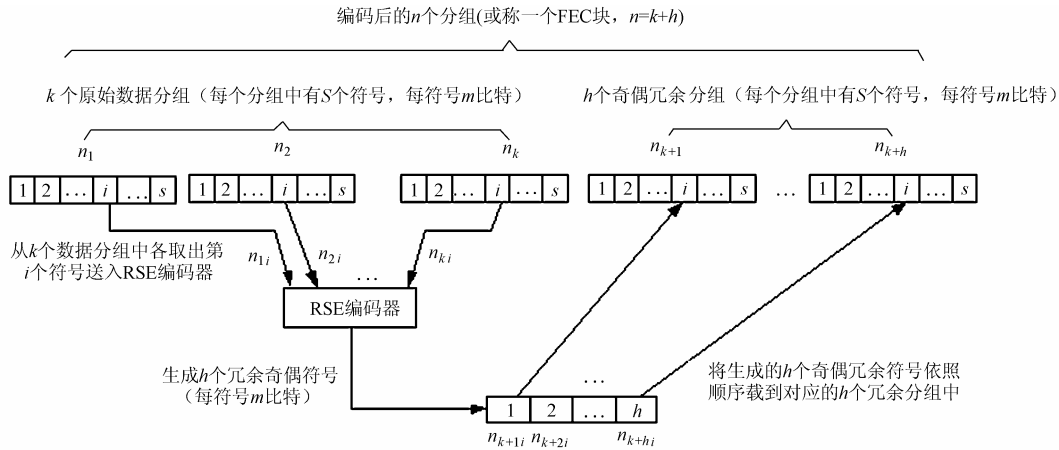


图2 RSE 编码的实现原理框图

4 网络层吞吐量效率

吞吐量是衡量协议工作效率的一个参数。我们来分析采用分组级 FEC 后对吞吐量的改善。由于这里的分析是针对 IP 分组进行的, 因此, 是网络层的吞吐量效率。影响网络层吞吐量的因素主要有 RSE 编码引起的开销、分组报头引起的开销和由于无法纠正的错误导致文件分发失败而引起的资源浪费。因此, 网络层吞吐量效率 T 可以表示为

$$T = \frac{k}{n} \cdot \frac{I}{s} \cdot \beta \tag{4}$$

计算中假设 IP 分组的报头长度为 24byte, 即 $S - I = 24$ 。

5 计算和分析

我们首先来分析信道误比特率对其文件成功分发概率和吞吐量效率的影响。图 3 和图 4 分别给出了文件成功分发的概率 (β) 和吞吐量效率 (T) 与下行链路误比特率 (假设所有接收站具有相同的下行链路误比特率 b_d) 的关系, 图中分别给出了不同接收站点数 (r) 和是否采用 RSE 码的情况 ($n-k=0$ 表示没有采用 RSE, $n-k=5$ 表示 RSE 中的冗余奇偶分组数为 5。), 计算中假设文件长度 $f=1\text{Mbyte}$, 分组长度 $s=128\text{byte}$, 一个传输组长度 $k=10$ 。从图 3 可以看到: (1) 如果不采用 RSE, 则在信道误比特率高于 $1\text{E}-8$ 时, 分发系统的可靠性就很低, 根本不能满足使用要求。(2) 如果不采用 RSE, 分发系统的可靠性随着接收站点数的增加而明显下降; 当采用 RSE 后, 分发系统的可靠性对接收站点数的增加不是很敏感。(3) 在一定的信道误码率范围内, 采用 RSE 码可以明显提高文件成功分发的概率, 但当信道误比特率高到一定程度 (如高于 $1\text{E}-4$) 后, 提高 RSE 码的纠错能力 (即 $n-k$), 并不能明显提高文件成功分发的概率, 原因主要是分组出错概率高到几乎每个分组都出错; 要进一步提高文件成功分发的概率, 必须缩短组长

度。但分组长度也不能太小, 否则帧效率就太低, 因为一个 IP 包中含有的运输层、网络层和链路层的报头总开销就有约 50byte 左右。

由于采用 RSE 意味着在传输分组中增加了冗余分组, 在信道误比特率很低时, 发送这些冗余分组是对信道资源的浪费, 因此, 采用 RSE 码会减小网络层的吞吐量, 只有当信道误比特率高到一定程度后, 采用 RSE 才能提高网络层的吞吐量。图 4 的分析证明了这一点。因此, 从提高文件成功分发的概率来说, 采用纠错能力越强的 RSE 码越好; 但从网络层吞吐量来说, 应该针对信道条件选择合适的 RSE 码纠错能力, 否则会造成信道资源的浪费。同样, 从式(3)和式(4)可以看到, 当接收站点数或文件长度增加时, 这个现象会更加明显。

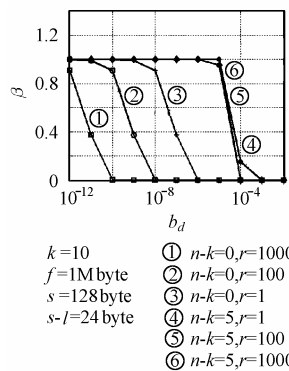


图3 对于不同的接收站点数 (r) 和是否采用 RSE 文件, 成功分发概率 (β) 与下行链路误比特率 (b_d) 的关系

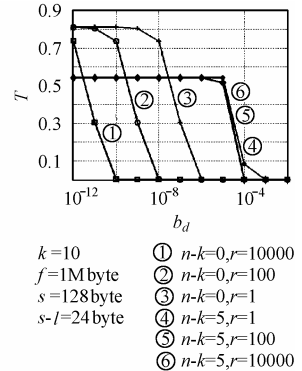


图4 对于不同的接收站点数 (r) 和是否采用 RSE, 吞吐量效率 (T) 与下行链路误比特率 (b_d) 的关系

既然对于给定的误比特率, RSE 码的纠错能力会影响成功分发的概率 (β) 和吞吐量效率 (T), 但实际上任何文件分发系统, 对于 β 都是有要求的, 我们现在针对表 1 给出的信道差错模型分别分析为达到要求的 β 值所需要的 RSE 码纠错能力 (即 $n-k$)。图 5 和图 6 分别给出了 $n-k$ 与文件长度 f 和分

组长度 s 的关系曲线。以下图中, 除了特别注明外, 其余的 k 值均为 10。显然, 文件长度越长、分组长度越长或要求的成功分发概率越高, 需要的纠错能力就越强。同样, 从这两幅图中可以看到, 具体的纠错能力也与传输组长度 k 有关, k 越大, 需要的纠错能力就越强, 但编码码率 (k/n) 也越高。

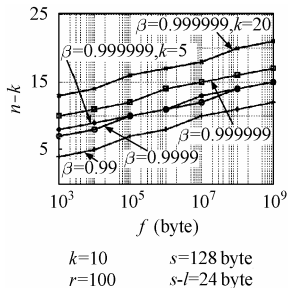


图 5 对于不同的文件成功分发概率 (β) 和传输组长度 (k), 需要的 RSE 码纠错能力 ($n-k$) 与文件长度 (f) 的关系

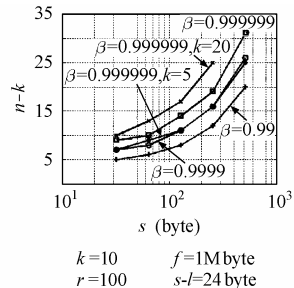


图 6 对于不同的文件成功分发概率 (β) 和传输组长度 (k), 需要的 RSE 码纠错能力 ($n-k$) 与分组长度 (s) 的关系

图 7 给出了吞吐量与分组长度和成功分发概率之间的关系, 它是在图 6 的基础上得到的。从图中可以看到, 对于给定的条件, 在分组长度为 128byte 时能够达到最高的吞吐量效率。同样, 要求的成功分发概率越高, 吞吐量效率越低; k 越大, 吞吐量效率越高。因此, 从提高传输效率来看, 传输组长度 k 应该越长越好; 但 k 不能太大, 否则 RSE 的编译码时延和处理负担就太重。

我们现在来分析对于要求的成功分发概率, 纠错能力与分组长度和文件长度的关系。图 8 给出了不同分组长度 (s) 条件下, RSE 纠错能力 ($n-k$) 与文件长度 f 的关系。从图中可以看到, 如果文件长度较长, 则必须取比较短的分组长度才能达到要求的成功分发概率; 如果选择的分组长度较长, 则分发的文件就不能太长, 否则无法保证其正确性。

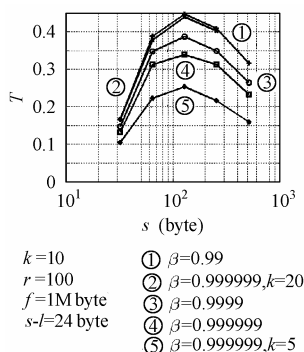


图 7 对于不同的文件成功分发概率 (β) 和传输组长度 (k), 吞吐量效率 (T) 与分组长度 (s) 的关系

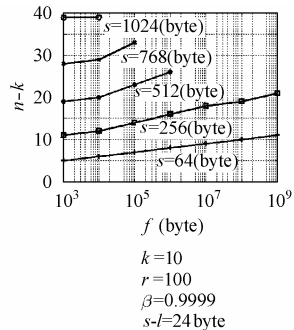


图 8 对于不同的分组长度 (s), 需要的 RSE 码纠错能力 ($n-k$) 与文件长度 (f) 的关系

6 结束语

在保持高吞吐量效率的前提下提高文件成功分发的概率是卫星文件分发系统所关心的一个技术问题, 采用分组级 FEC 技术是其中一种比较有效的解决方案。本文研究了在卫星文件分发系统中采用分组级 FEC 技术的参数选择及性能优化问题, 取得了下列结论:

- (1) 如果不采用分组级 FEC 技术, 常规的卫星数据分发系统很难满足用户对文件成功分发概率的要求; 而采用 RSE 码能够明显改善分发系统的成功分发概率和吞吐量效率。
- (2) 文件长度越长、分组长度越长、传输组长度或要求的成功分发概率越高, 需要的 RSE 码纠错能力就越强。但采用过强的纠错能力会影响系统的吞吐量效率, 应该根据具体的信道差错条件选择合适的纠错能力。
- (3) 通过采用 RSE 码, 使得文件的成功分发概率和吞吐量效率对接收站点数不太敏感。
- (4) 当信道误码率较高或文件长度较长时, 必须采用较短的分组长度。

参考文献

- [1] 张有志. 卫星组播通信中的分组级 FEC 技术研究. [硕士学位论文], 南京: 解放军理工大学, 2004.
- [2] 周坡. Ka 频段卫星信道中 IP 可靠组播协议研究. [硕士学位论文], 南京: 解放军理工大学, 2004.
- [3] McAuley A. Reliable broadband communication using a burst erasure correcting code. *Computer Communication Review*, 1990, 20(4): 297 - 306.
- [4] Nonnenmacher J, Biersack E, Towsley D. Parity-based loss recovery for reliable multicast transmission. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1998, 6(4): 349 - 361.
- [5] Huitema C. The case for packet level FEC. Proc. IFIP 5th Int. Workshop on Protocols for High Speed Networks (PpHSN'96), Sophia Antipolis, France, Oct. 1996: 110 - 120.

张更新: 男, 1967 年生, 教授, 从事卫星通信方面的研究和教学工作。

张有志: 男, 1979 年生, 助理工程师, 从事卫星通信方面的科研工作。

周坡: 男, 1979 年生, 助教, 从事通信技术方面的研究和教学工作。