

一种光突发交换网络中基于优先级的冲突解决方法的研究

侯睿 孙军强 丁攀峰
(华中科技大学光电子工程系 武汉 430074)

摘要 该文提出一种解决光突发交换网络节点中突发数据包冲突的方法。发生冲突时,首先基于不同的优先级对突发数据包进行分割,然后根据这种分割方法提出了一种突发数据包的组合封装方式,最后利用计算机对其进行模拟。可以看出这种方法对高优先级的突发数据包以及IP数据包有很好的保护作用,可以很好地实现服务质量QoS(Quality of Service)机制。

关键词 光突发交换, 头/尾部丢弃, 组合封装, 优先级, QoS

中图分类号: TN915.63 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2006)04-0747-06

Study on a Priority Based Contention Resolution for Optical Burst Switching Networks

Hou Rui Sun Jun-qiang Ding Pan-feng

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract A contention resolution method based on the priority of the bursts for optical switching networks is proposed in this paper. When the contention occur, firstly, the burst segmentation method is used on the bursts, secondly, based on the burst segment method a burst composite assembly technique is proposed, finally, the computer simulation is made to verify the result of the method, the fact that the method could commendably protect the high-priority bursts and IP packets could be clearly seen from the simulation, so that it could support good QoS for the networks.

Key words Optical burst switching, Head/Tail discard, Composite assembly, Priority, QoS

1 引言

光突发交换(Optical Burst Switching, OBS)技术是一种可以非常有效地利用WDM提供的带宽资源的一种下一代网络技术^[1-3]。在OBS网络中,IP数据包在网络的入口节点利用不同的封装机制被组合在一起,形成了一个突发数据包(简称“突发包”),并且节点根据每个突发包不同的属性,为其生成一个控制数据包。在JET(Just-Enough-Time),资源预留协议下,控制数据包采用带外方式在突发包传输之前就在突发包将要经过的每个节点预留一定的带宽,这样突发包在通过这些节点时,节点就不用进行光电转换等处理,而是直接通过,从而可以实现数据的全光透明传输。

在OBS网络中,一个非常重要的问题就是突发包之间的冲突问题,当多个突发包从节点的输入端口输入但是又要从相同的输出端口输出时,就产生了冲突。目前解决冲突的方式有竞争突发包丢弃(Burst-Dropping, BD)法^[4],偏射路由法^[5],波长转换法^[6],缓存法^[7]以及突发包分割(Burst Segmentation, BS)法^[4,8]等。竞争突发包丢弃法是将后来进入输出信道的竞争突发包整个丢弃,这对于解决冲突非常有

效,但是这会造成本很大的数据损失:偏射路由法将竞争突发包重新返回到节点的光交叉连接(Optical Cross-Connection, OXC)矩阵中重新选择出口,这将会使OXC中的负荷过重,并容易造成在OXC内部发生冲突^[9];波长转换法利用波长转换器将竞争突发包转换到别的波长信道中去传输,但是波长转换器也只能在存在空闲波长信道的前提下才有作用,当所有输出波长信道都没有空闲时,就失去了作用,而且它也只能提供有限的波长信道转换能力^[10],并不能彻底解决冲突问题;缓存法利用光纤延迟线对突发包进行暂时缓存,但是光纤延迟线技术尚不成熟,而且会增加节点结构的复杂性,并会带来信道之间的噪声^[11]。

突发包分割法是一种目前被认为比较有效的冲突解决方法。文献[4]对此进行了详细的数值计算,但是过程非常复杂,并且没有考虑到QoS机制。这里,我们提出一种基于优先级的突发包分割方法,然后以这种方法为前提,提出了一种突发包的组合封装方法,最后通过模拟验证了这种方法的可行性。

2 基于优先级的突发包分割方法

根据BS方法,在入口节点对突发包进行组合封装的时

候,就把突发包分成很多部分,每一部分是一个或几个 IP 包的组合。当发生冲突的时候,只有那些发生重叠的部分才会被丢弃,突发包剩余的部分可以继续传输,这样就大大降低了 IP 包的丢失率,从而更加充分地利用了网络资源,提高了网络的吞吐量。目前对于互相冲突的两个突发包有两种分割方法,一种是对竞争突发包的头部进行分割^[4],一种是对原突发包的尾部进行分割,但是目前的观点趋向于后者^[12],主要原因是分割突发包的头部会打乱 IP 包在突发包中的次序,而对突发包的尾部分割就不会出现这种情况,但是这样就会影响网络的 QoS,因为这种尾部分割方法并没有考虑到突发包的优先级问题。

实际上,在 OBS 网络中,边缘节点都具有对突发包进行重新组装和调度的功能,这就意味着无论采取头部分割法还是尾部分割法,只要是分割了的突发包,在边缘节点都会按照原来的次序重新得到组装,于是采取哪种分割方法对于节点的组装功能来说,并没有太大的影响。于是为了保证网络的 QoS,就有必要首先以突发包的优先级为前提,本着保护高优先级突发包的完整性原则,选择合适的分割方法。于是,我们就采用基于优先级的突发包分割方法,如图 1 和图 2 所示。

图中 IDC 和 ODC 分别为输入数据信道(Input-Data Channel)和输出数据信道(Output-Data Channel),突发包的阴影部分表示由于冲突而被丢弃的部分, P_o 和 P_c 分别为竞争突发包和原突发包的优先级。图 1 表示 ODC 为单波长信道的节点结构,当输入突发包发现输出信道已经被占用的时候,根据(a)BD 方法,竞争突发包就会被整个丢弃。现在我们利用基于优先级的突发包分割方法,首先判断发生冲突的两个突发包的优先级,如果(b) $P_o > P_c$,就对竞争突发包进行头部分割处理,并将剩余部分交换到这个输出信道和原突发包一起传输;相反,如果(c) $P_o \leq P_c$,则就对原突发包的尾部进行分割处理,并将竞争突发包交换到这个输出信道和原突发包一起传输。同样,对于图 2 所示的 ODC 为多波长信道的节点结构而言,如果从 IDC 输入的突发包发现所有的输出波长信道都被占用,根据 BD 方法,整个竞争突发包就会被丢弃

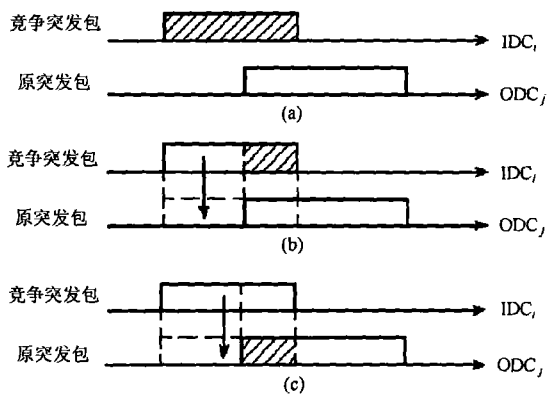


图 1 单波长信道中运用的 BS 方法 (a)BD 方法 (b) $P_o > P_c$ 时的 BS 方法 (c) $P_o < P_c$ 时的 BS 方法

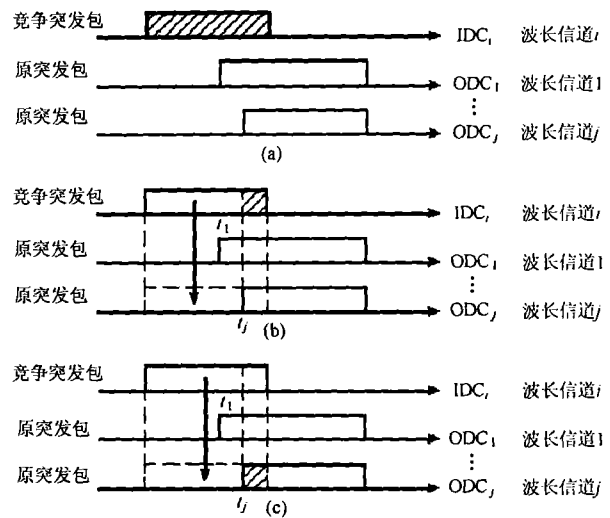


图 2 多波长信道运用的 BS 方法 (a)BD 方法 (b) $P_o > P_c$ 时的 BS 方法 (c) $P_o < P_c$ 时的 BS 方法

(a); 同样,利用基于优先级的突发包分割方法,我们首先定义 t_j 为第 j 个波长信道上的突发包到达的最晚时刻(b),如果竞争突发包的优先级比正在占用输出波长信道的所有突发包的优先级都低,即 $P_o > P_c, j=1,2,\dots,W$, W 为波长信道的总数,那么首先选择一个 t_j ,使其满足 $t_j = \min_{j=1,2,\dots,W} \{t_j\}$,这样就可以使得发生冲突的重叠部分为最小,继而损失就可以降低到最少。相反,如果竞争突发包的优先级最高或是与其它突发包的优先级相等,即 $P_{o,max} \leq P_c$ (c), $P_{o,max}$ 代表了原突发包的最高优先级,为了保证网络的 QoS 机制,就需要找到一个最低优先级 $P_{o,min}$ 的原突发包,对其进行尾部分割,这样就保证了高优先级突发包的完整性。

3 突发包的组合封装方法

从上文可以定性地看到,利用基于优先级的突发包分割方法可以减小高优先级突发包的损失,但是实际中存在一个问题:上述的分割方法保证了高优先级突发包的完整性,但是对于那些被分割的低优先级突发包而言,其中往往也含有相对较高级别的 IP 包,对这些突发包进行分割就很可能造成这些 IP 包的损失,因此对于低优先级的突发包而言,也需要保护其内部封装的相对高优先级的 IP 包,这样才能最大程度地实现 QoS。

由于分割措施有时候分割的是突发包的头部,有时候是分割其尾部,为了使等级高的 IP 包尽量不受到损失,我们提出了一种突发包组合封装方式,如图 3 所示。图中,我们将 IP 包的等级分为 3 级,即 ClassA, ClassB 和 ClassC,它们的等级依次降低, L_A, L_B 和 L_C 分别为它们的长度, L 为整个突发包的长度,在图 3 中, $L = L_A + 2L_B + 2L_C$,需要说明的一点是,在实际封装的时候,分布在 ClassA 周围的 ClassB 和 ClassC 的长度并不一定是相等的。一般情况下,对不同等级的 IP 包进行封装时,需要满足一个原则,即 ClassA : ClassB :

ClassC = $L_A : \sum L_B : \sum L_C$, ($L_A \geq \sum L_B \geq \sum L_C$), 即等级越高的 IP 包的长度在突发包里所占的比例越大。这样将等级最高的

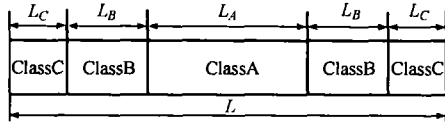


图3 一种根据 IP 包优先级的突发包组合封装格式

IP 封装在突发包的中间, 其余的根据 IP 包等级的依次降低, 就分布在突发包的边缘。我们就可以保证在对突发包进行头/尾部分割的时候, 随着 IP 包等级的逐渐升高而损失程度逐渐降低。

4 理论分析

在这里, 我们假设 OBS 网络采用的是 JET 资源预留协议, 这样, OBS 网络就可以用 $M/M/k/k$ 模型来进行描述^[13,14]。 k 代表了 ODC 的波长信道数目。假设对于一个给定的 ODC, 突发包到达的分布服从 Poisson 分布, 到达率为 λ , 突发包的长度服从指数分布, 均值为 $1/\mu$, 那么, 在这样的情况下, 突发包丢失的概率, 即丢失率, 就可以用 Erlang B 公式来描述^[13,14]:

$$P_{BD}(k, A) = \left(\frac{A^k / k!}{\sum_{j=0}^k A^j / j!} \right) \quad (1)$$

式中 $A = \lambda/\mu$ 是给定的负荷, 由于 Erlang B 公式对时间不敏感, 所以突发包的长度也可以服从一般分布 G , 因此也可以用 $M/G/k/k$ 模型来描述 OBS 网络。根据 BD 方法, 发生冲突以后, 整个竞争突发包就会被丢弃, 所以在这个模型里, IP 包的丢失率就等于突发包的丢失率。

而当采用了 BS 方法后, 冲突发生时, 只用对突发包进行部分丢弃就可以了, 这样, IP 包的丢失率就肯定不等于突发包的丢失率了, 这样, 以上两种模型就不再适用。文献[4]利用数值计算得出了采用了 BS 方法得出的 IP 包的丢失率, 但是过程非常复杂, 计算起来难度很大。其实采用 BS 方法的 OBS 网络可以利用 $M/G/\infty$ 模型来描述^[15]。在这个模型中, 将 $M/G/k/k$ 中的实际输出波长信道 k 进行扩展, 设定除了 k 以外, 存在有很多个伪输出波长信道, 在这样的前提下, 就可以认为被分割后剩下的突发包不是交换到一条实际的波长信道上与别的突发包一起在这条信道上传输, 而是交换到一条伪波长信道上单独进行传输, 相反而言, 就是如果有一个突发包在一条伪波长信道上传输, 就证明它是经过了冲突, 而被分割后剩下的部分。

利用这个模型, IP 包的丢失率就可以由下式来表示^[15]

$$P_{BS}(k, A) = E[L] / A \quad (2)$$

式中 $E[L]$ 是突发包丢失的期望值, 可以由下式表示:

$$E[L] = \sum_{j=1}^{\infty} j \cdot P(k+j) = E[X_A - k]^+ \quad (3)$$

其中 X_A 是 Poisson 随机变量, 均值为 A , 也就是负荷大小,

$P(k+j)$ 是在 $M/G/\infty$ 模型中, $k+j$ 个伪输出信道都被占用的概率, $P(k+j)$ 服从 Poisson 分布, 可以表示为

$$P(k+j) = A^{k+j} \frac{e^{-A}}{(k+j)!}, \quad j=1,2,\dots \quad (4)$$

$E[X_A - k]^+$ 可以由下式表示:

$$E[X_A - k]^+ = \begin{cases} X_A - k, & X_A > k \\ 0, & X_A \leq k \end{cases} \quad (5)$$

为了方便起见, 可以将式(1)和式(2)写成如下的递推形式:

$$\left. \begin{aligned} P_{BD}(0, A) &= 1 \\ P_{BD}(n, A) &= \frac{AP_{BD}(n-1, A)}{n + AP_{BD}(n-1, A)}, \quad n=1,2,\dots,k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} P_{BS}(0, A) &= e^{-A} \\ P_{BS}(n, A) &= \frac{AP_{BS}(n-1, A)}{n}, \quad n=1,2,\dots,k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

考虑到在发生冲突的时候, 高优先级突发包和低优先级突发包的丢失率是不相同的, 下面就来计算不同优先级突发包的丢失率^[16], 也就是 IP 包的丢失率。

首先我们将突发包分为两级优先级: Class1 和 Class2, Class1 突发包的优先级高于 Class2 突发包的优先级, 那么, 根据 $M/G/\infty$ 模型, 可以得出 Class1 突发包的 IP 包丢失率为

$$P_{BS1}(k, A_1) = \left[\sum_{j=1}^{\infty} j \cdot A_1^{k+j} \frac{e^{-A_1}}{(k+j)!} \right] / A_1 \quad (8)$$

式中 $A_1 = \lambda_1/\mu_1$ 是 Class1 突发包的负荷。

同样, 我们可以得出 Class1 突发包和 Class2 突发包的联合 IP 包丢失率为

$$P_{BS1,2}(k, A_{1,2}) = \left[\sum_{j=1}^{\infty} j \cdot A_{1,2}^{k+j} \frac{e^{-A_{1,2}}}{(k+j)!} \right] / A_{1,2} \quad (9)$$

其中 $A_{1,2} = A_1 + A_2$ 为 Class1 突发包和 Class2 突发包的总负荷。这样, 利用式(8)和式(9), 就可以得出 Class2 突发包的 IP 包丢失率如式(10)所示。

$$P_{BS2} = (P_{BS1,2} - \eta_1 P_{BS1}) / \eta_2 \quad (10)$$

$$\eta_i = \lambda_i / (\lambda_1 + \lambda_2), \quad i=1,2 \quad (11)$$

一般而言, 对于某一个等级的突发包 Class i , 可以由下式计算其丢失率:

$$P_{BSi} = (1/\lambda_i) \left(\sum_{m=1}^i \lambda_m \right) (P_{BS1,2,\dots,i} - \eta_{1,2,\dots,i-1} P_{BS1,2,\dots,i-1}), \quad (i=2,3,\dots,n, n \text{ 是突发包的等级数}) \quad (12)$$

$$P_{BS1,2,\dots,i} = \left[\sum_{j=1}^{\infty} j \cdot \left(\sum_{m=1}^i A_m \right)^{k+j} \frac{e^{-\left(\sum_{m=1}^i A_m \right)}}{(k+j)!} \right] / \left(\sum_{m=1}^i A_m \right) \quad (13)$$

$$\eta_{1,2,\dots,i-1} = \left(\sum_{m=1}^{i-1} \lambda_m \right) / \left(\sum_{m=1}^i \lambda_m \right) \quad (14)$$

从式(12)和式(13)可以看出, 对于给定的 n 个优先级的突

发包, 有 $P_{BS1,2,\dots,n} > P_{BS1,2,\dots,n-1}$, 于是, 可以看出 $P_{BSn-1} < P_{BSn}$, 这就从理论上证明了低优先级突发包的丢失率要高于高优先级突发包的丢失率。

5 结果讨论

这里, 我们利用计算机模拟比较了在 ODC 为单波长信道和多波长信道的前提下, BD 方法和本文提出的基于优先级的突发包分割方法的性能差别。在模拟中, 我们采用两组数据: 一组是在没有波长转换情况下, 每个 ODC 含有 4 根光纤, 每根光纤只含有一个波长信道; 另一组是存在波长转换情况下, 每个 ODC 含有 4 根光纤, 每根光纤复用 4 个波长信道, 高优先级和低优先级突发包的到达率都服从 Poisson 分布, 突发包长度服从指数分布, 服务时间分别为 1/1.6 和 1/16。

首先我们比较 BD 方法和利用新模型分析的 BS 方法之间的差别, 如图 4 和图 5 所示。

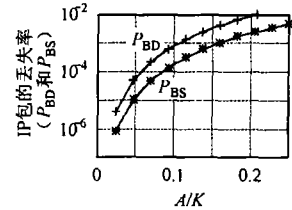


图 4 利用 BD 方法和 BS 方法得到的 IP 包丢失率(4 根光纤的单波长信道)

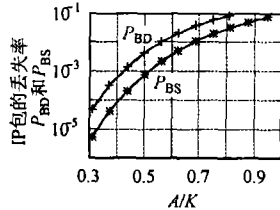


图 5 利用 BD 方法和 BS 方法得到的 IP 包丢失率(4 根光纤, 每根光纤复用 4 个波长信道)

图 4 和图 5 分别表示了在一个波长信道采用不同的负荷下, IP 包的丢失率。在这里, 我们假设所有的突发包优先级相同。从图中可以看出, 利用 BS 方法可以明显地降低 IP 包的丢失率。当给定一个信道负荷时, 不论是单波长信道还是多波长信道 ODC 中, 利用 BS 方法得到的 IP 包丢失率比 BD 法要降低 1 个量级左右, 相反, 如果我们给定一个 IP 包丢失率, 那么利用 BS 方法的话, 就可以使信道承载更大的负荷, 这无疑可以充分地利用网络资源, 提高网络的吞吐量。因此可以说明, BS 方法是一种非常有效的冲突解决方法。

现在我们来比较在严格的优先级下, 利用 BS 方法得出的不同优先级突发包中的 IP 包丢失率。在这里, 我们假设突发包存在两个优先级, 即 Class1 和 Class2, Class1 是高优先级突发包, Class2 是低优先级突发包。图 6 和图 7 显示出了在不同的信道负荷的下, 两个等级的突发包中 IP 包的丢失率。

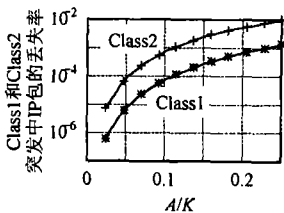


图 6 利用 BS 方法得到的不同优先级突发包中 IP 包的丢失率 (4 根光纤的单波长信道)

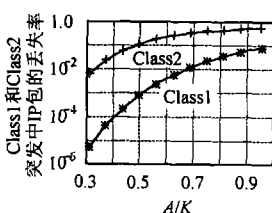


图 7 利用 BS 方法得到的不同优先级突发包中 IP 包的丢失率 (4 根光纤, 每根光纤复用 4 个波长信道)

从图中可以看出, 对于单波长信道 ODC 而言, Class1 突发包中 IP 包的丢失率要比 Class2 突发包中 IP 包的丢失率要小 1 个量级左右, 但是对于多波长信道 ODC 而言, 这个丢失率的差别最高可以达到 3 量级, 这是可以理解的, 从图中可以看到, 对于单波长信道而言, 每信道负荷较小, 因而冲突发生的概率较小, 而对于多波长信道而言, 每信道负荷较大, 这样在多波长信道中就容易发生冲突, 而我们的目的是保护高优先级的突发包, 因此就需要损失比单信道冲突更多的低优先级的突发包, 所以多波长信道的 ODC 中, Class1 突发包和 Class2 突发包的 IP 包丢失率差距才会这么大, 但是随着每信道负荷的不断增大, 冲突发生的概率就会不断增大, 这个时候, Class1 突发包的丢失率也会因为可用空闲信道的减少而不断变大, 但是可以看到, 即使每波长信道负荷很高的时候, Class1 突发包的丢失率也比 Class2 突发包的丢失率小一个量级左右。

为了更加全面地了解基于优先级的突发包分割方法的优越性, 我们给出了在不同负荷的情况下, 当采用不同数目的波长信道时, IP 包丢失率的关系曲线, 如图 8 和图 9 所示。

图 8 给出了当负荷 $A \in [1.0, 1.2]$ 时, 利用 BD 方法和 BS 方法计算的 IP 包丢失率随着波长信道数目 k 的不同而产生

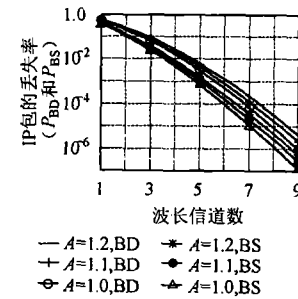


图 8 利用 BS 方法和 BD 方法在不同的波长信道下得到的 IP 包丢失率

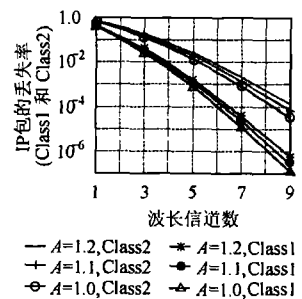


图 9 利用 BS 方法在不同的波长信道下得到的 Class1 和 Class2 突发包中 IP 包的丢失率

的变化。可以看出, 随着波长数目的增多, IP 包丢失率不断地下降, BS 方法在给定的任何波长信道数目的情况下得到的 IP 包丢失率都要比 BD 方法的低, 并且它们都随着波长数目的增多而减小, 这是可以理解的, 因为波长信道数目增加, 那么在同样负荷前提下, 分配到每个波长信道的负荷就会减少, 就可以减少冲突的发生。另外, 从图中可以发现, 在负荷为 $A = 1.2$ 的情况下, 利用 BS 方法得到的 IP 包丢失率要比负荷 $A = 1.0$ 情况下 BD 方法得到的 IP 包丢失率还要小, 这就说明, 当在负荷给定的条件下, 利用 BS 方法就可以减少波长信道的数目, 这就可以很好的减小节点的复杂性。

图 9 给出了当负荷 $A \in [1.0, 1.2]$ 时, 利用 BS 方法得到的优先级分别为 Class1 和 Class2 两个等级突发包中 IP 包的丢失率, 与图 8 得到的结论相似, 随着波长信道数目的增多, 两个等级的突发包中的 IP 包丢失率都不断减小, Class1 突发

包的丢失率要比 Class2 突发包的丢失率要低。我们同样从图中可以发现,在负荷 $A=1.2$ 的情况下,Class1 突发包的丢失率要比 $A=1.0$ 时 Class2 突发包的丢失率还要低,这就表明了高优先级的突发包在较高的负荷情况下,仍然可以得到很好的保护,这个有意义的现象更加进一步说明了:基于优先级的突发包分割方法的确可以很好地保证网络的 QoS 机制。

在充分保护了高优先级突发包的时候,我们同样也需要保护低优先级突发包中的相对较高优先级 IP 包,这样才能尽最大努力实现网络的 QoS 机制,按照前文提出的突发包组合封装方式,我们模拟出了在低优先级突发包中的 ClassA, ClassB 和 ClassC 3 个级别的 IP 包的丢失率,如图 10 和图 11 所示。

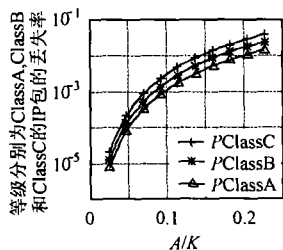


图 10 在低优先级突发包中不同等级的 IP 包的丢失率 (4 根光纤的单波长信道)

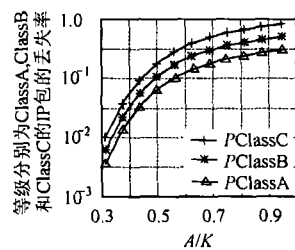


图 11 在低优先级突发包中不同等级的 IP 包的丢失率 (4 根光纤,每根光纤复用 4 个波长信道)

图 10 和图 11 分别给出的是输出端口为单波长信道和多波长信道的情况。此时假设在一个低优先级突发包中,ClassA, ClassB 和 ClassC 3 个等级的 IP 包所占有的长度比例 $L_A : \sum L_B : \sum L_C = 12 : 5 : 3$ 。从图中可以看到,在相同的信道负荷的前提下,ClassA 包丢失率最小,而 ClassC 包丢失率最高。这是很容易理解的,因为根据我们提出的组合封装方式,等级越低的 IP 包越靠近突发包的边缘,就越容易被分割。因此,虽然在发生冲突的时候,低优先级的突发包将要被首先分割,但是如果按照我们给出的组合封装方式,即使突发包被进行了头部或是尾部分割,但是其内部的相对较高优先级的 IP 包还是得到了很好的保护,这就更加充分地实现了 QoS 机制。

6 结束语

本文通过分析 OBS 网络中的冲突机理,指出了现在解决冲突方法存在的不同的问题,继而提出了一种首先分析突发包的优先级,然后利用突发包分割方法来解决冲突问题的方法,而且提出了一种突发包的组合封装方式,使得突发包中的相对较高级别的 IP 包可以得到很好的保护,之后利用一种简单的数学模型对这种方法进行了分析。计算机模拟表明,这种方法可以非常有效地解决突发包冲突问题,并且可以很好地保护优先级高的突发包,以及低优先级突发包中的相对较高级别的 IP 包。这样就可以很好地保证网络的 QoS

机制。

致谢 感谢武汉大学电子信息学院的陈轩硕士和张定春硕士对于本文提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] Qiao C, Yoo M. Optical burst switching (OBS)-a new paradigm for an optical Internet. *Journal of High Speed Networks*, 1999, 18(1): 69 - 84.
- [2] Qiao C, Yoo M. A novel switching paradigm for buffer-less WDM networks. Proceeding OFC'99, San Diego, CA, 1999, paper ThM6: 177 - 179.
- [3] Qiao C. Labeled optical burst switching for IP-over-WDM integration. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38(9): 104 - 114.
- [4] Detti A, Eramo V, Listanti M. Performance evaluation of a new technique for IP support in a WDM optical network: optical composite burst switching (OCBS). *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 154 - 165.
- [5] Yoo M, Qiao C, Dixit S. QoS performance of optical burst switching in IP-over-WDM networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(10): 2062 - 2071.
- [6] Acampora A S, Shah I A. Multihop lightwave networks: a comparison of store-and-forward and hot-potato routing. *IEEE Trans. on Communications*, 1992, 40(6): 1082 - 1090.
- [7] Xiong Y, Vandehoute M, Cankaya H C. Control architecture in optical burst-switched WDM networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(10): 1838 - 1851.
- [8] Vokkarane V M, Jue J P, Sitarman S. Burst segmentation: an approach for reducing packet loss in optical burst switched networks. Proceeding IEEE, ICC2002, New York, NY, 2673 - 2677.
- [9] Yao S, Mukherjee B, Yoo S J B, Dixit S. All-optical packet switched networks: A study of contention resolution schemes in an irregular mesh network with variable-sized packets. Proceeding SPIE OptiComm 2000, Dallas, TX: 235 - 246.
- [10] Vokkarane V M, Haridoss K, Jue J P. Threshold-based burst assembly policies for QoS support in optical burst-switched networks. Proceeding SPIE Optical Communications Conference, OptiComm2002, 4874: 125 - 136.
- [11] Ishii D, Fujii T, Arakawa Y, Sasase I. Fair burst dropping technique for optical composite burst switched multi-hop network. *IEEE Communications, Computers and signal Processing, PACRIM. 2003, Pacific Rim Conference on*, 1: 405 - 408.
- [12] Vokkarane V M, Jue J P. Prioritized burst segmentation and composite burst-assembly techniques for QoS support in optical

- burst-switched networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(7): 1198 – 1208.
- [13] Dolzer K, Gauger C, Spath J, Bodamer S. Evaluation of reservation mechanisms in optical burst networks. *AEU Int. Journal of Electronics and Communication*, 2001, 55(21): 1 – 8.
- [14] Dolzer K, Gauger C. On burst assembly in optical burst switching networks-a Performance evaluation of just-enough-time. *Proceeding Information Theory Conference 17, Salvador, Brazil*, 2001, 4: 149 – 160.
- [15] Neuts M, Rosberg Z, Vu H L, White J, Zukerman M. Performance analysis of optical composite burst switching. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(8): 346 – 348.
- [16] Vu H L, Zukerman M. Blocking probability for priority classes in optical burst switching networks. *IEEE Communications Letters*, 2002, 6(5): 214 – 216.
- 侯 睿: 男, 1977 年生, 博士, 从事光网络技术等方面的研究.
- 孙军强: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 从事光通信技术方面的研究.
- 丁攀峰: 男, 1980 年生, 博士, 从事光通信技术方面的研究.