

一种基于 P 圈的 ASON 混合故障保护模型^①

李 彬^② 臧云华 邓 宇 李桂仁* 黄善国 顾婉仪

(北京邮电大学光通信与光波技术教育部重点实验室 北京 100876)

(* 中国台湾亚东技术学院通讯工程系 台北 22061)

摘 要 在研究自动交换光网络(ASON)中发生节点/链路混合故障时的保护方法的基础上,设计了一种同时考虑节点故障和链路故障情况的基于 P 圈的保护模型,同时给出了一种保证在混合故障时可以达到 100% 业务恢复率的预配置 P 圈保护的启发式算法,并且综合考虑了实际网络中保护恢复速度和资源效率等因素,给出了具有最大 P 圈跳数限制的 P 圈配置方案。利用 OPNET 软件搭建了 ASON 仿真平台,在泛欧 Cost239 网络拓扑和北美 NSFnet 网络拓扑上,采用静态业务模型对该算法进行了仿真分析。仿真结果证明,该算法在拥有故障业务快速恢复能力的同时,相比已有算法具有更低的资源冗余度。

关键词 P 圈, 混合故障, 半跨接, 自动交换光网络(ASON)

0 引 言

随着光交叉连接(OXC)设备的逐渐商用化,格状网络将成为未来光网络发展的必然趋势。Grover 最早提出了预配置圈(p-cycle, P 圈)的概念^[1,2],通过 p-cycle 的配置保护方法,可以在格状网中做到与环网的保护恢复速度相近^[3,4]。后来不断有新的 P 圈算法产生,新的算法或者是改进 P 圈的备选圈生成算法,或者是优化 P 圈的资源配置策略。目前,存在多种针对格状光网络的保护/恢复算法,主要可以分为针对链路故障和节点故障两大类。研究的配置算法也多是针对链路故障或者是节点故障单独进行操作,对于节点故障和链路故障同时存在时的网络的保护方式的研究很少。和链路故障相比,节点故障的发生频率较低。实际中,光交叉连接设备非常可靠,对于光层上的节点而言,硬件故障几乎不会发生,但由于软件问题造成的路由器故障却时有发生^[5]。如果只是将针对节点故障的 P 圈配置方法和针对链路故障的 P 圈配置简单地组合在一起,除非采用复杂的控制算法和配置大量的冗余资源,会使网络的资源利用率下降,反而降低网络的效率,影响格状网络的性能。目前的链路故障算法较多^[1,3],针对节点故障最近也有新的保护算法不断提出,主要有节点环绕 P 圈保护算法(NECP)^[5]、基于区段

保护扩展的“流 P 圈”保护方式^[6]和基于链路优先的节点保护方法^[7]。本文在已有研究的基础上,给出了链路/节点混合故障环境下的 P 圈保护模型,并且提出了一种基于混合保护的启发式算法,可以在混合故障的环境下,充分利用已经配置的保护资源,从而提高网络的效率。

1 混合故障分析

在网络中,对于链路故障,配置一个单位的保护容量,可以保护跨接链路上双倍的业务容量或者一个单位的圈上链路的业务容量。而对于节点故障的情况,当故障节点的转发业务的上/下游节点均在某个 P 圈上,则这个业务能够得到该圈的保护。当某节点发生故障时,其相邻节点检测到故障,若存在通过该故障节点的业务,则在该业务的上/下游节点发生倒换。当故障节点为圈上节点和半跨接节点时,配置一个单位的保护容量的 P 圈,能够保护一个单位容量的业务;而当故障节点为“跨接节点”时,配置一个单位容量的 P 圈,能够保护两个单位容量的业务。不同于单一类型的故障,在混合故障模型下,已经配置好的 P 圈会由于故障的原因而不再可用,本来计算出来可以实现 100% 保护的预配置资源实际上效果并不理想,使得预先配置的部分资源不能够

① 863 计划(2006AA01Z246)、国家自然科学基金(60702005)、教育部留学归国人员教学科研经费建设和台湾科委会计划(NSC 97-2218-E-161-1002-)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:下一代光网络;联系人,E-mail: direfish1983@gmail.com
(收稿日期:2007-12-10)

真正地用于故障的保护。图 1 是两种 P 圈保护失效情况的示意图。

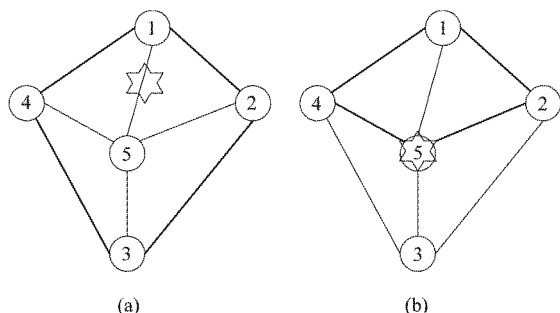


图 1 P 圈保护失效情况

图 1 所示为 5 个节点配置的两个 P 圈——1-2-3-4-1 (图 1(a)) 和 1-2-5-4-1 (图 1(b))。在图 1(a) 中,链路 1-5 发生链路故障,但是配置的 P 圈不能够对其进行保护。图 1(b) 中节点 5 发生故障,会导致圈 1-2-5-4-1 失效,在设计配置保护资源时,需要同时能够保证链路故障 1-5 和节点 5 的故障,要同时配置两个保护圈,而且其相互资源不能够共享才可实现 100% 的业务完全保护。

2 混合保护模型及启发式算法

一般来说,为节点故障配置的保护圈也会具备一定的链路故障保护能力。采用 PBNP_LF 模型^[7]时,配置的 P 圈具有较低的冗余度,但是为节点故障所配置的保护圈的链路保护能力得不到利用,造成资源的浪费。所以,如果同时考虑两种故障,充分利用两种故障保护资源的相互保护能力,可使资源配置更加优化,称其为混合保护模型 (hybrid protection model, HPM)。

使用混合保护模型时,不必分开考虑两种故障。当挑选一个圈时,就必须考虑到该圈在节点故障和链路故障两种情况下对业务的保护能力,从而选取出综合效率最高的圈。以此为基础,提出了一种以 HPM 模型为基础的启发式 P 圈配置算法。在网络资源充足的情况下,该算法能够实现链路和节点混合故障时 100% 的业务保护成功率。

该算法的目标函数如式

$$\begin{cases} PR_L = 100\% \\ PR_N = 100\% \\ \text{Max}(\sum W_i / \sum P_j) \end{cases} \quad (1)$$

所示。其中, PR_L 表示链路故障时业务恢复率, PR_N 表示节点故障时业务恢复率。 W_i 表示第 i 条链

路上的工作资源量, P_j 表示为第 j 个 P 圈配置的保护资源量, $\sum W_i / \sum P_j$ 表示全网的容量效率。算法在努力实现节点故障和链路故障时 100% 业务恢复率的基础上,追求全网最大的容量效率,即配置最少的保护资源。

2.1 综合容量效率的计算

采用 HPM 模型时, P 圈容量效率的计算需要综合考虑链路故障和节点故障时对业务保护的效率,其容量效率分为两部分,即链路容量效率与节点容量效率。公式

$$\begin{cases} E_L = (\sum W_L) / L_C \\ E_N = (\sum W_N) / L_C \end{cases} \quad (2)$$

描述了链路容量效率与节点容量效率的计算方法。其中, E_L 表示 P 圈的链路容量效率, E_N 表示节点容量效率, L_C 表示该圈的度量值,用来定义链路的花费。本文中利用 P 圈的跳数来定义。 W_L 表示该圈对其保护范围内第 L 条链路的保护情况,若 L 链路为跨接链路,且其承载业务量大于 1,则 $W_L = 2$,若承载业务量为 1,则 $W_L = 1$,否则 $W_L = 0$;若链路 L 为圈上链路, W_L 取值为 1 或 0。 W_N 表示该圈对其保护范围内第 N 个节点的保护情况。若节点 N 为跨接节点,且其受该圈保护的转发业务量大于 1,则 $W_N = 2$,若可保护转发业务量为 1,则 $W_N = 1$,否则 $W_N = 0$;若节点 N 为圈上节点, W_N 取值为 1 或 0。

在使用 HPM 模型设计生存性方案时,可通过调整两种故障类型的比例来优化算法性能。为此,引入参数 C_L 和 C_N , 表示不同的故障类型在方案中所占的比重。所占比重越大,说明设计生存性方案时对该类型的故障考虑的越多,对网络运营者更重要。一个 P 圈的综合容量效率计算公式为:

$$E = C_L \times E_L + C_N \times E_N \quad (3)$$

公式(3)中, E 表示圈的总容量效率, E_L 、 E_N 分别表示该圈的链路容量效率与节点容量效率。 C_L 、 C_N 则分别表示这两种容量效率在总体容量效率中所占的比重。可通过调节 C_L 、 C_N 的比值改变两种故障在保护体系中的重要程度。

2.2 算法流程

为了能够快速地进行网络资源的配置,需要尽量避免使用基于整数线性规划 (integer linear programming, ILP) 模型的配置算法,本文提出的基于混合故障条件下的 P 圈保护模型 HPM 对于节点、链路故障同时存在的网络进行保护资源的预配置。HPM 启发式算法的具体流程如下:

步骤 1: 利用 SLA 算法^[8]计算备用 P 圈基池,通过 SP-ADD 和 Expand 算法对于 P 圈基池进行扩展。计算各个 P 圈的综合容量效率。

步骤 2: 根据业务矩阵的分布特性,通过 Dijkstra 算法对业务请求进行预路由,得到每条链路的工作容量分布。

步骤 3: 根据综合容量效率对于 P 圈进行优选,按照式(3)计算 P 圈的综合容量效率,选取容量效率最高的圈,将负载最重的节点首选,配置保护资源,容量分配原则同文献[3]。

步骤 4: 重新计算 P 圈的综合容量效率。

步骤 5: 扣除本地节点的透传转发业务(本地源/宿终结业务配置保护无意义)和圈上链路、跨接链路的已保护业务量。

步骤 6: 判断是否满足算法结束条件,若不足,返回步骤 3。

步骤 7: 算法结束。

算法结束条件为网络中所有的业务都得到了保护资源(包括链路故障时和节点故障时),或者是网络资源耗尽,无法再提供新的保护圈。

3 仿真验证

为了验证本文所提出的保护方案和算法的有效性,利用 OPNET Modeler 搭建了自动交换光网络(ASON)仿真平台,在泛欧 Cost239 和北美 NSFnet 网络拓扑上进行了仿真,图 2 为仿真所采用的网络拓扑结构。仿真中,设定链路为 2 纤双向 16 个波长,采用 OSPF-TE 完成路由更新、计算。

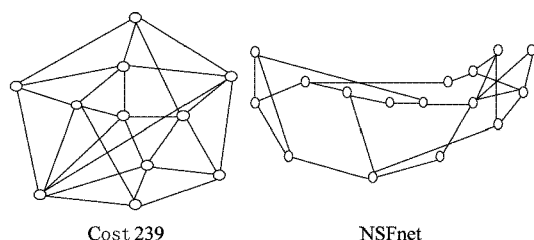


图 2 仿真网络拓扑

采用 HPM 保护模型时,选取不同的 C_L/C_N 值可以得到不同的结果,图 3 为 C_L/C_N 值发生变化时两个网络中实现 100% 保护成功率时的冗余度变化情况。当 C_L/C_N 值为 1/2 时,两个网络中的冗余度都达到最低值,即实现 100% 保护成功率时所占用的保护资源最少。

表 1 数据为本文提出的 HPM 保护模型与文献[5]所提出的节点环绕 P 圈(NECP)模型的对比。其

中 NECP 保护模型的冗余度采用了文献[5]提供的的数据。采用 HPM 混合保护模型降低了网络的资源冗余度,而且算法更为简单,实现容易。并且和文献[7]中的 PBNP_LF 算法进行比较,算法在资源冗余度方面具有很大的改进。

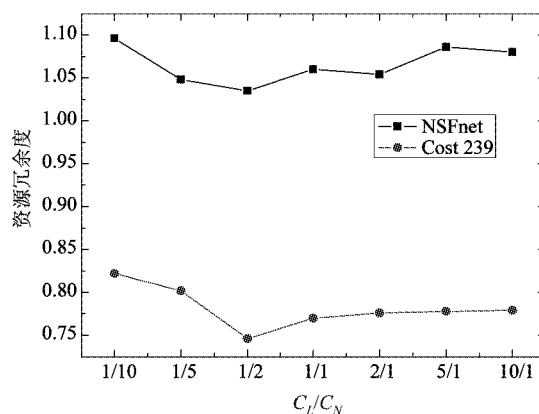


图 3 HPM 模型冗余度随 C_L/C_N 值的变化曲线

表 1 节点故障保护性能对比

保护模型	平均资源冗余度		复杂度
	Cost239	NSFnet	
NECP	1.45	1.90	复杂
1+1(1:1)	1.35	1.61	简单
PBNP_LF	1.04	1.23	中等
HPM	0.75	1.03	中等
p-cycle(链路故障)	0.55	0.88	中等

图 4 为 Cost239 网络与 NSFnet 网络中的资源冗余度随业务量变化的曲线。其中 LFM 表示文献[7]的 PBNP_LF 算法。NSFnet 中,业务量增大时,网络资源的冗余度迅速下降,这主要是由于网络在负载较重时没有足够的资源,预先计算的保护资源无法配置成功。而 Cost239 网络的资源冗余度变化不大,因此在重负荷条件下依然具有接近 100% 的业务保

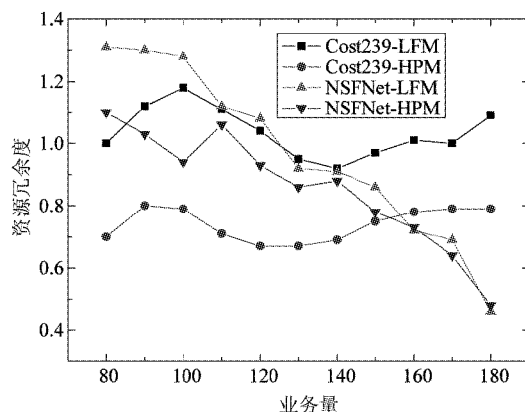


图 4 资源冗余度变化曲线

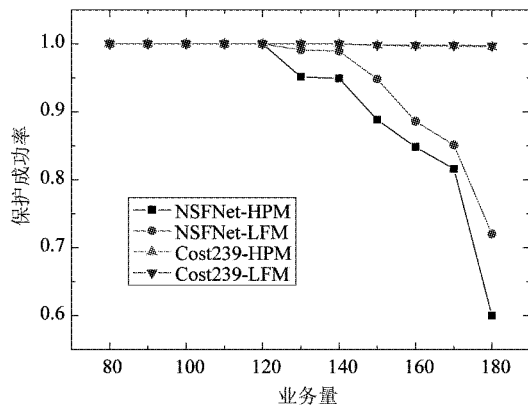


图 5 混合故障保护成功率对比

护能力(图 5),冗余度曲线的变化完全由业务的分布所决定。同时,可以看到在实现 100% 的混合故障保护成功率时,HPM 模型的资源冗余度要低于 LFM。

虽然 HPM 模型在资源冗余度上要优于 LFM,但由于基于链路的模型优先实现链路故障的保护,所以在网络资源不足时,LFM 模型具有更高的故障保护成功率。图 5 给出了 Cost239 网络与 NSFnet 网络中混合故障环境下业务保护成功率的变化曲线,其中 HPM 模型的 C_L/C_N 值为 $1/2$ 。可以看到,当网络承载业务量较小时链路故障和节点故障时均能实现 100% 的业务保护。而当业务量增大时,由于网络资源有限,出现了保护不成功的情况,而且 LFM 模型的保护成功率明显高于 HPM,所以在网络重负荷,保护资源紧张的情况下,LFM 模型相较于 HPM 模型具有一定的优势。NSFnet 网络的节点数更多,平均路由长度更长,业务量相同时需占用更多的工作资源,且其连通度较小,P 圈的性能比较差,故相较于 Cost239 网络而言,其保护成功率在业务量达到 120 时,已经不能够实现 100% 保护,也就是计算出来的保护资源并没有完全配置成功,所以 HPM 的性能无法保障。而 Cost239 网络具有较大的连通度,P 圈性能较好,因而具有更低的冗余度(图 4),相同业务量时需要的保护资源更少。所以,Cost239 网络直到业务量很大时依然能够实现几乎 100% 的保护成功率。对于网络资源足够或者连通性较好情况时,采用 HPM 可以达到更好的效果。而资源不足时需要采用 LFM 保护方式提高网络的效率。

在实际的网络应用中,经过多次的转发和过长的传输距离会影响到光信号的质量,并且会影响到业务恢复时间。需要对于配置的保护圈的长度进行限制,以避免故障时因业务恢复路径过长或经过多

次转发而影响通信质量,图 6 给出了引入 P 圈跳数限制时对网络资源冗余度的影响。可以看到,当 P 圈的长度减小时,整个网络的资源冗余度呈上升的趋势。对于 Cost239 网络拓扑,资源冗余度和跳数的关系更为密切,因为 Cost239 的网络连通性较高,节点数目少,因此计算出来的 P 圈长度小于在 NSFnet 拓扑环境下计算出来的 P 圈长度。NSFnet 的连通性较低,节点数多于 Cost239,通常计算出来的 P 圈平均长度可以达到 10 跳左右,因此具有较高的资源冗余度,并且该冗余度受最大跳数限制的影响较小。由于 P 圈的最大跳数限制,其最大长度减小时,跨接链路数量会变少,使得其冗余度增大。引入 P 圈最大跳数的限制,可以限制保护圈的长度,但是考虑较长的 P 圈通常具有较高的综合容量效率,故在实际的应用中,需要权衡 P 圈的长度和资源冗余度的相互关系。

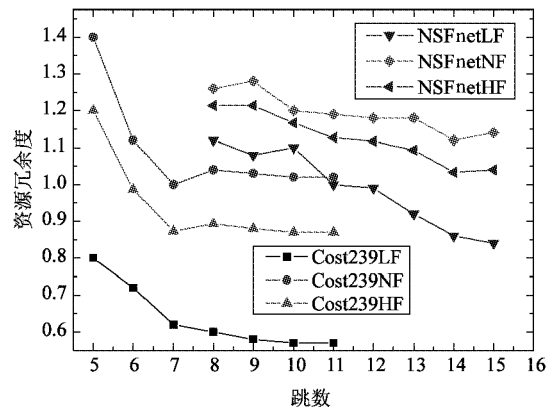


图 6 跳数对 P 圈性能的影响

表 2 对几种常见的生存性方案的业务恢复时间和占用保护资源做了一个简单的对比。业务恢复时间的设定包含信令时间和 20ms 的设备倒换时间,其中信令时间包括故障的发现与定位时间、倒换指令处理时间和传递时延等。采用 1:1 方案时恢复速度最快,只需要 30 多 ms;采用重路由方式需要的业务恢复时间高达 100 多 ms。而采用 P 圈实现网络生存性时故障业务恢复速度比较快,发生链路故障时需要 40 多 ms 的恢复时间,发生节点故障时也只需要 50 多 ms 的恢复时间,说明了 P 圈具有快速的业务恢复能力。

表 2 业务恢复时间比较

保护方式	重路由	1:1	P 圈 (链路故障)	P 圈 (节点故障)
恢复时间(ms)	105	32	42	53
占用保护资源	不占用	较多	较少	较少

4 结 论

本文借鉴已有的关于链路保护和节点保护的 P 圈构造和配置方法,提出了一种基于 P 圈的混合故障环境下的保护模型,根据混合容量效率进行 P 圈优选,并扩展仿真平台和已有的算法进行了比较,仿真结果表明在网络负荷较低时,可以在实现 100% 的混合故障保护的前提下,减少保护资源的配置,提高网络资源利用率。并且综合保护恢复速度和资源效率等因素,给出具有最大 P 圈跳数限制下的 P 圈配置方案,对于实际网络的操作具有指导性的意义。但是在实际的网络运营中,如果出现网络资源受限的情况,该算法配置的资源无法实现规划时的目标,保护资源的利用效率会迅速降低。因此,未来的研究方向需要考虑如果出现保护资源无法配置时应当能够自适应的改变资源分配的策略,使未来的光网络具有更高的智能型。

参考文献

- [1] Doucette J, He D, Grover W D, et al. Algorithmic approaches for efficient enumeration of candidate p _ Cycles and capacitated p _ Cycle network design. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, Banff, Alberta, Canada, 2003. 212-220
- [2] Grove W D, Stamatelakis D. Cycle-oriented distributed pre-configuration: ring-like speed with mesh-like capacity for self-planning network restoration. In: Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Communications(ICC), Atlanta, GA, USA, 1998, 537-543
- [3] Schupke D A, Scheffel M C, Grover W D. An efficient strategy for wavelength conversion in WDM p-cycle networks. In: Proceedings of the 4th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, Banff, Alberta, Canada, 2003. 221-227
- [4] Stamatelakis D, Grover W D. IP layer restoration and network planning based on virtual protection cycles. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, 18(10):1938-1949
- [5] Doucette J, Giese P A, Grover W D. Combined node and span protection strategies with node-encircling p-cycles. In: Proceedings of the 5th International Workshop on Design of Reliable Communication Networks, Island of Ischia, Italy, 2005. 213-221
- [6] Shen G X, Grover W D. Extending the p-cycle concept to path segment protection for span and node failure recovery. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(8):1306-1319
- [7] 臧云华, 马媛媛, 邓宇等. 一种基于 P 圈的 ASON 节点保护方案. 高技术通讯, 2008, 18(4):341-344

A hybrid p-cycle protection model for node/span failures in ASON

Li Bin, Zang Yunhua, Deng Yu, Lee Kuei-Jen*, Huang Shanguo, Gu Wanyi

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education,
Beijing University of Post and Telecommunications, Beijing 100876)

(* Department of Communication Engineering, Oriental Institute of Technology, Taipei 22061, P. R. China)

Abstract

On the basis of the research on recovery from node failures and link failures in automatically switched optical networks (ASON), a hybrid p-cycle protection model was designed. Furthermore, a heuristic p-cycle algorithm for absolutely recovering the network traffic during hybrid protection was proposed, and a p-cycle deployment solution under the limit of maximum p-cycle hop count for practical networks was given. The algorithm can provide full protection against single node failures, and takes single link failures into consideration as well. The proposed algorithm was evaluated under a static traffic model based on OPNET simulation platform with COST239 and NSFnet topologies. The extensive simulation results show that the proposed algorithm has the advantages of shorter recovery time and lower capacity redundancy compared with the present algorithms.

Key words: p-cycle, hybrid protection, half-straddling, automatically switched optical networks (ASON)