

基于资源个性化需求感知的生存算法设计

林国勇

(广西民族大学相思湖学院 广西 南宁 530008)

摘要 通过梳理现有 ASON 通路对搜索算法的瓶颈,提出一种能区分不同 SLA 波长业务对通路对资源个性化需求进行感知,并提供差异化自愈的生存算法。本着共享风险链路组(SRLG)相对分离原则,通过分布式迭代计算搜索两个在源/宿节点对间未途经同一个 SRLG,且满足 SLA 对带宽资源可靠性需求的通路。通过定义失效风险模型感知不同 SLA 的波长业务所需的差异化定制服务,计算出基于 SRLG 相对分离的通路对资源。根据通路对各自动态权值的实时排序完成通路对的筛选。经生存性指标评估表明,该算法对 ASON 生存性的贡献最大。

关键词 智能光网络 通路对 共享风险链路组 参量 生存性

中图分类号 TP3 TN929 **文献标志码** A **DOI**:10.3969/j.issn.1000-386x.2020.07.011

DESIGN OF SURVIVAL ALGORITHM BASED ON INDIVIDUALIZED DEMAND PERCEPTION OF RESOURCES

Lin Guoyong

(Xiangsihu College, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530008, Guangxi, China)

Abstract By summarizing the bottleneck of the existing ASON path pairs search algorithm, this paper proposes a survival algorithm which can distinguish different SLA wavelength service to perceive the personalized demand of path pairs resources and provide the differentiated self-healing. Based on the principle of relative separation of shared risk link group(SRLG), it searched for two paths that did not access the same SRLG between source/host node pairs and met the reliability requirements of SLA for bandwidth resources by distributed iterative computation. The algorithm perceived the differentiated custom services needed by different SLA wavelength services by defining the failure risk model. And it calculated the path pair resources based on the relative separation of SRLG. The path pairs were screened according to the real-time sorting of dynamic weights. The survivability index evaluation shows that the algorithm contributes the most to the survivability of ASON.

Keywords ASON Path pairs Shared risk link groups Parameters Survivability

0 引言

为了应对云计算和大数据技术部署下光网络载荷呈现指数级暴增的情形,在传统光网络链路层、网络层、传输层的网元中植入多效控制件构建智能控制平面,使各层网元支持相同信令的构思应势而生。在智能控制平面的介入下,光传送网在实施基于不同 SLA^[1] 波长业务的故障智能定位、智能检测、智能自愈将成为

可能。以 ASON^[2] 为例,该网络突破了传统网络受链路构建方式束缚而无法为不同 SLA 波长业务提供承载安全保障的瓶颈,通过改善光路资源管理效率、扩展局向协议来促进光传送网上通路资源的调度,以降低 SLA 波长业务请求失效的风险,提升全网的生存性。同时 ASON 的部署克服了繁琐的电路配置产生巨大的时间代价问题,使该网络在响应不同 SLA 的波长业务对资源请求差异化服务提供了可能。正是这些优势吸引了业界频繁地在 ASON 上开展与波长业务承载算法

相关的探讨,但其中多以通路保护研究为主。甚至一些组织机构也从功能框架上对ASON的生存机制进行统一界定。以国际电联制定的8080建议为例,该建议虽然规定了各类波长业务遭遇异常服务质量(QoS)时的自愈方法,但却未明确自愈实施细则。作为该建议的补充,国际互联网工程任务组为ASON在实施波长业务承载过程中可能面临通路资源匮乏的风险定义了SRLG,以降低自愈过程中工作通路(WC)和保护通路(PC)同时失效的风险。

当前,与此SRLG相关的通路研究主要有ILP算法、APF算法、KSP算法。ILP算法思想^[3-4]虽能规避通路对因共享的物理资源遭遇异常而同时失效的风险,但繁琐的计算过程和高昂的时间成本均表明复杂度不占优势。且计算复杂度与网络规模呈正比的特征进一步局限了该算法只能部署在规模较小的网络中,降低了实用性。APF算法机制^[5-6]是通过参照链路途经SRLG的数量规模对链路权值进行定义,以便让WC尽可能避开那些隶属于多个SRLG的链路。虽然该机制在计算复杂度方面有所改善,却忽略了链路带宽利用率极小化以及SRLG陷阱等关键性问题。KSP算法策略^[7]是从节点对中计算出K条最短WC用于规避波长业务请求失效的风险,然后参照权值排序锁定基于SRLG分离的最佳通路对。虽然提升了实用性,但随波长业务规模增加,算法复杂度也将上升。尤其在参数K较大的情形下表现出的时间代价依然较大。此外,虽存在另外一些复杂度和时间成本均较低的相关研究,比如基于业务区分的路由算法^[8],但事实证明这些研究极易遭遇通路对同时失效的风险。少数研究即便顾及到SRLG陷阱风险问题,也因缺乏考虑不同SLA波长业务对通路资源的客观需求而限制了这些研究的可部署性。基于上述主流研究的单一性,本文从算法复杂度和时间成本代价角度出发,本着兼顾SRLG陷阱问题和SLA区分的原则,构思了一种基于不同SLA波长业务对通路资源客观需求感知的自愈算法,旨在改善ASON在应对波长业务承载期间全网的生存性^[9]。

1 基于分离原则的SLA可靠性分析

既有的生存算法研究虽是基于SRLG理念对波长通路展开保护,但只考虑2条以内链路出现故障的情形。这样的保护思想从表面上看虽然使得WC和PC都保持了分离的状态,但部署在复杂网络中时两者却极有可能同属于某一个SRLG。一旦该SRLG出现异

常QoS事件,势必导致WC和PC同步失效。可见,该情形下的链路分离、网元分离只能视为SRLG的一种特殊情况而不具备广泛的适应性。因此要显著改善复杂全局网络的生存性,就不得不考虑在源宿网元对内部计算出不但不属于同一个SRLG,还要满足波长业务对通路资源可靠性需求的WC和PC。以此规避WC和PC因同一个SRLG出现异常QoS而引发的通路对同步失效风险,即遵循相对分离原则。基于该原则计算出的通路对可为不同SLA提供通路资源的可靠性保证。

假设五个网元构成了如图1所示的布局图,其对应的SRLG拓扑结构如图2所示。此时由网元1向网元3发起一个波长业务的连接请求。根据KSP启发式算法思想,将最短的 e_3 直接定义为网元对 $[1,3]$ 的WC。然而此举决定了后续难以从全网中寻得与 e_3 保持SRLG分离的PC。这是缘于网元对 $[1,3]$ 间的其他组合路径,如 $e_5 + e_4$, $e_6 + e_7 + e_4$, $e_1 + e_2$,和作为WC的 e_3 同时归属于第3个、第8个SRLG。因此KSP算法的计算策略无法保证全网的生存性。

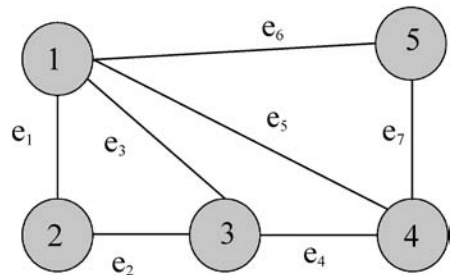


图1 网元布局图

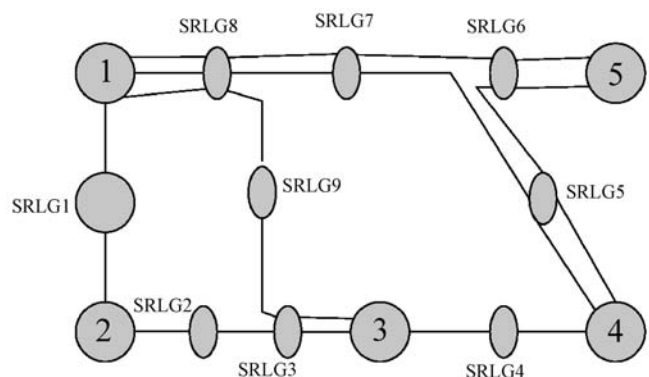


图2 共享风险链路组图

但是,相对分离原则下的生存算法在感知 e_3 与 $e_5 + e_4$, $e_6 + e_7 + e_4$, $e_1 + e_2$ 隶属于相同SRLG后,将重新计算出路径组合 $e_1 + e_2$ 用于取代 e_3 ,定义为网元对 $[1,3]$ 之间波长业务的WC,同时将路径组合 $e_6 + e_7 + e_4$ 定义为该波长业务下基于SRLG相对分离的PC。可见,相对分离原则下的生存算法在满足波长业务对带宽资源需求的前提下,可为波长业务的承载与保护提供良好的保障。同时,根据SLA协议规定,在通路

对中承载不同层级的波长业务时,可通过测试该波长业务在一定周期内实施路由^[10]局向的稳定程度来定义不同层级波长业务的可靠等级。因此,在全局网络中为不同 SLA 波长业务提供一个基于不同等级可靠性的资源需求为前提,寻找一个基于 SRLG 相对分离的通路对方案是可行的。

2 算法设计

2.1 失效风险模型

定义一个共享了光纤/缆、通道和路径等物理资源的通路对对应于某编号的共享风险链路组($S-No.$)。一旦上述四个层次的物理^[11]资源出现异常,则源宿网元对之间所有链路上的各等级 SLA 波长业务都将面临失效风险。若这些链路在不同程度上共享了不同的物理资源,那么链路上各等级 SLA 波长业务面临的失效风险程度也将有所不同。因此链路对物理资源的共享程度与相同 $S-No.$ 内的链路出现失效风险的概率息息相关。假设某一个 $S-No.$ 内有 n 条链路,且定义 $m < n$,则可以将单个 SRLG 的失效概率记作:

$$L(srlg) = P(m \text{ 失效} | n \text{ 失效}) \quad (m, n) \in srlg$$

由于在实际应用中,该失效率的参数可通过链路所共享的四个层次物理资源来量化,故此假设该失效率为给定的赋值。

2.2 基于 SLA 资源需求模型

实际应用中由于并非所有的波长业务均要求提供 1:1 的带宽资源保护,也就是无需在基于 SRLG 绝对分离的情形下为所有不同 SLA 的波长业务寻找通路对。于是,本次研究的思路调整为只要通路对的资源能够满足不同 SLA 波长业务的可靠性需求即可,无需遵循 SRLG 绝对分离的原则。因此,为使链路满足某一个波长业务对带宽资源的可靠需求,要求波长业务对链路带宽资源的可靠率 R 必须超过通路对同时失效的可能性,即: $1 - R \geq L(WC, PC)$ 。

令第 m 条链路的可靠性为 A_m , 链路 m 和链路 n 的失效率为 $L(n | m)$, 参考贝叶斯定理,可将该式转换为: $L(WC, PC) = \sum_{m \in WC} [(1 - A_m) \times \sum_{n \in PC} L(n | m)] \times [1 - \prod_{m \in WC} A_m]$ 。当链路 m 和链路 n 对应于两个不同的 $S-No.$ 时,通路对不会同时失效。但在实际应用中,故障往往多发网元中。因此如果通路对所共享的某一个网元出现异常,则相同的 SRLG 上的链路^[12]都将面临着失效风险。于是有:

$$L(PC | WC) = \sum_{m \in WC} \{ [\sum_{(n \in PC)(S-m) \cap (S-n) \neq \phi} L(n | m)] \times [1 - A_m] \}$$

式中, $S-m$ 和 $S-n$ 分别为链路 m 和链路 n 所对应的 $S-No.$ 集合。由此可得:

$$\frac{1 - R}{1 - \prod_{m \in WC} A_m} \geq \sum_{m \in WC} [\sum_{(n \in PC) \cap (S-m) \cap (S-n) \neq \phi} L(n | m) \times (1 - A_m)]$$

将通路对对应于同一个 $S-No.$ 的链路定义为风险链路,同时令 $srlg-i$ 为某一个 $S-No.$ 。当定义每条链路仅对应于唯一的 $S-No.$, 那么在风险链路仅一条时,上述公式演化为:

$$\frac{1 - R}{1 - \prod_{m \in WC} A_m} \geq L(srlg - i) \times (1 - A_m)$$

$$(S-m) \cap (S-n) = srlg - i, m \in WC, n \in PC$$

当存在多个风险链路的情形时,上述公式进一步演化为:

$$\frac{1 - R}{1 - \prod_{m \in WC} A_m} \geq \sum_{(m \in WC) \cap ((S-m) \cap (S-PC) = srlg-i)} [L(srlg - i) \cdot (1 - A_m)]$$

在遵循相对分离原则的前提下,若存在多个风险链路,只要其满足该式即可视为该链路是符合不同 SLA 的波长业务对带宽通路资源的可靠性需求^[13]。

为了评估每个链路作为通路对的可行性,算法将为每一个链路定义两个权值评估函数分别展开计算。通过该函数的动态考量,将搜索出 SRLG 中的风险链路用于实施不同 SLA 的波长业务对带宽通路资源的可靠性需求分析。令某个通路对的权值为 σ_{wc-l} 和 σ_{pc-l} , 当源节点发起波长业务请求时,为通路对的链路分别赋予权值函数。该权值函数分别记作:

$$\sigma_{wc-l} = \begin{cases} \frac{B_{all}}{B_{idle}} \cdot 0.5 & B_{idle} \neq 0 \\ \infty & B_{idle} = 0 \end{cases}$$

$$\sigma_{pc-l} = \begin{cases} C & (m \in WC) \cap (S-l) \cap (S-m) \neq \phi \\ \infty & (l \in WC) \cap (B_{idle} = 0) \\ \frac{B_{all}}{B_{idle}} \cdot 0.5 & \text{其他} \end{cases}$$

若假设全局网络的链路带宽资源均衡^[14]分布,则链路总带宽 B_{all} 为一个恒数。同时链路的闲置带宽表征为 B_{idle} 。定义 C 为一个数值较大的恒数。如果途径 WC 的链路和 l 同属于某一个 $S-No.$, 则要参照公式

$$\frac{1 - R}{1 - \prod_{m \in WC} A_m} \geq \sum_{(m \in WC) \cap ((S-m) \cap (S-PC) = srlg-i)} [L(srlg - i) \cdot (1 - A_m)]$$

进一步分析这样的风险链路能否符合不同 SLA 的波长业务对带宽通路资源的可靠性需求。

3 算法实施

步骤 1 初始化全网,将迭代计算参量置零。若未收到建立链接的请求指令,根据全网链路初始权值等状态参量动态^[15]更新链路的权值;若收到建立链接的请求指令,进入下一步骤。

步骤 2 若迭代计算参量为零,经由 σ_{wc-l} 函数更新所有链路的权值,并根据 Dijkstra 算法规划出 WC。如果未能寻得 WC,则返回步骤 1;反之进入下一步骤。若此时迭代计算参量不为零,则参照前一次迭代计算过程计算出来的 WC 权值,根据 Dijkstra 算法规划出 WC。如果依旧不能寻得 WC,说明建立链接的请求指令被中断,此时需重返步骤 1;反之进入下一个步骤。

步骤 3 分析 R 和 $\prod_{m \in WC} A_m$ 关系。若前者大于后者,需对当前 WC 实施保护,进入下一个步骤;反之无需对其实施保护,可直接为该 WC 分配资源,返至第一个步骤。

步骤 4 参照 σ_{pc-l} 函数更新所有链路的权值,并根据 Dijkstra 算法规划出 PC。同时分析 C 和 $\sum_{n \in PC} \sigma_{pc-l}$ 关系。若前者大于后者,表明通路对 WC 和 PC 遵循绝对分离,为 PC 分配相应资源,并返至第一个步骤;反之说明通路对遵循相对分离,此时需要进入下一个步骤接受可靠性需求分析。

步骤 5 从保护路径中定位出权值为 C 的风险链路,并通过分析 $\frac{1-R}{1-\prod_{m \in WC} A_m}$ 和 $\sum_{(m \in WC) \cap ((S-m) \cap (S-PC) = srlg-i)}$ $[L(srlg-i) \cdot (1-A_m)]$ 之间的关系来判断当前通路对能否符合不同 SLA 的波长业务对带宽通路资源的可靠性需求。若前者小于后者,表明通路对未能符合不同 SLA 的波长业务对带宽通路资源的可靠性需求。此时随机定义一条风险链路的工作权值并赋值 ∞ ,同时对迭代计算参量执行一次加法计数后返至第二个步骤。

4 算法成效

对生存算法成效的评估主要在 NSFNET 网络上开展,其结构如图 3 所示,可见整个网络共有 21 个链路和 14 个网元。假设每个链路仅分配唯一的 $S-No.$, 该链路平均最大可承载 16 个波长业务,链路的平均可靠率在区间 $[0.97, 0.99]$ 内。同时假设 14 个具有全光波变换^[16]功能的网元中可随机生成源宿网元对,且每

一次所发起的业务连接建立请求均被定义为是一个波长业务的带宽,该波长业务也在此源宿网元对之间随机产生。该波长业务对链路资源的可靠性要求在区间 $[0.97, 1]$ 内。假设算法开展三次迭代计算,且为单个 SRLG 的失效率参数赋值 0.5、0.3、0.2。

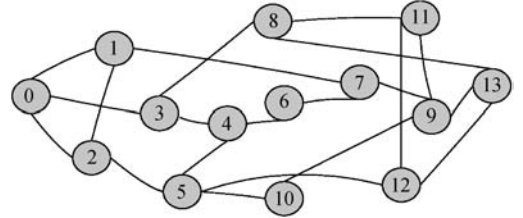


图 3 NSFNET 网络拓扑图

为了考察生存算法在筛选通路方面的相对优势,在通路资源配置上选择专用保护算法(SPA)与生存算法做对比分析。对于 SPA 算法,其思想是为每一个 WC 配置一个专用的 PC,且要求网中其他的光通路不能分享该 PC 上的光波带宽资源。算法对 ASON 全网波长业务的保护成效可通过分析阻塞率、资源占用率和 PC 跳数等指标^[17]来确定。

图 4 描述了两种算法下的不同 SLA 波长业务请求链接的通畅程度。正如前文所述,并非所有波长业务均要求提供 1:1^[18]的通路资源保护,即无需在基于 SRLG 绝对分离情形下为所有不同的 SLA 波长业务寻找通路对。本文构思的生存算法正是基于此实际情况而设计,因此算法依据不同波长业务对通路资源可靠性要求的不同,在不存在 SRLG 绝对分离的通路对情形下,依然可搜索出合适的 PC 用于为不同 SLA 的波长业务提供链接请求保障。但 SPA 算法却无法针对此情形响应出有效的选路策略,进而导致该波长业务的链接请求无法获得保证。同时,生存算法主张的循环迭代计算机制在应对 PC 无法符合 SRLG 相对分离要求的情形时,可自动将风险链路删除并重新实施路径的计算与分析,从而避免陷入无解的境况。相比之下,SPA 算法在面对此情形时却无法搜索到和 WC 保持分离的 PC。正是由于上述原因才导致生存算法在应对不同 SLA 波长业务请求时能保证较好链接率。

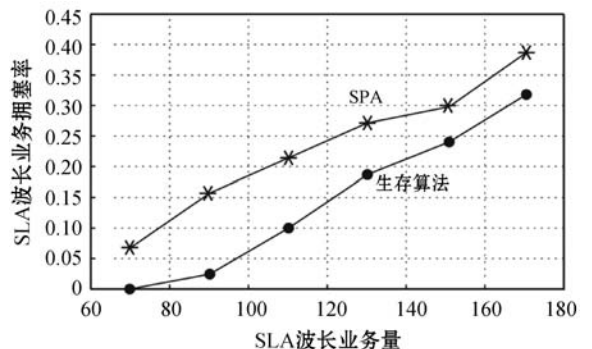


图 4 不同算法下 SLA 波长业务通畅程度

图5所示曲线描述了不同算法下PC跳数大小情况。该指标体现了不同SLA波长业务的自愈时长,是衡量ASON生存能力的重要指标之一。其自愈时间和PC的段数呈正比。观察图中曲线可知,生存算法在本项测试中表现出的PC段数相对较少,因此该算法的自愈时长较短,于是实施该算法的ASON将具有更好的生存性。导致生存算法曲线走势总体较低的原因是该算法在搜索PC时将那些和WC同属于某一个编号S-No.的链路也考虑在内,展开选路的计算。但SPA算法思想与此截然相反,其选路机制主张放弃那些与WC同属于某一个编号S-No.的链路。这就决定了SPA算法的计算对象锐减,需绕行更远的链路方可获得PC。这显著增加了PC的段数,进而使得SPA算法下的跳值曲线走势总体偏高。

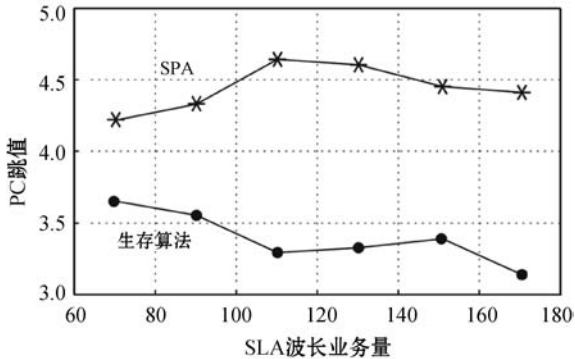


图5 不同算法下PC跳值

图6所示为不同算法下的PC资源被占用的程度。该指标主要用于描述为一个SLA的波长业务链接请求需要的WC资源,所提供的预留PC资源的规模,可定义为WC和PC跳数的比值。从图中曲线走势不难看出,生存算法下的ASON保护带宽资源被占用的程度较低。缘于生存算法的思想主张,在保持通路相对分离的前提下若WC可满足不同SLA波长业务对其资源^[19]的可靠性需求,就不再额外地去占用PC资源,因此可最大程度降低波长业务的请求对ASON全网开销资源的消耗。故生存算法在节约全网通路资源方面表现出了SPA算法所不具备的优势。

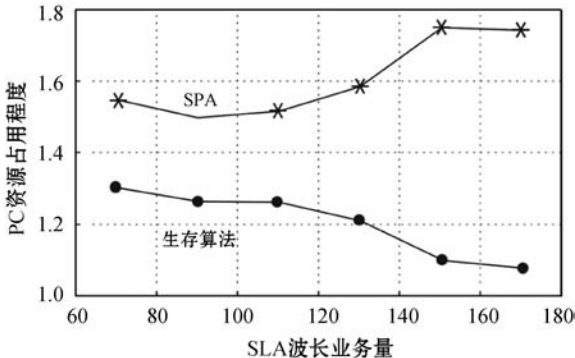


图6 不同算法下PC资源占用程度

根据表1数据显示,对于相同业务量的SLA波长业务请求,随着迭代计算频次的增加,业务通畅程度逐步好转。但纵观三组测试^[20]数据可见,好转幅度最为显著的是在赋值2和3期间,在随后的表现中这种变化趋势较为微弱。因此在本次定义的ASON网络环境中,三次以内的迭代频次对生存算法效能度的影响最佳。

表1 迭代计算频次对波长业务通畅度的影响力

SLA波长业务规模	迭代计算频次			
	2	3	4	5
90	0.036	0.024	0.016	0.014
130	0.201	0.182	0.176	0.172
170	0.334	0.321	0.316	0.313

5 结 语

助力大数据技术在ASON中的融合应用发展,首要解决的问题是网络生存性。本文从生存性指标出发提出了一种基于不同SLA波长业务对通路对资源不同需求的生存性算法。算法本着相对分离原则从SR-LG中规划出科学的通路对用于实施SLA波长业务的承载。评估数据表明所构思的生存算法能够较好地改善ASON在应对SLA多波长业务承载请求时的生存能力。相对于传统的算法方案,本文算法具有更优的全局性和适应性。

参 考 文 献

- [1] 葛晨晖,黄晋竹. 自相似业务下共享通道保护WDM网络性能分析[J]. 电子与信息学报,2014,36(6):1292-1298.
- [2] 武文彦. 智能光网络技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2015.
- [3] Xiong Y Z, Xu D H, Qiao C M. Achieving fast and bandwidth-efficient shared-path protection[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(12):1465-1467.
- [4] Kodialam M, Lakshman T. Dynamic muting of bandwidth guaranteed tunnels with restoration[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2015,34(7):1961-1973.
- [5] Jaumard B, Truong D. Backup path re-optimizations for shared path protection in multi-domain networks[J]. IEEE GLOBECOM'15, 2015, 17(3): 152-158.
- [6] Mukherjee B, Zang H, Ou C H. Path-protection and wavelength assignment in WDM mesh networks under duct-layer constraints[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,2014, 22(2): 1336-1339.

- [7] 王明中,谢剑英,陈应麟.一种新的 Kth 最短路径搜索算法[J].计算机工程与应用,2016,52(3):153-157.
- [8] Fumagalli A, Tacca M. Differentiated reliability (DiR) in WDM rings without wavelength converters[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2016,24(4):1618-1631.
- [9] 曲桦.具有多重故障恢复能力的光网络生存性机制[J].北京邮电大学学报,2016,39(12):39-42.
- [10] 任金秋,张建辉,汪斌强.支持多故障恢复的 MPLS 快速重路由[J].计算机工程与计,2015,36(15):3861-3864.
- [11] 陈翻,朱娜.WDM 网络分布式物理损伤感知算法[J].光通信研究,2016,33(6):8-10.
- [12] 单广军,朱光喜,刘德明,等.基于关键链路预测的动态路由和波长分配算法[J].电子学报,2015,43(11):1673-1677.
- [13] 黄斌.智能光网络及其关键技术研究[J].激光杂志,2017,38(1):72-75.
- [14] 王健全.全光网状网保护方式的研究[J].光子学报,2015,44(2):98-102.
- [15] 杨慧峰.光网络带宽分配机制与技术发展分析[J].光通信技术,2017,41(1):21-24.
- [16] 温向明,关若其,朱祥华,等.波长可变光网络中的动态路由和波长分配算法研究[J].北京邮电大学学报,2014,37(6):33-37.
- [17] 郭磊,虞红芳,李乐民.网状 WDM 网中双链路失效的共享路径保护设计[J].电子与信息学报,2015,37(11):2578-2586.
- [18] 吴润泽.电力 ASON 中基于 SRLG 完全分离 P 圈的链路故障保护算法[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):43-49.
- [19] 王辉.GMPLS 光网络中流量工程研究[J].微电子学与计算机,2016,33(5):52-57.
- [20] 王超,郑小平,李艳和,等.自动交换光网络中分级子网恢复机制[J].清华大学学报(自然科学版),2015,55(8):900-905.

(上接第 67 页)

可以看出,当节点工作在高温、低温以及不同湿度环境下时,监测系统所测量的温湿度误差均小于 5%,这说明监测系统具有较高的工作稳定性和测量精确度,基本可以满足寒旱区极端环境的要求。

7 结语

基于 6LoWPAN 和 MQTT 设计的寒旱区野外环境监测系统,经过测试节点功能正常,数据传输准确、稳定,系统功能完整。该研究可提升野外监测信息化,提

高数据的采集密度和质量,对于提升寒旱区野外环境监测的自动化水平和实时性具有一定的实际意义,也为未来构建寒旱区跨学科、跨区域的虚拟同步联合观测系统做好了前期技术储备,在理论研究和应用研究方面都具有重要意义和价值。

参 考 文 献

- [1] 牛栋.中国科学院野外台站网络建设与研究进展[J].林业科技管理,2003(2):27-28,30.
- [2] 朱文平,张耀南,罗立辉.生态水文中无线传感器网络应用研究[J].冰川冻土,2011,33(3):573-582.
- [3] 葛咏,王江浩,王劲峰,等.基于回归克里格的生态水文无线传感器网络布局优化[J].地球科学进展,2012,27(9):1006-1013.
- [4] 吴阿丹,郭建文,李建轩,等.基于 Web 的黑河流域生态水文 WSN 自动观测数据可视化系统应用研究[J].遥感技术与应用,2013,28(3):416-422.
- [5] 刘承桥,张耀南,冯克庭,等.基于 MSP430F149 的冰川参数采集系统[J].传感器与微系统,2015,34(5):59-62,65.
- [6] Montenegro G, Kushalnagar N, Hui J, et al. Transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks:RFC 4944[R]. USA: Internet Engineering Task Force, 2007.
- [7] Kim J, Haw R, Cho E J, et al. A 6LoWPAN sensor node mobility scheme based on proxy mobile IPv6[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012, 11(12):2060-2072.
- [8] 种楠楠,岳世明.基于 6LoWPAN 的电镀废水自动监测控制系统设计[J].电镀与精饰,2019,41(2):33-38.
- [9] 冯冬青,朱行武.6LoWPAN 智慧城市数据采集系统的设计与实现[J].计算机工程,2017,43(11):286-291.
- [10] 李占波,李东秀.改进的 6LoWPAN 分片地址压缩方案[J].计算机工程与设计,2016,37(4):877-881.
- [11] Ruchi G, Sanjay S. Modified and Improved IPv6 Header Compression(MIHC) scheme for 6LoWPAN[J]. Wireless Personal Communications,2018,103(3):2019-2033.
- [12] 阳旺,樊振宇,吴帆.基于 6LoWPAN 与 MQTT 的无线传感网络设计[J].国防科技大学学报,2019,49(1):161-168.
- [13] Schmitt A, Carlier F, Renault V. Dynamic bridge generation for IoT data exchange via the MQTT protocol[J]. Procedia Computer Science,2018,130:90-97.
- [14] 田广东,叶鑫.基于 Contiki 的 6LoWPAN 边界路由器的设计[J].电子技术应用,2016,42(3):61-63,70.
- [15] Patil A H, Goveas N, Rangarajan K. Re-architecture of Contiki and Cooja regression test suites using combinatorial testing approach[J]. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes,2015,40(2):1-3.