

基于链路生命期的光数据中心网络业务恢复方案

鲍宁海, 袁园, 刘自谦, 匡明

(重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘 要: 针对大规模灾难事件对光数据中心网络造成的关联性和级联性故障, 提出一种基于链路生命期的灾后业务恢复方案。该方案利用全局业务带宽退让和局部链路的有限生命期, 缓解灾后网络的带宽资源危机, 根据灾难损毁业务的带宽需求和持续时间需求, 确定业务恢复优先级, 采用任播与多播相结合的路由策略提高业务的连通性和带宽资源利用率。仿真结果表明, 所提方案能够最大限度地降低业务中断率, 并有效地延长灾难损毁业务的持续时间, 减少数据流量损失。

关键词: 光数据中心网络; 链路生命期; 网络生存性; 业务恢复; 业务持续时间

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018146

Link-lifetime-based service restoration in optical datacenter network

BAO Ninghai, YUAN Yuan, LIU Ziqian, KUANG Ming

School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract: Aiming at the correlated and cascading failures caused by large-scale disasters, a post-disaster service restoration scheme was proposed. This scheme utilized global service bandwidth concession and the limited lifetime of local links to mitigate resource crunch in the post-disaster network. According to their bandwidth and holding time requirements, the impacted services for restoration was prioritized firstly, then jointly employed anycast and manycast routing strategies to improve the service connectivity and bandwidth resource utilization. Simulation results show that the proposed scheme can significantly reduce the service loss ratio, effectively prolong the holding time of the impacted services and decrease the data flow loss ratio in the post-disaster network.

Key words: optical datacenter network, link lifetime, network survivability, service restoration, service holding time

1 引言

数据中心 (DC, data center) 是一种具有大规模并行计算能力和海量数据存储能力的超级资源中心。将多个地理上分散的数据中心通过大容量、低时延、稳定可靠的波分复用 (WDM, wavelength division multiplexing) 光网络组织起来, 构建成高速互联的光数据中心网络, 能够更加高效灵活地为

用户提供各类基于内容的云业务^[1-4]。在光数据中心网络中, 服务的内容可以在多个位于不同地理位置的数据中心保存副本, 持有副本的任何一个或多个数据中心都可以同时为用户提供相同的服务, 这使基于任播和多播的内容交付技术在光数据中心网络中成为主流^[5]。

近年来, 大规模灾难事件对广泛分布的电信基础设施造成了严重的威胁和破坏。例如, 2008 年发

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61671092); 重庆市基础科学与前沿技术研究基金资助项目 (No.cstc2016jcyjA0083); 重庆市高校创新团队基金资助项目 (No.KJTD201312)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61671092), The Fundamental Science and Frontier Technology Research Project of Chongqing (No.cstc2016jcyjA0083), The College Innovation Team Project of Chongqing (No.KJTD201312)

生的汶川地震、2011 年发生的日本东部地震和海啸以及 2012 年分别登陆美国南部的飓风艾萨克和东北部的飓风桑迪等都对当地的通信网及电力设施造成了巨大的破坏和长时间的影响^[6-8]。因此,应对大规模灾难损毁的网络生存性将成为影响光数据中心网络发展的重要问题^[9-10]。

根据光数据中心网络业务的特点,本文研究并提出一种基于链路生命期的光数据中心网络业务恢复方案,以解决大规模灾难情况下,数据中心业务大量中断、业务持续时间下降以及数据交付率低的问题。大规模灾难引发的区域性网络组件损毁(关联性故障)和部分链路生命期下降(级联性故障)将造成严重的网络带宽资源危机。针对这一现象,该方案利用全局业务带宽退让和局部链路的有限生命期,为恢复操作提供必要的带宽资源保障;根据灾损业务的带宽需求和持续时间需求确定业务恢复顺序,为恢复操作提供合理的资源调度依据;采用任播与多播相结合的路由策略,提高恢复操作的灵活性和带宽资源的利用率。研究结果表明,本文提出的方案能够显著地降低灾后网络的业务中断率,并有效地延长灾损业务的持续时间,减少数据交付损失率。

2 相关工作

目前,光数据中心网络的生存性问题已经受到各国研究人员的广泛关注,特别是在大规模灾难抗毁问题上已取得了一些研究成果。

针对大规模灾难可能造成的数据中心损毁和业务内容丢失的问题,文献[11]提出一种灾难风险敏感的数据中心选址和动态内容管理方案,以降低数据中心在灾难事件中的损毁概率,并最大限度地提高业务内容的可用性与可达性;文献[12]提出一种快速协同数据备份算法,使备份数据吞吐量最大化,从而有效地缩短备份时间窗口。

在大规模灾难预警模型下,文献[13]提出一种针对高危数据中心的快速数据撤离算法,以实现最短时间内大量的数据撤离;文献[14]研究基于最小存储代价和传输代价的数据紧急备份方案,在有限预警时间约束下,通过最优站点选择和站点间多通路传输的方式,实现数据的最小代价紧急备份。

文献[15]研究一种数据中心网络的内容与路由保护方案,采用冗余副本安置和任播路由策略,实现业务通路和终端(内容)节点的抗毁。文献[16]提出一种灾难风险敏感的数据中心业务配置方案,

采用多播路由策略对内容站点和业务带宽进行分散配置,以降低数据中心业务的灾难风险并提高带宽资源利用率。文献[17]针对弹性光数据中心网络的灾难模型,提出一种基于内容连通性的带宽自适应业务保护算法,采用共享风险链路组分离的保护路由策略保障业务内容的连通性,并通过带宽频谱的自适应配置,提高频谱资源利用率。

3 问题描述及示例分析

3.1 问题描述

大规模灾难事件(如地震、海啸、飓风等)可能造成受灾地区大面积的网络组件损毁,而一些未遭受直接损毁的网络组件也可能因电网中断后,备用的电池、燃油耗尽而停止工作,从而使大量的数据中心业务中断或服务时间下降。为了在灾后及时有效地恢复受损业务,本文研究并提出一种基于链路生命期的业务恢复方案。

给定一个 WDM 光数据中心网络 $G(N, D, L)$, 其中, N 为光网络节点集合, D 为数据中心节点集合, L 为光纤链路集合。 N 中的每个节点都具有完全的波长转换能力, L 中的每条链路都具有相同的波长带宽容量 W 。假设灾难发生后,网络中的部分节点和链路完全损毁和中断(不考虑数据中心节点),部分未中断链路的生命期下降。链路生命期是指灾难发生后,部分中继局站电力受限情况下相关线路的持续工作时间,其长短由不同等级线路的备用电力储备情况决定。为简化问题,假设所有线路等级相同,且受灾难影响的线路生命期也相同,而对于未受灾难影响的链路,可假设其生命期为无穷。同时,假设数据中心网络业务的持续时间可根据相关的业务等级协定(SLA, service level agreement)预知或预估^[18-19]。

3.2 示例分析

本节针对所提出的基于链路生命期的恢复(LR, link-lifetime-based restoration)方案和另外 2 种对比恢复方案进行示例分析。对比方案分别为尽力而为的恢复(BR, best-effort restoration)方案和基于完全可靠性的恢复(FR, full-reliability-based restoration)方案,前者在恢复过程中不区分链路生命期是否有限,后者在业务恢复过程中不使用生命期有限的链路。图 1 给出业务的初始配置和 3 种恢复方案配置示例,其中带箭头的实线表示业务的原始配置,带箭头的虚线表示恢复操作后发生变化的业务配置。

给定一个包含 6 个节点和 9 条链路的小型网络

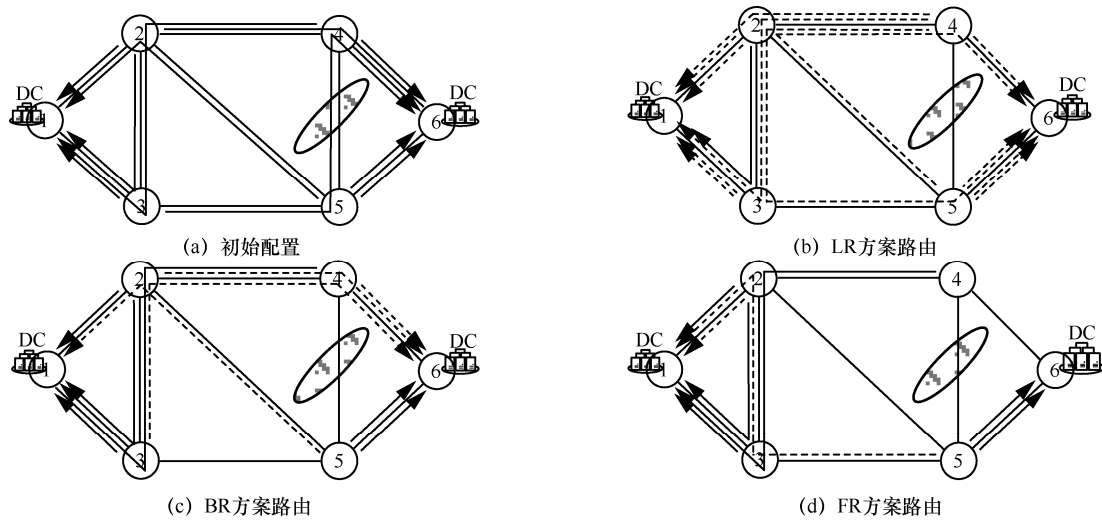


图 1 恢复方案示例

拓扑，如图 1(a)所示。其中，节点 1 和节点 6 为数据中心站点，且均能提供相同的内容和副本，节点 2、3、4、5 为业务请求节点，每条链路的容量均为 15 个单位带宽（如波长）。灾难发生前的原始业务配置如表 1 所示，包括业务带宽需求、灾难发生时的业务剩余服务时间需求（简称时间）以及业务路由（初始路由均采用任播单通路配置），其中， s_i 表示业务请求 i ， p_{x-y-z} 表示相应的业务路由。假设灾难发生后，链路 4—5 损毁，链路 2—5 和链路 4—6 的生命期降为 8 个单位时间（如 8 h）。相应地，受灾难影响的业务包括： s_7 被中断， s_5 、 s_8 、 s_9 服务时间下降。灾难发生后，分别采用 3 种方案对业务进行相应的恢复操作（注：表 2~表 4 仅列出相关恢复操作完成后，相关业务配置相对于表 1 的原始配置发生变化的业务。）。

业务	带宽	生命周期	路由
s_1	8	8	p_{5-6}
s_2	8	1	p_{2-1}
s_3	7	4	p_{5-6}
s_4	4	6	p_{3-1}
s_5	7	14	p_{5-2-1}
s_6	6	14	p_{2-3-1}
s_7	4	16	$p_{3-5-4-6}$
s_8	4	18	p_{2-4-6}
s_9	7	20	p_{4-6}
s_{10}	5	10	$p_{4-2-3-1}$

LR 方案路由如图 1(b)所示。首先将所有受影响业务的带宽全部释放，将未受影响的业务带宽释放 50%，然后根据业务状态和业务剩余服务时间为所有业务排序，最后对排序后的业务依次进行恢复操作。具体的排序规则为：受影响业务优先于未受影响业务，同种状态下剩余服务时间长的业务优先于剩余服务时间短的业务。排序的结果为： s_9 ， s_8 ， s_7 ， s_5 ， s_6 ， s_{10} ， s_1 ， s_4 ， s_3 ， s_2 。对该序列中的每一个业务，首先寻找一条尽量满足服务时间需求且资源代价最小的业务通路，并分配带宽资源，如果该通路不满足业务带宽需求，则继续寻找下一条通路以补充带宽需求。LR 恢复操作完成后配置发生变化的业务如表 2 所示，其中， s_i^j 表示业务请求 s_i 的第 j 条通路。

业务	带宽	生命周期	路由
s_1^1	4	8	p_{5-6}
s_1^2	4	8	$p_{5-2-4-6}$
s_2^1	4	1	p_{2-1}
s_3^1	3	4	p_{5-6}
s_4^1	2	6	p_{3-1}
s_5^1	7	14	p_{5-6}
s_7^1	4	16	p_{3-1}
s_8^1	4	18	p_{2-1}
s_9^1	7	20	p_{4-2-1}
s_{10}^1	3	10	$p_{4-2-3-1}$
s_{10}^2	1	10	$p_{4-2-3-5-6}$
s_{10}^3	1	8	p_{4-6}

BR 方案路由如图 1(c)所示。首先将所有中断业务的带宽全部释放，为每一个中断业务（此例中只有 s_7 ）寻找一条资源代价最小的业务通路，并分配带宽资源，如果该通路不满足业务带宽需求，则继续寻找下一条通路以补充带宽需求。BR 恢复操作完成后配置发生变化的业务如表 3 所示。

表 3 BR 相关业务配置

业务	带宽	生命周期	路由
s_5	7	8	p_{5-2-1}
s_7	4	8	$p_{3-2-4-6}$
s_8	4	8	p_{2-4-6}
s_9	7	8	p_{4-6}

FR 方案路由如图 1(d)所示。首先将所有受影响业务的带宽全部释放，并将图中生命期下降的链路删除，然后为每一个受影响的业务寻找一条资源代价最小的业务通路，并分配带宽资源，如果该通路不满足业务带宽需求，则继续寻找下一条通路以补充带宽需求。FR 恢复操作完成后配置发生变化的业务如表 4 所示。

表 4 FR 相关业务配置

业务	带宽	生命周期	路由
s_5	4	14	$p_{5-3-2-1}$
s_7	0	0	无法恢复
s_8	3	18	p_{2-1}
s_9	0	0	无法恢复

通过对表 1~表 4 的数据分析可以发现，对于 LR、BR 和 FR 这 3 种恢复方案，其业务中断率分别为 0、0 和 20%，业务持续时间损失率分别为 0、32%和 32%，业务流量损失率分别为 5%、31%和 41%。其中，流量定义为带宽与时间的乘积。显然，LR 通过合理利用具有有限生命期的链路资源，可以有效缓解灾后网络资源紧张的情况，并在一定程度上改善受影响业务的服务质量。

4 方案描述

在以上示例说明的基础上，本节将对 LR 方案中的路由策略和算法步骤进行详细描述，相关符号定义如表 5 所示，其中，排序因子 q_s 的定义如式(1)所示， β 为一个数值较小的小数。

$$q_s = \begin{cases} t_s, & s \text{ 为受影响业务} \\ \beta t_s, & s \text{ 为未受影响业务} \end{cases} \quad (1)$$

表 5 符号定义

符号	意义
S	业务 s 的集合
t_s	业务 s 的（剩余）服务时间
t_l	链路 l 生命期
w_l^f	链路 l 的空闲带宽
b_s	业务 s 的需求带宽
c_l^t	链路 l 的时间代价
c_l^b	链路 l 的资源代价
c_p	通路 p 的代价
q_s	业务 s 的排序因子
δ_s	业务 s 的状态标记
S_d	待恢复业务的集合
p_s^j	业务 s 的第 j 条通路
b_s^j	业务 s 的第 j 通路的带宽
γ	业务带宽释放度

4.1 路由策略

LR 方案假设同一业务的内容和副本可以安置于多个数据中心站点，业务请求节点可以向网络中任意一个或多个持有相关内容或副本的数据中心发起业务连接请求，因此，LR 将根据业务请求节点与内容提供节点间的可连通性与路由资源情况，采用任播与多播相结合的路由策略，保证内容的连通性和带宽的可扩展性。同时，为了最大限度地满足业务带宽需求，根据网络资源情况，同一业务请求节点与同一内容提供节点间的路由可采用单通路或多通路配置方式。

本文方案采用 Dijkstra 算法计算最小代价通路。在为业务连接计算最小代价通路时，LR 定义了 2 种链路代价：链路时间代价 c_l^t 和链路资源代价 c_l^b 。链路时间代价 c_l^t 由业务剩余服务时间和链路生命期共同决定，如式(2)所示。若链路 l 的生命期 t_l 大于或等于业务 s 的剩余服务时间 t_s ，表示业务 s 的服务时间不会受到链路 l 的影响；若 $0 < t_l < t_s$ ，表示业务 s 的服务时间会降低；若 $t_l = 0$ ，则表示链路 l 不可用。链路资源代价 c_l^b 由链路上的带宽资源占用情况决定，如式(3)所示。

$$c_l^t = \begin{cases} 0, & t_l \geq t_s \\ 1 - \frac{t_l}{t_s}, & t_s > t_l > 0 \\ \infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$c_i^b = \begin{cases} 1 - \frac{w_i^f}{W}, & w_i^f > 0 \\ \infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

通路代价 c_p 由通路时间代价和通路资源代价这 2 个部分组成，如式(4)所示。

$$c_p = \max_{l \in p} \{c_l^t\} + \alpha \sum_{l \in p} (c_l^b + 1) \quad (4)$$

其中，通路时间代价由通路上最大的链路时间代价决定，通路资源代价由链路资源代价和跳数 1 累加得到， α 为权重系数。

4.2 算法步骤

输入 $G(N, D, L), S, \alpha, \beta, \gamma$

输出 p_s^j, b_s^j

步骤 1 将 S 中所有受影响业务的带宽全部释放并标记 $\delta_s = 1$ ，所有未受影响业务的带宽按 γ 比例释放并标记 $\delta_s = 0$ ，将标记后的所有业务放入集合 S_d 中，将集合 S_d 中的业务按 q_s 值降序排列，初始化 $j = 0$ 。

步骤 2 检查 S_d 中的第一个业务 s ，如果标记 $\delta_s = 1$ ，跳转到步骤 3，否则，令 $j = j + 1$ ，判断业务 s 的通路 p_s^j 上是否有空闲带宽，如果有，分配带宽资源 b_s^j ，跳转到步骤 4，否则，跳转到步骤 3。

步骤 3 根据式(2)和式(3)更新链路代价，根据式(4)为业务 s 计算一条到相关数据中心的最小代价通路，如果成功，令 $j = j + 1$ ，将该通路记为 p_s^j ，并分配带宽资源 b_s^j ，跳转到步骤 4，否则，从 S_d 中删除业务 s ，跳转到步骤 5。

步骤 4 如果 $\sum_{k=1}^j b_s^k < b_s$ ，跳转到步骤 3，否则，从 S_d 中删除业务 s ，跳转到步骤 5。

步骤 5 如果 $S_d \neq \emptyset$ ，置 $j = 0$ ，跳转到步骤 2，否则，算法结束。

根据以上步骤，本算法的时间复杂度为 $J|S||N||b|N|$ ，其中， $|N|$ 为网络节点数， $|N||b|N|$ 为 Dijkstra 算法的时间复杂度， $|S|$ 为网络中的业务数， J 为单一业务的最大通路数，即 $J = \max\{j\}$ 。

5 仿真与分析

仿真网络采用 24 个节点和 43 条边的网络拓扑，如图 2 所示。假设网络中共有 5 个数据中心站点，为了使每一个业务请求节点到其最近的数据中心站

点的路径和最短，本文参考文献[16]的部署方案，将数据中心站点设置于节点 1、7、12、18、19 的位置，且每种业务的内容和副本只随机分布于 3 个数据中心。网络中的每个节点都具有完全的波长转换能力，每条链路的带宽容量均为 122 个波长。假设有 4 个独立的灾难模型 DZ_1、DZ_2、DZ_3 和 DZ_4，分别用阴影区域标记。假设灾难发生后，灾难区域内的节点和链路全部损毁，灾区附近部分链路的生命期下降至 8 h，受灾难影响的业务包括中断的业务和服务时间下降的业务。

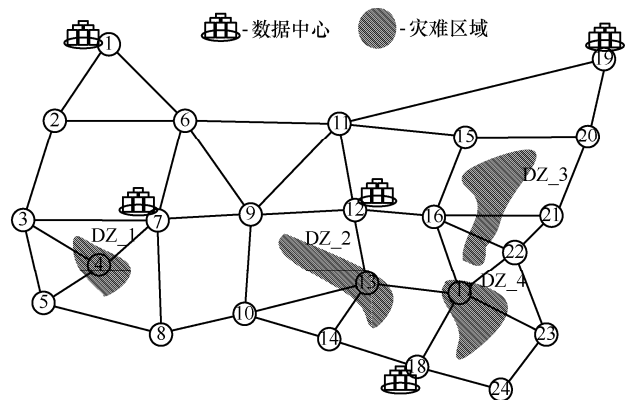


图 2 网络拓扑

采用静态业务模型，随机产生 200 个业务请求，均匀分布于所有非数据中心节点，每个业务的带宽在 4~12 个波长之间随机产生，每个业务的服务时间在 1~12 h 之间随机产生，通过此方式产生 30 套业务。此外，再将该 30 套业务的服务时间范围扩展为 1~24 h、1~36 h 和 1~48 h，由此共获得 120 套业务。

在上述环境中，分别对 LR、BR 和 FR 这 3 种方案进行仿真，并对业务中断率 (SLR, service loss ratio)、业务持续时间损失率 (HLR, holding time loss ratio) 和业务流量损失率 (FLR, flow loss ratio) 这 3 种性能指标进行对比分析。SLR 为灾后无法恢复的业务数与总业务数之比（不包括因业务请求节点损毁而消失的业务）；HLR 为业务损失时间与业务需求时间之比，其中，业务损失时间为业务需求时间与业务实际持续时间的差值；FLR 为未能交付的数据流量与需要交付的数据流量之比，其中，流量定义为时间与带宽的乘积。在仿真中，LR 的输入参数 $\alpha = 0.01$ ， $\beta = 0.01$ ， γ 以 0.1 为间隔在 0~0.9 之间取值。最终仿真结果对 4 种灾难模型和同一服务时间范围的 30 套随机业务取平均。

针对灾后网络资源紧张的情况, LR 方案通过临时释放一定比例的未受影响业务的带宽, 增加灾后网络中的可用带宽资源。LR 方案业务中断率如图 3 所示。由图 3 可知, 随着业务带宽释放度 γ 从 0~0.9, LR 方案业务中断率从 2.1% 逐渐下降到 0, 其中, 业务时间对 *SLR* 的影响不明显。

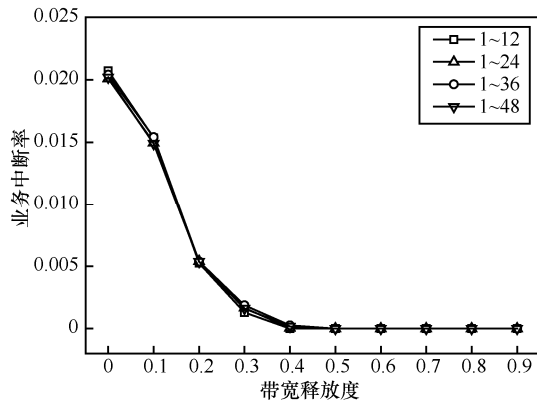


图 3 LR 方案业务中断率

LR 方案业务持续时间损失率如图 4 所示。由图 4 可知, 随着 γ 的增长, 业务持续时间损失率逐渐下降并趋于平稳。同时, 随着业务平均需求时间的增加, *HLL* 也逐渐增大, 但 *HLL* 的增长幅度逐渐趋小。

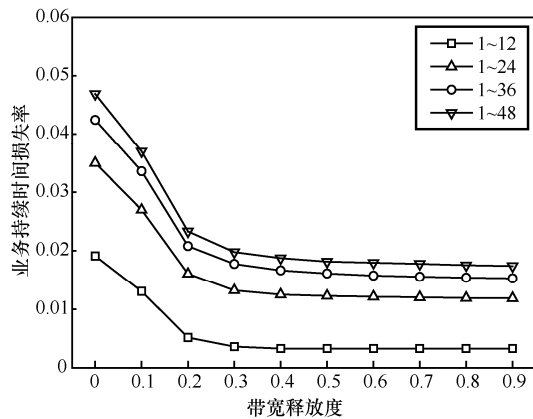


图 4 LR 方案业务持续时间损失率

LR 方案业务流量损失率如图 5 所示。由图 5 可知, 随着 γ 的增长, 业务的流量损失率逐渐下降。同时, 随着业务平均持续时间的增加, *FLR* 也逐渐增大, 但 *HLL* 的增长幅度逐渐趋小。

通过对以上数据的分析可知, 选取合适的 γ 值有助于提高 LR 方案的各项性能指标, 特别是能使 *SLR* 指标显著改善。然而, 若 γ 值过大, 可能会使较多未受影响业务的带宽和路由发生改变,

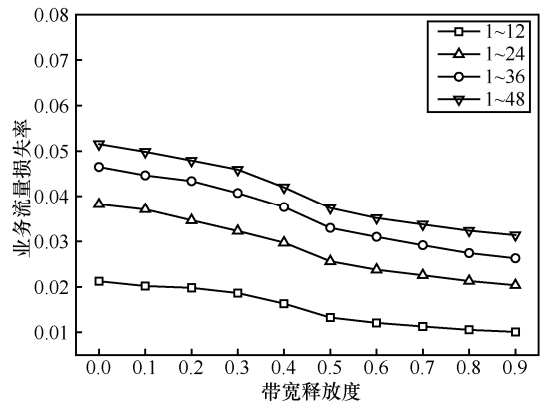


图 5 LR 方案业务流量损失率

从而影响其业务的稳定性。注意到, 当 $\gamma=0.5$ 时, *SLR* 与 *HLL* 能够获得最佳性能, 而 *FLR* 在 γ 取值分别为 0.5 和 0.9 时的差值仅在 0.3%~0.6%。因此, 在 LR 方案的后续仿真中, 本文取 $\gamma=0.5$ 。

3 种方案的业务中断率如图 6 所示。由图 6 可知, 与 BR 和 FR 相比, LR 在 *SLR* 性能上具有明显的优势, 这是因为 LR 临时将未受影响业务的带宽释放了 50%, 极大缓解了灾后网络带宽资源紧张的问题, 保证了灾后所有业务的连通性。由于 FR 方案禁止使用生命期有限的链路, 使灾后网络的可用带宽资源更加稀少, 导致 *SLR* 高达 8.4%, 而 BR 方案由于对链路的生命期不敏感, 恢复过程中的可用带宽资源较多, 使 *SLR* 较低, 约为 2%。此外, 图 6 中的数据也显示, 3 种恢复方案的 *SLR* 性能主要取决于网络中的可用带宽资源, 这是因为 *SLR* 反映的是恢复操作完成瞬间的业务连通性, 而与业务的需求时间长短没有关系。

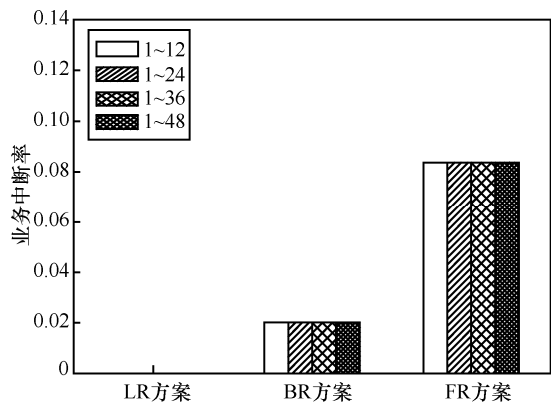


图 6 3 种方案的业务中断率

3 种方案的业务持续时间损失率如图 7 所示。其中, LR 方案展现出了最佳的 *HLL* 性能。随着业务平均需求时间的增大, LR 与 BR 的 *HLL* 逐渐上

升,且上升趋势逐渐趋缓,与此同时,LR 相对于 BR 的 *HLR* 性能优势却在逐渐扩大。这说明 LR 能够针对不同业务的服务时间需求,合理安排链路资源,充分利用链路的有限生命期。由于 FR 放弃了对有限生命期链路的利用,导致大量业务因缺乏带宽资源而中断,其较高的 *HLR* 指标直接取决于 *SLR*,而与业务需求时间无关。

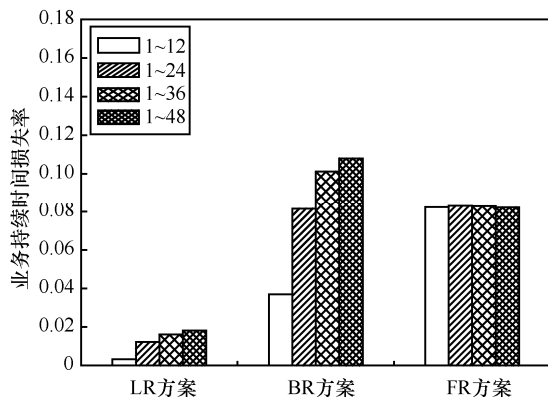


图 7 3 种方案的业务持续时间损失率

由于采用任播与多播相结合的路由策略,恢复后的业务可能会同时拥有多条连接不同数据中心的通路,而这些通路的带宽和生命期可能各不相同,因此本文采用业务流量损失率评估 3 种恢复方案的资源利用率性能,如图 8 所示。由图 8 可知,LR 的 *FLR* 性能最优,且随着业务平均需求时间的增大,LR 与 BR 的 *FLR* 指标变化趋势与图 7 中 *HLR* 指标变化趋势一致,即业务平均需求时间越大,LR 的 *FLR* 性能优势越显著。而 FR 的 *FLR* 性能依旧取决于其 *SLR* 指标,且与业务需求时间无关。

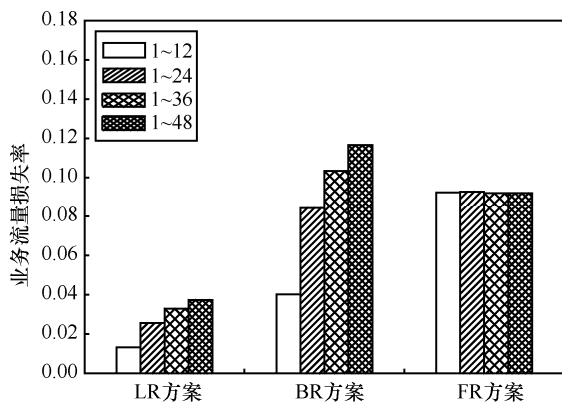


图 8 3 种方案的业务流量损失率

6 结束语

分布广泛的光数据中心网络正面临着大规模

灾难的严重威胁,灾难造成的关联性故障和级联性故障可能会使大量基于数据中心的云业务中断或数据丢失,网络生存性问题将成为影响光数据中心网络未来发展的一个重要问题。为了有效解决灾难带来的业务中断和服务时间下降的问题,本文提出一种基于链路生命期的业务恢复方案。该方案针对灾后网络中的带宽资源危机,利用全局业务带宽临时退让和部分链路的有限生命期增加网络中的可用带宽资源;根据灾损业务的带宽和持续时间需求,调度资源配置优先级;采用任播与多播相结合的路由策略,优化带宽资源利用率。仿真结果显示,本文所提方案能够最大限度地降低业务中断率,并显著减少业务的持续时间损失率和流量损失率。

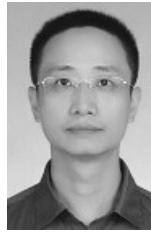
参考文献:

- [1] BILAL K, MALIK S U R, KHAN S U, et al. Trends and challenges in cloud datacenters[J]. IEEE Cloud Computing, 2014, 1(1): 10-20.
- [2] ZHAO X, VUSIRIKALA V, KOLEY B, et al. The prospect of inter-data-center optical networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(9): 32-38.
- [3] KACHRIS C, KANONAKIS K, TOMKOS I. Optical interconnection networks in data centers: recent trends and future challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(9): 39-45.
- [4] 罗军舟, 金嘉晖, 宋爱波, 等. 云计算: 体系架构与关键技术[J]. 通信学报, 2011, 32(7): 3-21.
- [5] LUO J Z, JIN J H, SONG A B, et al. Cloud computing: architecture and key technologies[J]. Journal on Communications, 2011, 32(7): 3-21.
- [6] MUHAMMAD A, SKORIN-KAPOV N, FURDEK M. Multicast, anycast, and replica placement in optical inter-datacenter networks[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 9(12): 1161-1171.
- [7] RAN Y. Considerations and suggestions on improvement of communication network disaster countermeasures after the Wenchuan earthquake[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(1): 44-47.
- [8] KOBAYASHI M. Experience of infrastructure damage caused by the Great East Japan Earthquake and countermeasures against future disasters[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(3): 23-29.
- [9] KWASINSKI A. Effects of hurricanes Isaac and Sandy on data and communications power infrastructure[C]//Telecommunications Energy Conference 'Smart Power and Efficiency' (INTELEC). 2013: 1-6.
- [10] HABIB M F, TORNATORE M, DIKBIYIK F, et al. Disaster survivability in optical communication networks[J]. Elsevier, Computer Communications, 2013, 36(6): 630-644.
- [11] MUKHERJEE B, HABIB M F, DIKBIYIK F. Network adaptability from disaster disruptions and cascading failures[J]. IEEE Communica-

tions Magazine, 2014, 52(5): 230-238.

- [11] FERDOUSI S, DIKBIYIK F, HABIB M F, et al. Disaster-aware data-center placement and dynamic content management in cloud networks[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2015, 7(7): 681-694.
- [12] YAO J, LU P, GONG L, et al. On fast and coordinated data backup in geo-distributed optical inter-datacenter networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(14): 3005-3015.
- [13] FERDOUSI S, TORNATORE M, HABIB M F, et al. Rapid data evacuation for large-scale disasters in optical cloud networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(12): 163-172.
- [14] MA L, SU W, WU B, et al. ϵ -time early warning data backup in disaster-aware optical inter-connected data center networks[J]. Journal of Optical Communications & Networking, 2017, 9(6):536-545.
- [15] HABIB M F, TORNATORE M, LEENHEER M D, et al. Design of disaster-resilient optical datacenter networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(16):2563-2573.
- [16] SAVAS S S, DIKBIYIK F, HABIB M F, et al. Disaster-aware service provisioning with multicasting in cloud networks[J]. Photonic Network Communications, 2014, 28(2):123-134.
- [17] MA C, ZHANG J, ZHAO Y L, et al. Bandwidth-adaptability protection with content connectivity against disaster in elastic optical data-center networks[J]. Photonic Network Communications, 2015, 30(2):309-320.
- [18] TORNATORE M, BARUFFALDI A, ZHU H, et al. Holding-time-aware dynamic traffic grooming[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(3):28-35.
- [19] XU Z, HUANG J, ZHOU Z, et al. A novel grooming algorithm with the adaptive weight and load balancing for dynamic holding-time-aware traffic in optical networks[J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(5): 392-399.

[作者简介]



鲍宁海 (1973–), 男, 浙江宁波人, 博士, 重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为网络生存性、网络虚拟、网络节能等。



袁园 (1994–), 男, 江苏扬州人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为光数据中心网络生存性。



刘自谦 (1994–), 男, 山东菏泽人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为光数据中心网络生存性。



匡明 (1991–), 男, 河南新县人, 重庆邮电大学硕士生, 主要研究方向为虚拟网络生存性。