

---文档均为 word 文档，下载后可直接编辑使用亦可打印---

摘要

近年来，随着高宽带需求的业务量与日俱增，互联网流量的不断增长，传统的波分复用光网络（WDM）已经无法满足日渐增长的客户的业务需求。因此，以相干光正交频分复用为基础的灵活光网络的概念被提出来。相比于传统的波分复用光网络，灵活光网络的栅格力度较小，频谱分配较灵活。因此灵活光网络具有更低的阻塞率和更高的频谱利用率。其中，在频谱灵活光网络中如何提高频谱资源利用率变成了广泛研究的问题。一种智能、高效率的路由分配算法可以大大的提升网络的生存能力，让连接业务能够更在网络中更迅速、高效的传输。

本文主要研究了频谱灵活光网络中的频谱利用率的优化方法设计。为了更大程度的提升频谱资源的利用率，本文研究了两种路由分配算法与一种频谱资源分配方法进行匹配，分别是最短路径首次命中算法和 K 条最短路径首次命中算法。通过这两种路由与频谱分配算法在同一种网络拓扑中(USFNET 网络拓扑图)进行模拟仿真。本文不考虑负载均衡对于网络性能的影响，因此每条链路的权值均为 1，同时设定网络中每条链路上的频谱隙数为 100 且所有频谱隙等值大小。设置连接请求数为 50000，每条链路上的通信方式都是双向的。在仿真中，重点关注频谱资源利用率和频隙数/Erlang 这两个参数的对比。最终的结果会显示， K 条最短路径首次命中算法会有更好的网络性能和更高的频谱利用率。

关键字：频谱灵活光网络 路由分配算法 频谱分配算法

ABSTRACT

In recent years, with the increasing demand for high-bandwidth services and increasing Internet traffic, traditional wavelength division multiplexing optical networks (WDM) have been unable to meet the growing needs of customers. Therefore, the concept of a flexible optical network based on coherent optical orthogonal frequency division multiplexing was proposed. Compared with the traditional wavelength division multiplexing optical network, the grid of flexible optical network is smaller and the spectrum allocation is more flexible. Therefore, the flexible optical network has a lower blocking rate and higher spectrum utilization. Among them, how to improve the utilization of spectrum resources in the spectrum flexible optical network has become a widely studied problem. An intelligent and efficient route allocation algorithm can greatly improve the survivability of the network and enable connection services to be transmitted more quickly and efficiently in the network.

This dissertation mainly studies the design method of spectrum utilization optimization in spectrum flexible optical network. In order to improve the utilization of spectrum resources to a greater extent, this paper studies two methods of route allocation and one methods of spectral resource allocation. They are the shortest path first hit algorithm and the K shortest path first hit algorithm. These two routes and spectrum allocation algorithms are simulated in the same network topologies (USFNET network topology) respectively. This paper does not consider the impact of load balancing on network performance. Therefore, the weight of each link is 1, and the number of frequency slots on each link in the network is set to 100 and the size of all the frequency slots is equivalent. Set the number of connection requests to 50000. The communication mode on each link is bidirectional. In the simulation, the focus is on the comparison of spectral resource utilization and frequency slot/ Erlang parameters. The final result will show that the first hit algorithm of the K shortest path will have better network performance and higher spectrum utilization.

Key Word: Spectrum flexible optical network, Routing assignment algorithm, Spectrum allocation algorithm

第 1 章 绪论

随着数据业务的急剧增长，随着多媒体和云计算等高宽带业务需求的不断增加，容量比较大的且动态较灵活的频谱灵活光网络的发展变成了未来网络发展的确定性抉择。由于传统的波分复用光网络不仅仅具有固定不变的通道间隔，还具有稳定不变的信号速率与格式等其他参数，严重影响了传统光网络中的主要参数，即频谱资源利用率过低，因此当前使用的传统光网络已经无法适应大容量且高速率的光网络传输需求。而频谱灵活光网络具有可变的参数设置，使其灵活性和频谱利用率都有大大的提升，但我们仍需要来选择好的路由和频谱分配算法来提升网络的负载能力和业务请求的传输能力。

本章先是介绍了传统波分复用技术的发展历史，然后介绍了频谱灵活光网络的发展历程，同时简单说明在光网络中对于频谱灵活光网络的发展所提出的要求和期望，最后分别在国内和国外两方面简单介绍了路由计算问题和频谱分配问题上的目前研究成果和未来的发展方向。

1.1 频谱灵活光网络的发展概况

由于最近几年中，网络数据量和 IP 业务量的呈现了爆炸式增长，光网络中的使用的传统波分复用技术已经没有办法满足网络带宽的发展和需求，所以灵活使用网络带宽资源也变得势在必行。根据传统光网络的特性，每一条波长的带宽都相等且稳定不变同时能且只能承担一个业务通信，这就使得一条光纤中所能承载的波长数目也是一定的，所能承载的业务通信量也是一定的。在业务通信过程中，如果业务所占用的带宽少，那么就会导致所在波长中会有大量的带宽空闲，导致带宽资源利用率较低。而频谱灵活光网络就可以动态的分配每一条波长的宽度，使得一条光纤中能够承受的业务通信量动态改变，也减少了频谱资源的浪费问题。如图 1 是这两种光网络系统图。

在理论研究中，频谱灵活光网络从传统波分复用技术中发展变化来的。频谱灵活光网络是将本来固定的波长带宽进行进一步的细化分割，然后再根据所承载的业务所需带宽来分配比较合适的频谱段，进而来达到动态的分配频谱资源的，降低频谱资源的浪费的目的，这些在细化分割中产生的频谱单元称为频谱间隙。目前能够实现频谱灵活光网络的方法是灵活栅格技术，其主要有两种实现基础：一种是以正交频分复用为基础，以这种为实现基础的灵活光网络的使用范围更普遍、覆盖范围更广泛，另外

一种是以奈奎斯特波分复用为基础。在频谱灵活光网络中的频谱利用率的优化设计一直是学术界的重点研究方向。



图 1 传统波分复用系统图和频谱灵活光网络系统图

选择一种智能且高效的路由计算算法至关重要，这可以提升网络中对于业务通信的负载能力，还能够有效地提高频谱资源利用率，可以在网络中创造一个能够承担更高效同时更大强度业务通信的传输环境。在传统的波分复用光网络中，波长分配仅仅需要满足一个约束条件，就是波长的连续性。但是在频谱灵活光网络中，波长分配不仅需要满足频谱的连续性条件，还要满足另一个约束条件，即波长的一致性。显而易见，这两种光网络中波长分配所需要满足的要求并不完全相同，因此在这一方面上无法套用。本文的重点是通过对比传统光网络中的波分复用，来提出一种更为优化的路由计算算法来提高出传输网络的性能和频谱利用率。

1.2 国内外的研究现状

1.2.1 国外研究现状

在传统的光网络中，波长信道间隔的大小是不可变的，这会使网络中的很多频谱资源被浪费掉。而频谱灵活光网络中采用的是更加精细粒度的频谱分片，比如 25GHz，或者 12.5GHz，甚至带宽更小的 6.25GHz，它可以根据连接请求的需求来使用一个频谱隙或者将多个频谱隙组合起来，这样就很大程度的减小了频谱资源的浪费[1]。当多个连接请求到达频谱灵活光网络中，光网络还能够实现较大程度减少频谱资源的浪费。把一些关键的系统器件例如速率和宽带可以改变的收发机 [2]，带宽可变的光收发连接

器等和关键技术，如成熟的正交频分复用能够实现频谱灵活光网络。频谱灵活光网络不仅仅能够体现能够灵活动态的分配频谱资源，还可以实现业务的自适应传输[3]。

在频谱灵活光网络的基础上，以用户提交的业务请求信息为基础，提出了基于距离自适应频谱资源分配策略[4]。这种策略主要的特点是：可以通过提供的客户需求和业务量的大小，能够合适的分配相应的频谱资源并配置相应的调制方式。在分配频谱资源时，根据距离的长度来分配频谱资源粒度的大小[5]。

在网络动态运行过程中，会在空间中发生大量的连接和释放频谱资源的过程，由于频谱资源反复的被释放并重新分配，会产生大量的频谱碎片。想要使这些频谱碎片不被浪费掉，就要采用资源频谱重构策略。Ankitkumar N Patel 等人提出了频谱灵活光网络中的频谱重构问题，并使用 ILP 算法和两种启发式算法实现频谱重构[6]。后来人们提出了一种基于独立集的辅助图模型和频谱重构策略来提升频谱利用率[7]。人们也论证了通过使用灵活的发送机和接收机可进行频谱重构的可能性[8]。

1.2.2国内研究现状

由于频谱灵活光网络具有大容量、功耗低和安全可靠等优点，使得全光网推动了高宽带应用需求的提升以及传送网络的融合演进，同时促进了网络科技产业的发展，有着长远的战略意义和重要的现实意义。在国内，动态灵活光网络的研究和发展也受到了越来越多学术界和社会的广泛关注。当然，在频谱灵活光网络的论文和研究也越来越多。

在频谱灵活光网络的应用时域上出现了一种能让多个支流灵活的在一条路径上传输的技术，这就是虚拟级联技术[9]。这种技术在提升网络的生存性能的同时，也很大程度的提升了频谱资源利用率。在路由和频谱分配算法方面，文献中还提出了一种可以通过不间断的迭代优化来明显提升网络的负载能力从而降低网络阻塞率的算法，这就是基于频谱窗口的贪婪算法，由于这种贪婪算法的局限性和有效性，目前还在研究阶段，但是其产生的效果和目的是研究过程中一直所追求的。

在频谱分配方面提出了一种自适应分布式子载波路由频谱配置算法。在弹性光网络中，频谱配置算法能在两个链路节点之间自动的建立一条或多条光路来让信号更便利的传输从而提高了频谱资源利用率。提出了两种优化算法，分别是基于优先权寻路的遗传算法和最大化频谱重合度的频谱分配算法[10]。前一种算法主要是用优先权寻路

的方式来拓宽了路由选择的范围。后一种算法主要考虑相邻链路的频谱关系，将网络中产生的频谱碎片利用了。这两种优化算法的目的都是来提高了频谱资源的利用率。

在国内、外的研究中，频谱资源利用率一直是学术界研究的重点。本文在传统算法的基础上，提出更为优化的算法，通过改善网络的性能来更好的分配网络资源。

1.3 论文结构

本论文的章节内容分布如下：

第一章首先介绍光网络当前的发展概况，然后对于传统波分复用光网络和优化后的频谱灵活光网络分别做了发展介绍，同时也对于这两种光网络进行了详细的应用说明，对比出频谱灵活光网络更能够满足当前的网络流量的需求，并且分别在国内、国外两个研究方面来介绍路由和频谱分配的发展趋势，进而提出了本文的主要论题，最后给出了本文的内容结构和主要内容

第二章主要是介绍了频谱灵活光网络中的路由计算算法和频谱分配算法。本章在路由计算方法方面，主要提出两种路由算法：一种是最短路径算法，另外一种是 K 条最短路径算法。在频谱分配算法方面主要提出一种算法，即首次命中算法。同时，将两种路由计算算法分别与这种频谱分配算法进行组合：最短路径首次命中法和 K 条最短路径首次命中法。然后将这两种算法进行对比，并分别给出其算法流程图和文字描述，对比出能够有更高频谱资源利用率的光网络。

第三章主要是将第二章的理论研究转变成拓扑图中的仿真。本章分别在相同的网络拓扑环境下将传统频谱分配算法和优化后的频谱分配算法进行仿真，设定合适的仿真条件，通过对比输出参数频谱资源利用率和频谱隙数/Erlang 来对比出有更高频谱利用率的路由和频谱分配算法，得出结论。

第四章主要是对本文的研究基础和成果进行一个总结，并展望未来的发展。

第 2 章 频谱灵活光网络中频谱利用率的优化方法

本章主要是介绍了在频谱灵活光网络中路由计算算法和频谱分配算法这两方面的内容。目前，在传统波分复用光网络中，路由计算和频谱分配问题已经被广泛的研究。这两种光网络的虽然有很多相似的地方，但是相比于传统波分复用只需满足遵循波长一致性的唯一约束条件，频谱灵活光网络需满足两个约束条件：频谱的连续性和频谱的一致性，因此传统的波分复用技术不再适用于频谱灵活光网络。频谱灵活光网络中主要分为两部分，一部分是路由计算算法，另外一部分是频谱分配算法。本章将会详细介绍这两方面内容。

2.1 频谱灵活光网络中的路由计算算法

想要在频谱灵活光网络中实现两点之间的通信，首先就要寻找一条合适、有效地路由路径。在路由计算问题中，一般情况下，常用的选路算法主要是两种，一种是传统的最短路径算法，另外一种就是优化的 K 条最短路径算法。

2.1.1 最短路径算法

在路由计算算法中，有一种最传统的计算算法就是最短路径算法，而他的主要算法就是 Dijkstra 算法。在一个通信网络拓扑中，首先通过 Dijkstra 算法计算出其最短路径，计算流程为：在一段通信链路中，源节点 i 和宿节点 j 的距离为 $D(s)$ ，由此可知， $D(s)$ 是一个集合，可有多个值，分别为 $D(s_1)$, $D(s_2)$, $D(s_3)$, $D(s_4)$... 在这个集合范围内，我们选取最小值设定为这段通信链路的最短路径 $D(i, j)$ 。公式表示为

$$D(i, j) = \text{Min}[D(s_1), D(s_2), D(s_3), D(s_4) \dots] \quad (1)$$

如图 2，假设存在一个网络拓扑图，在拓扑图中有 6 个节点，8 条链路。其中，发出连接请求的源节点为 B 点，接收连接请求的宿节点为 D 点，那么根据最短路径算法，我们计算出的最短路径为 B→D。这条路径是源节点到宿节点之间跳数最少的路径，由于不考虑负载均衡对网络的影响，链路中的权值都是 1，所以这条路径也是总权值最小的路径，因此选择这条路径可以花费较少的连接路径的时间，最重要的是也可以减少链路的成本。显而易见，如果网络中短时间内出现大量的连接请求，由于最短路径算法，在路由计算算法这方面会总是选择同一段链路进行通信，这时就有可

能导致某一段链路上发生业务阻塞问题，而网络中其他链路却仍处于空闲状态，很明显，这就明显降低了网络中频谱资源利用率，同时也增大了网络阻塞可能发生。

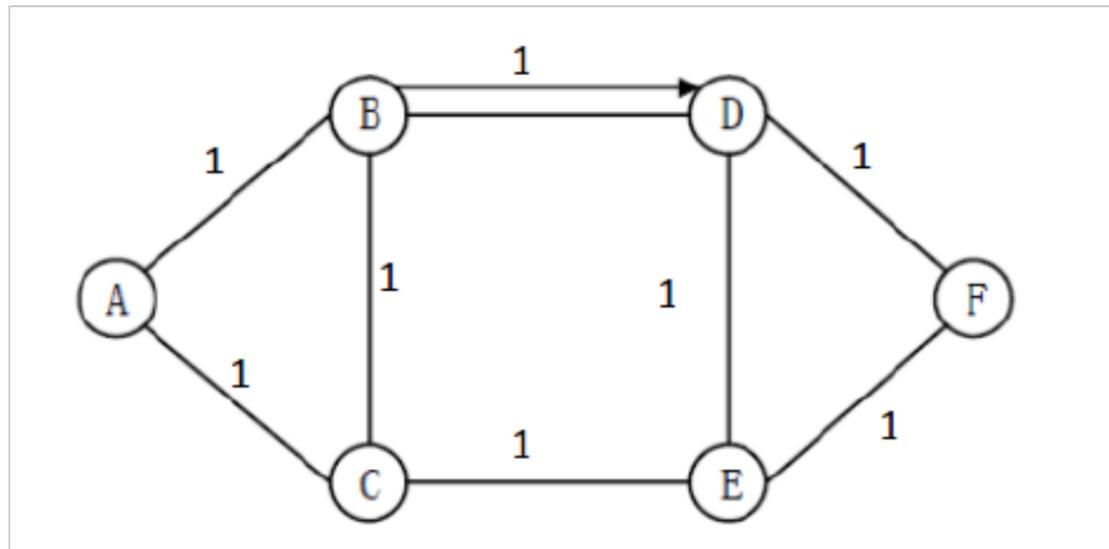


图 2 最短路径算法示意图

2.1.2 K 条最短路径算法

由于最短路径算法的降低了网络的利用率和发展性，得到了科学上和社会上的广泛研究和关注，人们逐渐发现一种更为优化的路由算法，即K条最短路径算法。

在最短路径算法只计算一条路径的基础上，K条最短路径算法共计算了K条路径用来路由选择，特别的是这些路径具有选择优先级顺序。首先将K条路径进行优先级的排序，总权值和跳数较低的路径具有更高的优先级级别。从优先级最高的路径开始，当前路径如果在某一段链路上发生了业务阻塞的情况，那么就选择下一个优先级略低的路径进行频谱资源的分配，直到所选择的K条路径全部阻塞或者是当某一条路径能够成功分配频谱资源。K条最短路径算法的核心和最短路径算法的核心相同，均是Dijkstra最短路径算法，不同的是K条最短路径算法有K条路由路径可以选择。

如图3，假设存在一个网络拓扑图，在拓扑图中有6个节点，8条链路，设置K=2。其中，发出连接请求的源节点为B点，接收连接请求的宿节点为D点，那么我们可以根据K条最短路径来计算出两条路径，路径1为B→D，路径2为B→C→E→D。当最短路径1 B→D在网络中由于连接请求数目过多而发生堵塞时，可以选择路径2 B→C→E→D进行频谱的分配，从而减少阻塞业务的发生。这种路径选择方式不仅可以提升网络的灵活性，还可以提升网络资源利用率，同时降低了网络阻塞的可能性。

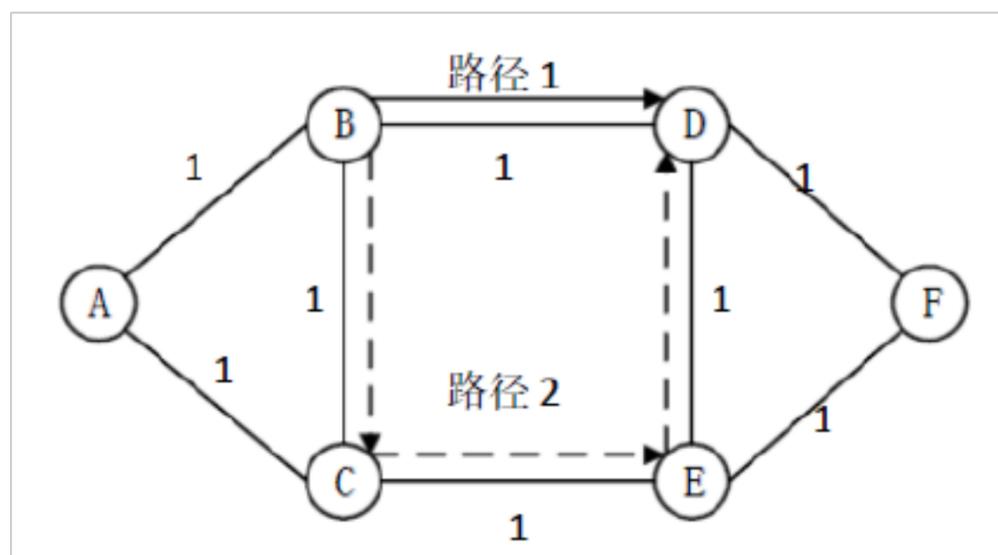


图 3 K 条最短路径算法示意图 (K=2)

2.2 频谱灵活光网络中的频谱分配算法

频谱分配算法也是路由和频谱分配问题中至关重要的一部分。在连接业务请求时，首先是根据源节点到宿节点，在路由计算阶段选择一条可分配的路由路径，然后再这条路由路径上进行频谱资源的分配，如果频谱资源分配能够成功，那么说明说明业务请求连接成功。如果不能分配到相应的频谱资源，则说明业务阻塞。所以，能够高效的分配频谱资源是路由和频谱分配中不可或缺的一部分。

2.2.1 频谱分配算法的约束条件

在路由计算和波长分配算法方面，频谱灵活光网络 and 传统波分复用光网络有很多不同点，也有很多共同点。在路由计算方面，两种光网络条件下都可以使用文中介绍的最短路径算法和优化的 K 条最短路径算法来计算出一条合适的路由路径。但是在频谱分配方面，由于每个业务请求占用一个波长，而每一个波长的占用带宽是相同的，所以传统的波分复用光网络只有一个一个约束条件，就是“波长的一致性。”但是在频谱灵活光网络中，由于分配出来的最小单元是频谱隙，每一个业务请求可占用不同数目的频谱隙，所以是动态的。所以相比于传统光网络，频谱的连续性和一致性是频谱灵活光网络中必须要满足约束条件，缺一不可。

如图 4 所示，假设存在两条链路分别为 B-C 链路和 C-E 链路，这两条链路是相邻的，分别对这两条链路上的频谱间隙进行编号：A1, A2, A3, ..., An。频谱的一致性指的是通信链路中的每一条链路都分配相同的频谱资源。由链路 B-C 和链路 C-E

C-E 时，链路 B-C 和链路 C-E 的频隙间隙都应该相同，这时，在每一条连接路径里，在每条链路上划分出的频谱间隙都是相同的，即为频谱的一致性。

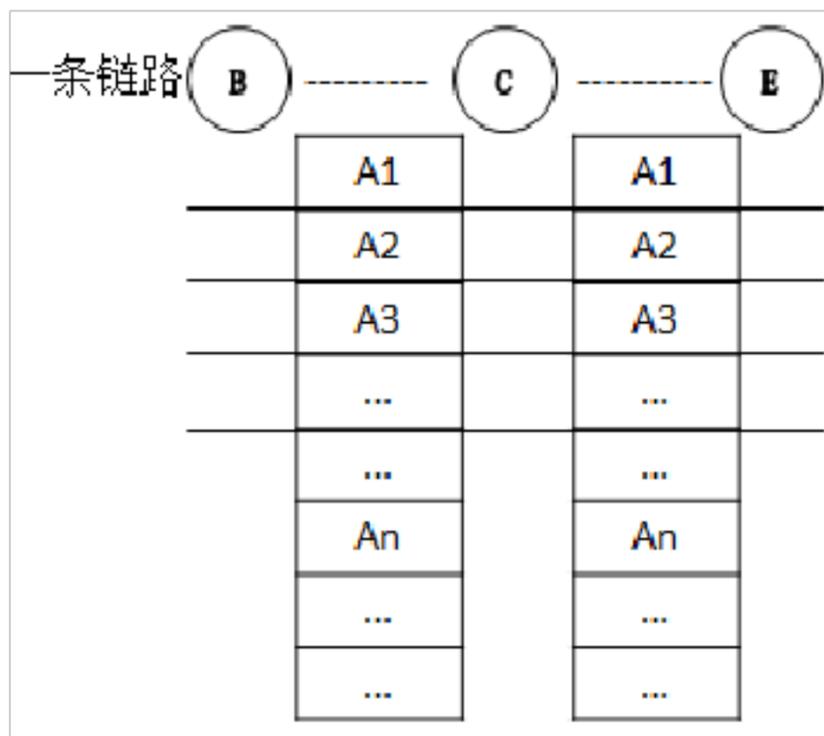


图 4 频谱的一致性

如图 5，当到达一个连接请求，网络中分给该连接请求的多个频隙一定是连续的，这就是频谱的连续性。假设链路 B-C 上存在一个业务连接请求，该连接请求需要占 4 个频隙，从第 n 个频隙开始给这个连接请求分配频谱资源，则其所占用的频谱资源为 $A_n, A_{n+1}, A_{n+2}, A_{n+3}$ 。

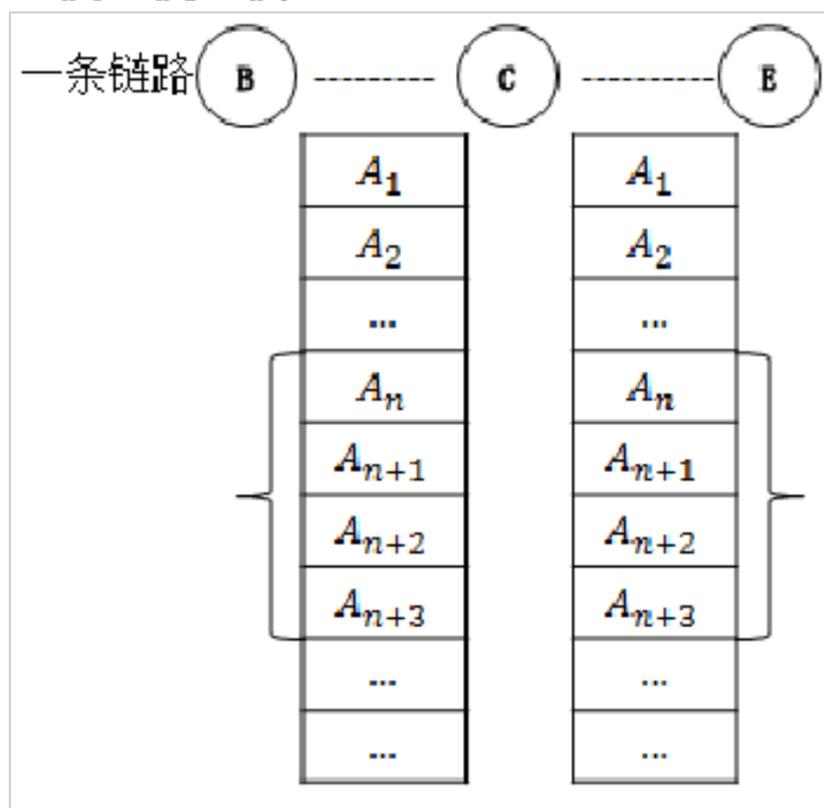


图 5 频谱的连续性

频谱的连续性和频谱的一致性。频谱分配主要有两种频谱分配方法，分别是随机命中和首次命中。在给连接请求分配频谱资源时，在可用的频谱资源段内随机的分配一段频谱资源，这种分配资源的方法称为随机命中，因此随机命中需要遍历整个频谱空间。由于分配频谱资源时是随机分配的，在整个网络拓扑中，会不停的有业务进行请求连接和频谱资源释放，这就会产生很多频谱碎片，频谱占用分配不集中，此时频谱利用率较低，还可能会使业务链路阻塞。所以，本文选用更优化的首次命中的方法来进行频谱资源的分配。

首次命中

在分配频谱资源之前，首先对于该链路中的所有的频谱间隙都进行依次编号，根据其所需的频谱间隙数，从编号最小的一端逐一查找处于空闲状态的频谱段来分配频谱资源。

首次命中法的步骤如下：

第一步：根据路由计算分配的路径上，查看每一段链路的频谱占用状态，综合成一张频谱资源表，如果任何一条链路中的任何一个频谱隙被占用，那么不能给这一整条连续不断的频谱间隙分配频谱资源；

第二步：将第一步生成的频谱资源表中的所有频谱间隙进行逐一编号，同时从编号最小的一端开始查找处于空闲状态的频谱段；

第三步：如果在第二步中可以找到处于空闲状态的频谱段，那么成功分配频谱资源，如果找不到，那么业务阻塞，分配频谱资源失败。

首次命中法的优点在于其分配频谱资源时只需要从频谱空间的某一端进行查找可使用的频谱资源段，这不仅使频谱碎片减少，也提升了频谱利用率降低了阻塞率。从频谱资源分配来看，首次命中法更优于随机命中法。

若网络中某段光纤链路的工作状态如图 (a) 所示，网络中到达一个连接请求 CR5，带宽需求是 3 个频谱隙，通过首次方法，可以找到从第 6 频谱隙到第 8 频谱隙作为这个连接请求的预留频谱资源。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/968000045134006035>