



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117151318 A

(43) 申请公布日 2023. 12. 01

(21) 申请号 202310392534.2

(22) 申请日 2023.04.13

(30) 优先权数据

17/829,655 2022.06.01 US

(71) 申请人 香港城市大学

地址 中国香港九龙达之路83号

(72) 发明人 王天娇 比尔·莫兰 王增福

摩西·祖克曼 王昕宇 郭朝

(74) 专利代理机构 北京润平知识产权代理有限

公司 11283

专利代理师 乔晓粉

(51) Int. Cl.

G06Q 10/047 (2023.01)

G06Q 50/26 (2012.01)

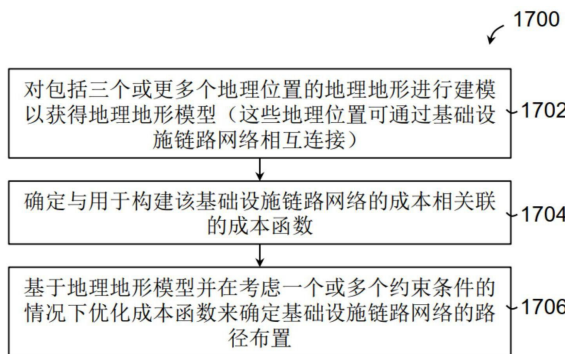
权利要求书3页 说明书27页 附图19页

(54) 发明名称

主干分支拓扑基础设施链路网络的路径布置的确定

(57) 摘要

一种用于确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置的计算机实现方法。该方法包括：对包括可以通过基础设施链路网络相互连接的三个或更多个地理位置的地理地形进行建模以获得地理地形模型；确定与用于构建连接该三个或更多个地理位置的基础设施链路网络的成本相关联的成本函数；以及基于地理地形模型以及在考虑一个或多个约束条件的情况下优化成本函数来确定该基础设施链路网络的路径布置。该基础设施链路网络的路径布置具有主干分支拓扑并且包括：连接该三个或更多个地理位置的三个或更多个基础设施链路，以及一个或多个连接点，每个连接点分别被布置在两个或更多个基础设施链路之间。



1. 一种计算机实现方法,其用于确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置,所述计算机实现方法包括:

对包括三个或更多个地理位置的地理地形进行建模以获得地理地形模型,所述三个或更多个地理位置可以通过基础设施链路网络相互连接;

确定与用于构建连接所述三个或更多个地理位置的所述基础设施链路网络的成本相关联的成本函数;以及

基于所述地理地形模型以及在考虑一个或多个约束条件的情况下优化所述成本函数来确定所述基础设施链路网络的路径布置,

所述基础设施链路网络的所述路径布置具有主干分支拓扑并且包括:

三个或更多个基础设施链路,其连接所述三个或更多个地理位置,以及

一个或多个连接点,每个所述连接点分别被布置在两个或更多个所述基础设施链路之间。

2. 根据权利要求1所述的计算机实现方法,其中,所述一个或多个约束条件包括两个所述地理位置之间的最大路径长度,所述最大路径长度由一个或多个所述基础设施链路限定。

3. 根据权利要求1所述的计算机实现方法,其中,在考虑一个或多个约束条件的情况下优化所述成本函数包括在考虑一个或多个约束条件的情况下使所述成本函数最小化。

4. 根据权利要求1所述的计算机实现方法,其中,对所述地理地形进行建模包括将所述地理地形建模为三维欧几里得空间中的不规则二维流形。

5. 根据权利要求1所述的计算机实现方法,其中,所述成本函数是与深度相关的成本函数。

6. 根据权利要求1所述的计算机实现方法,其中:

用于构建所述基础设施链路网络的所述成本包括与铺设和/或构建所述基础设施链路和一个或多个连接器单元相关联的成本,

每个所述连接器单元连接两个或更多个所述基础设施链路,以及

所述一个或多个连接器单元中的每一个都被布置在或将被布置在所述一个或多个连接点的相应一个处。

7. 根据权利要求1所述的计算机实现方法,其中,确定所述基础设施链路网络的路径布置包括确定所述一个或多个连接点的总数和/或相应位置。

8. 根据权利要求1至7中任一项所述的计算机实现方法,其中,确定所述基础设施链路网络的路径布置包括:

在考虑所述一个或多个约束条件的情况下,将所述基础设施链路网络的所述路径布置的确定公式化为斯坦纳最小树问题;以及

在考虑所述一个或多个约束条件的情况下,求解所述斯坦纳最小树问题;

其中,所述基础设施链路网络的所述路径布置的所述主干分支拓扑大体对应于斯坦纳拓扑。

9. 根据权利要求8所述的计算机实现方法,其中,所述公式化包括将所述斯坦纳最小树问题公式化为受约束的斯坦纳最小树问题,其可以表示为:

$$\begin{aligned} \min_{S \in H, \Gamma} F(S) &= f(S) + c_b \cdot N_b \\ \text{s. t. } d_k(x_i, x_j) &\leq b_k(x_i, x_j), \quad k = 1, \dots, |R| \end{aligned}$$

其中H是所述地理地形模型中的一组网格点； Γ 是斯坦纳树的一组测地线曲线；R是一个或多个约束条件的组； $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_b}\}$ 是所述地理地形模型中的一个或多个斯坦纳节点的一组位置； $f(S)$ 是所述基础设施链路网络的基础设施链路铺设成本，其取决于所述一个或多个斯坦纳节点S的位置和所述测地线曲线 Γ ； N_b 是斯坦纳节点的数量；

c_b 是每个连接器单元的成本； x_i 和 x_j 是受到约束因素的任何一对终端节点，每个所述终端节点对应于所述地理位置中的相应一个； $b(x_i, x_j)$ 是所述约束条件的值； $d_k(x_i, x_j)$ 是由节点 x_i 和 x_j 之间的一个或多个基础设施链路限定的路径长度。

10. 根据权利要求9所述的计算机实现方法，其中，所述求解包括：

利用基于拉格朗日乘数的方法将所述受约束的斯坦纳最小树问题转换为无约束问题；以及

确定所述无约束问题的解，以获得一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置，所述一个或多个斯坦纳节点中的每一个分别对应于所述一个或多个连接点中的相应一个。

11. 根据权利要求10所述的计算机实现方法，其中，所述基于拉格朗日乘数的方法应用拉格朗日函数，所述拉格朗日函数可以表示为：

$$L(S, \lambda) = f(S) + \sum_{k=1}^{|R|} \lambda_k (g_k(S) - b_k(x_i, x_j)) + c_b \cdot N_b$$

其中 $L(S, \lambda)$ 是S和 λ 的拉格朗日函数； $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|R|}]^T$ 是拉格朗日乘数的向量， $\lambda_k \geq 0$ ； $f(S)$ 代表所述基础设施链路网络的基础设施链路铺设成本； $g_k(S)$ 表示 d_k ，其由在受约束的节点 x_i 和 x_j 之间的一个或多个基础设施链路的路径上的斯坦纳节点的位置确定。

12. 根据权利要求11所述的计算机实现方法，其中，确定所述解包括：

对每个终端节点应用快速行进方法以获得相应的距离图；以及

利用基于有向无环图的动态规划算法处理所述距离图和预定的斯坦纳树拓扑，以获得所述一个或多个斯坦纳节点的相应坐标。

13. 根据权利要求12所述的计算机实现方法，其中，所述一个或多个约束条件仅包括与两个所述地理位置之间的最大路径长度相关联的单个约束条件，所述最大路径长度由一个或多个所述基础设施链路限定。

14. 根据权利要求13所述的计算机实现方法，其中，确定所述解还包括：

基于与所述单个约束条件相关联的 λ 的值更新所述距离图；以及

利用所述基于有向无环图的动态规划算法处理所述更新的距离图和所述预定的斯坦纳树拓扑，以获得所述一个或多个斯坦纳节点的相应进一步坐标。

15. 根据权利要求14所述的计算机实现方法，其中，确定所述解还包括：

(1) 基于原始对偶次梯度法更新 λ 的值；

(2) 根据所述更新的 λ 的值更新所述距离图；以及

(3) 利用所述基于有向无环图的动态规划算法处理所述更新的距离图和所述预定的斯坦纳树拓扑，以获得所述一个或多个斯坦纳节点的相应更新坐标。

16. 根据权利要求15所述的计算机实现方法,其中,确定所述解还包括:

迭代地重复步骤(1)到(3),直到达到所述约束条件的限制时或之后,直到达到与所述约束条件相关联的阈值的限制时或之后,或者直到完成了预定次数的迭代时或之后,以获得所述一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置。

17. 根据权利要求12所述的计算机实现方法,其中,所述一个或多个约束条件包括多个约束条件,所述多个约束条件与相应多个最大路径长度相关联,每个所述最大路径长度在相应两个所述地理位置之间,每个最大路径长度由一个或多个所述基础设施链路限定。

18. 根据权利要求17所述的计算机实现方法,其中,确定所述解还包括:

基于两个或更多个 λ 的值来更新所述距离图,所述两个或更多个 λ 中的每一个分别与相应一个约束条件相关联;以及

利用所述基于有向无环图的动态规划算法处理所述更新的距离图和所述预定的斯坦纳树拓扑,以获得所述一个或多个斯坦纳节点的相应进一步坐标。

19. 根据权利要求18所述的计算机实现方法,其中,确定所述解还包括:

(1) 基于原始对偶次梯度法更新所有 λ 的值;

(2) 根据更新的 λ 的值更新所述距离图;以及

(3) 利用所述基于有向无环图的动态规划算法处理所述更新的距离图和所述预定的斯坦纳树拓扑,以获得所述一个或多个斯坦纳节点的相应更新坐标。

20. 根据权利要求19所述的计算机实现方法,其中,确定所述解还包括:

迭代地重复步骤(1)到(3),直到达到所述约束条件中一个或多个的相应限制时或之后,直到达到与所述约束条件中一个或多个相关联的相应阈值的相应限制时或之后,或直到完成了预定次数的迭代时或之后,以获得所述一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置。

21. 根据权利要求1至7中任一项所述的计算机实现方法,其中,所述基础设施链路网络包括海底通信电缆网络。

22. 根据权利要求21所述的计算机实现方法,其中:

用于构建所述海底通信电缆网络的成本包括与铺设和/或构建通信电缆和一个或多个分支单元相关联的成本,

所述一个或多个分支单元用于与至少两条所述通信电缆连接,

所述一个或多个分支单元中的每一个都被布置在所述一个或多个连接点的相应一个处。

23. 一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机指令,所述计算机指令在被一个或多个处理器执行时使得所述一个或多个处理器执行根据权利要求1至22中任一项所述的计算机实现方法。

24. 一种系统,其用于确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置,所述系统包括一个或多个处理器,其被布置为执行根据权利要求1至22中任一项所述的计算机实现方法。

主干分支拓扑基础设施链路网络的路径布置的确定

技术领域

[0001] 本发明涉及主干分支拓扑(trunk-and-branch topology)基础设施链路网络的路径布置的确定。作为非限制性示例,该基础设施链路网络包括海底通信电缆网络。

背景技术

[0002] 基础设施链路网络是基础设施链路的网络,其通常包括电缆、管道、道路等类似链路的物理结构。

[0003] 一种示例性基础设施链路网络是海底通信电缆网络。海底通信电缆网络是重要的通信技术基础设施,其允许在不同位置、地区、地点、国家等之间的数据和信息传输。随着互联网流量的增加,对通信电缆网络的需求也随之增加。

[0004] 需要适当地、有效地和/或可靠地设计基础设施链路网络的路径,如海底通信电缆网络(例如,通信电缆的路径布置),以促进这些网络的具有成本效益的构建或改造。

发明内容

[0005] 在第一方面,本发明提供了一种计算机实现方法,其用于确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置。该计算机实现方法包括:对包括三个或更多个地理位置的地理地形进行建模以获得地理地形模型,该三个或更多个地理位置可以通过基础设施链路网络直接或间接地相互连接;确定与用于构建连接该三个或更多个地理位置的基础设施链路网络的成本相关联的成本函数;以及基于地理地形模型以及在考虑一个或多个约束条件的情况下优化成本函数来确定基础设施链路网络的路径布置。基础设施链路网络的路径布置具有主干分支拓扑并且包括:连接该三个或更多个地理位置的三个或更多个基础设施链路,以及一个或多个连接点,其中每个连接点分别设置在两个或更多个基础设施链路之间。

[0006] 可选地,在考虑一个或多个约束条件的情况下优化成本函数包括在考虑一个或多个约束条件的情况下使成本函数最小化。

[0007] 可选地,对地理地形进行建模包括将地理地形建模为三维(3D)欧几里得空间(Euclidean space)中的不规则二维(2D)流形(manifold)。在一些实施方式中,3D欧几里得空间中的不规则2D流形包括3D欧几里得空间中的三角(triangulated)分段线性(piecewise-linear)2D流形。在一些实施方式中,2D流形包括多个节点,每个节点可表示为或被表示为3D坐标(位置x、y高度z)。

[0008] 可选地,成本函数是与位置相关的成本函数。

[0009] 可选地,成本函数是与深度相关的成本函数。

[0010] 可选地,成本函数包括可以被分别加权的一个或多个成本因子。

[0011] 可选地,用于构建基础设施链路网络的成本包括与铺设和/或构建基础设施链路和一个或多个连接器单元相关联的成本,其中每个连接器单元连接两个或更多个基础设施链路并且一个或多个连接器单元中的每一个都被布置在或将被布置在一个或多个连接点

中的相应一个处。

[0012] 可选地,该一个或多个约束条件包括两个地理位置之间的最大路径长度,该最大路径长度由该两个地理位置之间的一个或多个基础设施链路限定。

[0013] 可选地,确定基础设施链路网络的路径布置包括确定一个或多个连接点的总数和/或相应位置。

[0014] 可选地,确定基础设施链路网络的路径布置包括:在考虑一个或多个约束条件的情况下,将基础设施链路网络的路径布置的确定公式化为斯坦纳最小树问题;以及在考虑一个或多个约束条件的情况下,求解该斯坦纳最小树问题;其中该基础设施链路网络的路径布置的主干分支拓扑大体对应于斯坦纳拓扑(例如,全斯坦纳拓扑(full Steiner topology)或退化斯坦纳拓扑(degenerate Steiner topology))。

[0015] 可选地,该公式化包括将斯坦纳最小树问题公式化为受约束的(constrained)斯坦纳最小树问题,其可以表示为:

$$\min_{S \in H, \Gamma} F(S) = f(S) + c_b \cdot N_b$$

$$\text{s. t. } d_k(x_i, x_j) \leq b_k(x_i, x_j), k=1, \dots, |R|$$

其中H是地理地形模型中的一组网格点; Γ 是斯坦纳树的一组测地线曲线;R是一个或多个约束条件的组; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_b}\}$ 是地理地形模型中的一个或多个斯坦纳节点的一组位置; $f(S)$ 是基础设施链路网络的基础设施链路铺设成本,其取决于一个或多个斯坦纳节点S的位置和测地线曲线 Γ ; N_b 是斯坦纳节点的数量; c_b 是每个连接器单元的成本; x_i 和 x_j 是受到约束因素的任何一对终端节点,每个终端节点对应于地理位置中的相应一个; $b(x_i, x_j)$ 是约束条件的值; $d_k(x_i, x_j)$ 是由节点 x_i 和 x_j 之间的一个或多个基础设施链路限定的路径长度。

[0016] 可选地,求解包括:利用基于拉格朗日乘数的方法将受约束的斯坦纳最小树问题转换为无约束问题;以及确定无约束问题的解以获得一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置,该一个或多个斯坦纳节点中的每一个分别对应于一个或多个连接点中的相应一个。

[0017] 可选地,基于拉格朗日乘数的方法应用拉格朗日函数,该拉格朗日函数可以表示为:

$$L(S, \lambda) = f(S) + \sum_{k=1}^{|R|} \lambda_k (g_k(S) - b_k(x_i, x_j)) + c_b \cdot N_b$$

其中 $L(S, \lambda)$ 是S和 λ 的拉格朗日函数; $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|R|}]^T$ 是拉格朗日乘数的向量, $\lambda_k \geq 0$; $f(S)$ 代表基础设施链路网络的基础设施链路铺设成本; $g_k(S)$ 表示 d_1 , 其由在受约束的节点 x_i 和 x_j 之间的一个或多个基础设施链路的路径上的斯坦纳节点的位置确定。

[0018] 可选地,确定该解包括:对每个终端节点应用快速行进方法以获得相应的距离图;利用基于有向无环图的动态规划算法(directed acyclic graph based dynamic programming algorithm)处理距离图和预定的斯坦纳树拓扑以获得一个或多个斯坦纳节点的相应坐标。该一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。

[0019] 可选地,该一个或多个约束条件仅包括与两个地理位置之间的最大路径长度相关

联的单个约束条件,该最大路径长度由该两个地理位置之间的一个或多个基础设施链路限定。

[0020] 可选地,确定该解还包括:基于与单个约束条件相关联的 λ 的值更新距离图;以及利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应进一步坐标。该一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。

[0021] 可选地,确定该解还包括:(1)基于原始对偶次梯度法(primal-dual subgradient method)更新 λ 的值;(2)根据更新的 λ 的值更新距离图;以及(3)利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应更新坐标。该一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。

[0022] 可选地,确定该解还包括:迭代地重复步骤(1)至(3)直到满足预定的条件时或之后。

[0023] 可选地,确定该解还包括:迭代地重复步骤(1)至(3)直到达到约束条件的限制时或之后,直到达到与约束条件相关联的阈值的限制时或之后,或直到完成了预定次数的迭代时或之后,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置。

[0024] 可选地,该一个或多个约束条件包括多个约束条件,其与相应多个最大路径长度相关联,其中每个最大路径长度在相应两个地理位置之间,并且每个最大路径长度由该两个地理位置之间的一个或多个基础设施链路限定。

[0025] 可选地,确定该解还包括:基于两个或更多 λ 的值更新距离图,其中每个 λ 与相应一个约束条件相关联;以及利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应进一步坐标。该一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。

[0026] 可选地,确定该解还包括:(1)基于原始对偶次梯度法更新所有 λ 的值;(2)根据更新的 λ 的值更新距离图;以及(3)利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应更新坐标。该一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。

[0027] 可选地,确定该解还包括:迭代地重复步骤(1)至(3)直到满足预定的条件时或之后。

[0028] 可选地,确定该解还包括:迭代地重复步骤(1)至(3),直到达到约束条件中一个或多个的相应限制时或之后,直到达到与约束条件中一个或多个相关联的相应阈值的相应限制时或之后,或直到完成了预定次数的迭代时或之后,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置。

[0029] 在一些实施方式中,基础设施链路网络包括海底通信电缆网络。可选地,用于构建海底通信电缆网络的成本包括与铺设和/或构建通信电缆和一个或多个分支单元相关联的成本,该一个或多个分支单元用于与至少两条通信电缆连接,并且该一个或多个分支单元中的每一个都被布置在该一个或多个连接点的相应一个处。在一些实施方式中,与铺设和构建通信电缆和一个或多个分支单元相关联的成本至少包括电缆成本、电缆铺设成本(例如,与劳动力、材料、许可相关联的成本)和分支单元成本。在一些实施方式中,一个或多个

约束条件包括在两个地理位置之间的最大通信电缆路径长度。最大通信电缆路径长度由一个或多个通信电缆限定并且与两个地理位置之间的最大允许延迟(latency)相关联。

[0030] 在一些实施方式中,基础设施链路网络包括管道网络。可选地,用于构建管道网络的成本包括与铺设和构建管道和一个或多个歧管相关联的成本,该一个或多个歧管用于连接至少两个管道,该一个或多个歧管中的每一个都被布置在该一个或多个连接点的相应一个处。

[0031] 在一些实施方式中,基础设施链路网络包括道路网络。可选地,用于构建道路网络的成本包括与铺设和构建道路和一个或多个路口相关联的成本,该一个或多个路口用于连接至少两个道路,该一个或多个路口中的每一个都被布置在该一个或多个连接点的相应一个处。

[0032] 可选地,该计算机实现方法还包括:将确定的基础设施链路网络的路径布置叠加在地理地形模型上以进行显示。

[0033] 在第二方面,本发明提供了一种非暂时性计算机可读存储介质,其上存储有计算机指令,该计算机指令在被一个或多个处理器执行时使得该一个或多个处理器执行第一方面的计算机实现方法。

[0034] 在第三方面,本发明提供了一种数据处理系统,其包括用于执行第一方面的计算机实现方法的装置。

[0035] 在第四方面,本发明提供了一种计算机程序,其上存储有指令,当该计算机程序由计算机(或一个或多个处理器)执行时,该计算机程序使该计算机(或一个或多个处理器)执行第一方面的计算机实现方法。

[0036] 在第五方面,本发明提供了一种系统,其用于确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置。该系统包括一个或多个处理器,其被布置(例如,被编程)为执行第一方面的计算机实现方法。

[0037] 可选地,系统还包括显示器,其可操作地与该一个或多个处理器连接以用于显示叠加在地理地形模型上的确定的基础设施链路网络的路径布置。

[0038] 在第六方面,本发明提供了一种方法,其包括:执行第一方面的计算机实现方法;以及基于所确定的路径布置构建(例如,建造)该基础设施链路网络的至少一部分。可选地,该构建(例如,建造)包括改造现有的基础设施链路网络。

[0039] 在第七方面,本发明提供了一种基于第六方面的方法构建的基础设施链路网络。

[0040] 通过考虑详细描述和附图,本发明的其他特征和方面将变得显而易见。在适当和适用的情况下,在本文关于一个方面或实施方式描述的任何个或多个特征可以与本文关于任何一个或多个其他方面或实施方式描述的任何个或多个其他特征组合。

附图说明

[0041] 现在将参考附图以示例的方式描述本发明的实施方式,其中:

[0042] 图1是示出本发明一个实施方式的受约束的斯坦纳最小树问题的示意图;

[0043] 图2是示出本发明一个实施方式的拉格朗日快速行进方法中的 m_f^* 和 m_g^* 的单调性(monotonicity)的图表;

[0044] 图3是示出本发明一个实施方式的拉格朗日快速行进方法(当 $|M_\lambda| = 2$ 时)的图表;

[0045] 图4A是在一个示例中的斯坦纳树的示意图,其中该斯坦纳树沿约束路径(在节点 x_1 和 x_5 之间)具有一个内部节点;

[0046] 图4B是图4A的斯坦纳树在退化情况下(degenerated case)的斯坦纳树的示意图;

[0047] 图4C是图4A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0048] 图5A是在一个示例中的斯坦纳树的示意图,其中该斯坦纳树沿约束路径(在节点 x_1 和 x_5 之间)具有两个内部节点;

[0049] 图5B是图5A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0050] 图5C是图5A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0051] 图5D是图5A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0052] 图5E是图5A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0053] 图5F是图5A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0054] 图6A是在一个示例中的斯坦纳树的示意图,其中该斯坦纳树沿约束路径(在节点 x_1 和 x_5 之间)具有三个内部节点;

[0055] 图6B是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0056] 图6C是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0057] 图6D是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0058] 图6E是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0059] 图6F是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0060] 图6G是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0061] 图6H是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0062] 图6I是图6A的斯坦纳树在退化情况下的斯坦纳树的示意图;

[0063] 图7是示出在一个示例中的感兴趣区域(其包括5个感兴趣位置)的地理地形的地图;

[0064] 图8A是本发明一个实施方式的用于图7的感兴趣区域的五终端电缆系统(具有第一全斯坦纳拓扑)的示意图;

[0065] 图8B是本发明一个实施方式的用于图7的感兴趣区域的五终端电缆系统(具有第二全斯坦纳拓扑)的示意图;

[0066] 图8C是本发明一个实施方式的用于图7的感兴趣区域的五终端电缆系统(具有第三全斯坦纳拓扑)的示意图;

[0067] 图8D是本发明一个实施方式的用于图7的感兴趣区域的五终端电缆系统(具有第四全斯坦纳拓扑)的示意图;

[0068] 图8E是本发明一个实施方式的用于图7的感兴趣区域的五终端电缆系统(具有第五全斯坦纳拓扑)的示意图;

[0069] 图9A是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8A的第一拓扑(包括一个约束条件)进行优化的过程的示意图;

[0070] 图9B是图9A所示的优化过程的优化结果(包括一个约束条件以及沿约束路径具有两个斯坦纳节点)的示意图;

[0071] 图10A是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8A的第一拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿约束路径具有一个斯坦纳节点)进行处理而

获得的优化结果的示意图；

[0072] 图10B是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8A的第一拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有一个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0073] 图11A是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8A的第一拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径没有斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0074] 图11B是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8A的第一拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径没有斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0075] 图12A是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8B的第二拓扑(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有三个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0076] 图12B是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8B的第二拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有两个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0077] 图12C是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8B的第二拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有两个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0078] 图12D是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8B的第二拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有一个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0079] 图12E是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8B的第二拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有一个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0080] 图12F是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8B的第二拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有一个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0081] 图13A是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8C的第三拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有一个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0082] 图13B是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8C的第三拓扑的退化情况(包括一个约束条件以及沿受约束路径具有一个斯坦纳节点)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0083] 图14A是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8D的第四拓扑(包括一个约束条件)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0084] 图14B是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-I)对图8E的第五拓扑(包括一个约束条件)进行处理而获得的优化结果的示意图；

[0085] 图15A是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-II)对图8E的第

五拓扑(包括两个约束条件)进行优化的过程的示意图;

[0086] 图15B是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-II)对图8E的第五拓扑(包括两个约束条件)进行优化的过程的示意图;

[0087] 图15C是图15B所示的优化过程的优化结果(包括两个约束条件以及沿受约束路径具有两个斯坦纳节点)的示意图;

[0088] 图16是示出使用一个实施方式的拉格朗日快速行进算法(LAFM-II)对图8D的第四拓扑(包括四个约束条件)进行处理而获得的优化结果的示意图;

[0089] 图17是示出本发明一个实施方式的用于确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置的计算机实现方法的流程图;以及

[0090] 图18是数据处理系统的功能框图,该数据处理系统可操作以实施本发明的计算机实现方法的至少一部分。

具体实施方式

[0091] 图17示出了用于确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置的计算机实现方法1700。

[0092] 在该实施方式中,方法1700包括在步骤1702中对包括三个或更多个地理位置的地理地形进行建模以获得地理地形模型。地理位置可经由具有主干分支拓扑的基础设施链路网络相互连接。地理地形可以被建模为三维(3D)欧几里得空间中的不规则二维(2D)流形。在一些实施方式中,3D欧几里得空间中的不规则2D流形包括3D欧几里得空间中的三角分段线性2D流形。2D流形可包括多个节点,其中每个节点可表示为或被表示为3D坐标(位置 x 、 y 和高度 z)。

[0093] 方法1700还包括在步骤1704中确定与用于构建连接该三个或更多个地理位置的基础设施链路网络的成本相关联的成本函数。该成本函数可以是与位置相关的成本函数。在一个示例中,该成本函数是与深度相关的成本函数。该成本函数包括一个或多个成本因子,其可以被分别加权以将不同的重要性/显着性分配给不同的成本因子。成本包括或仅包括与铺设和/或构建基础设施链路和一个或多个连接器单元相关联的成本,其中每个连接器单元连接两个或更多个基础设施链路并且每个连接器单元布置在相应的连接点处。

[0094] 方法1700还包括在步骤1706中基于地理地形模型以及在考虑一个或多个约束条件的情况下优化成本函数来确定基础设施链路网络的路径布置。基础设施链路网络的路径布置具有主干分支拓扑并且包括:连接该三个或更多个地理位置的三个或更多个基础设施链路,以及分别布置在两个或更多个基础设施链路之间的一个或多个连接点。在一些实施方式中,成本函数的优化是使成本函数最小化。该一个或多个约束条件可以包括单个约束条件或多个约束条件,其可包括两个地理位置之间的最大路径长度(由该两个地理位置之间的一个或多个基础设施链路限定)。路径布置的确定可以包括确定一个或多个连接点的总数和/或相应位置。

[0095] 在一些实施方式中,在步骤1706中,确定基础设施链路网络的路径布置包括:在考虑一个或多个约束条件的情况下,将基础设施链路网络的路径布置的确定公式化为斯坦纳最小树问题;以及在考虑一个或多个约束条件的情况下,求解该斯坦纳最小树问题。在这些实施方式中,基础设施链路网络的路径布置的主干分支拓扑大体对应于斯坦纳拓扑(例如,

全斯坦纳拓扑或退化斯坦纳拓扑)。在一些实施方式中,该斯坦纳最小树问题可以化为受约束的斯坦纳最小树问题,其可以表示为:

$$\begin{aligned} \min_{S \in H, \Gamma} F(S) &= f(S) + c_b \cdot N_b \\ \text{s. t. } d_k(x_i, x_j) &\leq b_k(x_i, x_j), \quad k = 1, \dots, |R| \end{aligned}$$

其中H是地理地形模型中的一组网格点; Γ 是斯坦纳树的一组测地线曲线;R是一个或多个约束条件的组; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_b}\}$ 是地理地形模型中的一个或多个斯坦纳节点的一组位置; $f(S)$ 是基础设施链路网络的基础设施链路铺设成本,其取决于一个或多个斯坦纳节点S的位置和测地线曲线 Γ ; N_b 是斯坦纳节点的数量; c_b 是每个连接器单元的成本; x_i 和 x_j 是受到约束因素的任何一对终端节点,每个终端节点对应于地理位置中的相应一个; $b_k(x_i, x_j)$ 是约束条件的值; $d_k(x_i, x_j)$ 是由节点 x_i 和 x_j 之间的一个或多个基础设施链路限定的路径长度。在一些实施方式中,约束斯坦纳最小树问题的求解包括:利用基于拉格朗日乘数的方法将受约束的斯坦纳最小树问题转换为无约束问题;以及确定该无约束问题的解。该解提供一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置,其每一个分别对应于连接点中的相应一个。在一些实施方式中,基于拉格朗日乘数的方法应用拉格朗日函数,该拉格朗日函数可以表示为:

$$L(S, \lambda) = f(S) + \sum_{k=1}^{|R|} \lambda_k (g_k(S) - b_k(x_i, x_j)) + c_b \cdot N_b$$

其中 $L(S, \lambda)$ 是S和 λ 的拉格朗日函数; $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|R|}]^T$ 是拉格朗日乘数的向量, $\lambda_k \geq 0$; $f(S)$ 代表基础设施链路网络的基础设施链路铺设成本; $g_k(S)$ 表示 d_k , 其由在受约束的节点 x_i 和 x_j 之间的一个或多个基础设施链路的路径上的斯坦纳节点的位置确定。

[0096] 作为一个示例,该一个或多个约束条件包括与两个地理位置之间的最大路径长度相关联的单个约束条件。在该示例中,确定该解(该无约束问题的解)包括:对每个终端节点(建模的地理位置)应用快速行进方法以获得相应的距离图;根据基于有向无环图的动态规划算法处理距离图和预定的斯坦纳树拓扑以获得一个或多个斯坦纳节点的相应坐标。这些一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。如果确定的斯坦纳节点是中间斯坦纳节点,则确定该解还可以包括:基于与该单个约束条件相关联的 λ 的值更新距离图;以及利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应进一步坐标。这些一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。在一些实施方式中,确定该解还包括:基于原始对偶次梯度法更新 λ 的值;根据更新的 λ 的值更新距离图;以及(3)利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应更新坐标。可以迭代地重复这些更新和处理步骤,直到满足预定的条件时或之后,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置。该预定的条件可以是,例如,直到达到约束条件的限制时或之后,直到达到与约束条件相关联的阈值的限制时或之后,或直到完成了预定次数的迭代时或之后。

[0097] 作为另一个示例,该一个或多个约束条件由多个约束条件组成,其中每个约束条件分别与相应两个地理位置之间的相应最大路径长度相关联。在该示例中,确定该解(该无

约束问题的解)包括:对每个终端节点(建模的地理位置)应用快速行进方法以获得相应的距离图;根据基于有向无环图的动态规划算法处理距离图和预定的斯坦纳树拓扑以获得一个或多个斯坦纳节点的相应坐标。这些一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。如果确定的斯坦纳节点是中间斯坦纳节点,则确定该解还可以包括:基于两个或更多 λ 的值更新距离图,其中每个 λ 与相应一个约束条件相关联;以及利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应进一步坐标。这些一个或多个斯坦纳节点可以是要被进一步优化的中间斯坦纳节点或者可以是经优化的斯坦纳节点。在一些实施方式中,确定该解还包括:基于原始对偶次梯度法更新所有 λ 的值;根据更新的 λ 的值更新距离图;以及利用基于有向无环图的动态规划算法处理更新的距离图和预定的斯坦纳树拓扑,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应更新坐标。可以迭代地重复这些更新和处理步骤,直到满足预定的条件时或之后,以获得一个或多个斯坦纳节点的相应最佳位置。该预定的条件可以是,例如,直到达到一个或多个约束条件的相应限制时或之后,直到达到与一个或多个约束条件相关联的相应阈值的相应限制时或之后,或直到完成了预定次数的迭代时或之后。

[0098] 尽管未具体示出,但是方法1700还可以包括在步骤1706之后显示确定的路径布置。该显示可以包括将确定的基础设施链路网络的路径布置叠加在地理地形模型上进行显示。

[0099] 在一些实施方式中,在方法1700中,基础设施链路网络是海底通信电缆网络。在这种情况下,建造海底通信电缆网络的成本包括与铺设和构建通信电缆和用于连接至少两条通信电缆的一个或多个分支单元(其每一个分别布置在一个连接点)。在一些实施方式中,与铺设和构建通信电缆和一个或多个分支单元相关联的成本至少包括电缆成本、电缆铺设成本(例如,与劳动力、材料、许可相关联的成本)和分支单元成本。在一些实施方式中,该一个或多个约束条件包括在两个地理位置之间的最大通信电缆路径长度(其与两个地理位置之间的最大允许延迟相关联)。

[0100] 以下的描述提供了本发明的一些实施方式(方法1700的具体示例),其用于确定海底通信电缆网络(具有主干分支拓扑)的路径布置。需要指出的是,的应用并不限于海底通信电缆网络,即本发明也可以用于确定其他基础设施链路网络的路径布置。

[0101] 本发明的发明人意识到海底通信电缆系统设计的一个重要考虑是海底通信电缆系统的总建设成本,其可能是显着的(例如,数十亿的量级)。总建设成本可能包括电缆成本、铺设电缆的成本和分支单元的成本,而电缆铺设的成本可能包括与人工、材料和许可相关的成本。需要注意的是,在海底通信电缆系统中,分支单元是用于将一个通信电缆分成多个通信电缆以到达多个目的地的装置,并且分支单元的成本主要由其复杂程度和端口的数量决定。

[0102] 本发明的发明人还意识到,为了降低建设海底通信电缆系统的成本,需要优化的性能特性包括电缆的长度和电缆正被或将被敷设的地表深度。一般来说,将电缆敷设在深水区域比较安全,因为这可以减少与人类有关的活动(例如,捕鱼)造成的各种风险。在以下实施方式中的成本函数的优化中,在较深的水域施加较低的成本并且在较浅的水域施加较高的成本,由此该优化使用了与位置相关的数据(即,地表深度)。本发明的发明人意识到在

海底铺设电缆(与在陆地相比)有几个优点。例如,在海底铺设的成本通常比在陆地低,并且建设速度也比在陆地快(在陆地铺设的电缆需要在地下或在地面上的塔架上,并且可能会经过私人财产)。例如,海水可以防止外部的光波和磁波的干扰,从而提高通信电缆(例如光纤电缆)的通信质量。例如,与陆地电缆相比,海底通信电缆不易受到人类活动的干扰和破坏。在以下实施方式中的成本函数或目标加权(objective weighted)的成本函数的优化中,陆地的成本高于海底的成本,并且成本随着深度的增加而降低(因为通信电缆一般在较深的水域中较安全)。

[0103] 本发明的发明人意识到,在本领域中,存在使用人工的方法(基于专家经验)来进行海底通信电缆的路径规划的偏见。本发明的发明人认为:在实践中,长途海底通信电缆的长度可能长达数千公里,因此在没有可扩展的、自动化的软件工具的情况下进行人工路径规划可能成本很高,并且可能无法实现预期的最佳成本风险优化。本发明的发明人认为,基于算法的海底通信电缆自动化电缆路径规划(包括基于服务质量要求优化与成本和风险相关的目标)可以增强电缆路径和系统规划人员、设计师和测量员目前使用的人工方法。虽然电缆路径和系统规划人员、设计人员和测量员可能会或可能不会直接使用基于算法的自动化方法和解(解决方案)来设计电缆路径,但是考虑到基于算法的自动化解决方案会为人工方法提供信息(尤其是在特定节点对之间具有延迟要求时)。例如,自动算法解决方案可能会指示需要收集更多海底数据的区域。例如,可以根据行业系统和电缆规划人员、设计人员和测量员的实际反馈来对成本函数进行调整,这样的调整可能会导致更准确的解。

[0104] 本发明的发明人意识到,在实践中,除了地表深度之外,海底通信电缆的路径规划还可能考虑到其他与位置相关的因素/问题(例如地震易发区、具有陡坡或有害岩石的表面、大量捕捞活动区和涉及特定法律要求的地区等等),并且可以使用较长的电缆来避开这些地方或地区。本发明的一些实施方式考虑长度或延迟感知(length-or latency-aware)设计与位置的相关成本函数。然而,在下文中,为了简化论述,在与位置的相关成本函数中仅考虑深度。然而,应当理解,例如通过施加汇总成本函数,其中各种设计考虑因素的权重是根据经验获得的(如果相关的数据可用),实施方式可以被扩展到考虑上述问题。

[0105] 本发明的发明人还意识到,海底通信电缆系统设计的另一个重要因素是延迟(latency),即在通信的两个终端之间传输数据所需的时间(这与电缆的长度等因素有关)。通常,较低延迟的网络可以实现与网络和使用该网络的应用相关联的更高质量的体验。在某些情况下,在终端节点之间的流量需要经过其他节点。中间节点可能会进一步增加总延迟,因为数据包必须传递到上层电气层以进行数据包分析和处理。中间节点(分支单元或电缆登陆站)的延迟可能是非确定性(non-deterministic)的并且需要逐个装置进行分析。这与它们处理传入信号的方式有关。本发明的发明人意识到,使用光学旁路可能有助于避免这种延迟。因此,在一些实施方式中,可以在每个中间节点中实现旁路,以使得没有或很少有中间处理延迟。

[0106] 本发明的发明人通过研究、实验和试验设计出海底通信电缆系统可以设计成各种拓扑,例如点对点拓扑、环形拓扑、网状拓扑、主干分支拓扑等。对于两个终端(例如,两个地理位置)之间的电缆路径规划,可以使用点对点拓扑;对于三个或更多个终端(例如,三个或更多个地理位置),可以使用主干分支拓扑。在规划或设计新的海底通信电缆系统时,指定的终端(例如地理位置)可以通过树状的(主干分支拓扑)电缆系统连接,并且必须满足某些

终端对的延迟约束条件(在不考虑通过其他电缆通信的情况下)。

[0107] 本发明的发明人通过研究、实验和试验,设计出:具有主干分支拓扑的海底通信电缆系统的设计问题可以被视为地球的海底表面的斯坦纳最小树(SMT)问题。在一些实施方式中,地球的海底表面可以由3D欧几里得空间中的三角2D流形表示。SMT问题的概述如下。在给定的特定地理区域的地图和在该区域中的终端节点集 N ,设计连接系统以连接所有终端节点,其目标是使所有电缆链路的总长度最小化。这样,任何两个终端节点都必然直接或通过一个或多个中间节点连接,这些中间节点可以是现有的终端节点或额外引入的节点(斯坦纳节点)。这种连接终端和斯坦纳节点的最佳系统始终是一棵树:SMT。SMT问题是NP困难的,因此该问题的解不可扩展到较大型的系统。虽然现有的SMT算法可以根据斯坦纳点在平面中的角度条件找到斯坦纳点,但这些算法不能直接应用于3D欧氏空间中的不规则2D流形的情况。

[0108] 以下实施方式涉及分支单元的位置以及总系统成本(包括分层成本和分支单元成本)的优化,其中该优化受制于指定的终端节点对之间的延迟约束条件(长度约束条件)。以下的实施方式是基于解决受约束的SMT问题,其中分支单元是斯坦纳节点(其用于优化斯坦纳树拓扑以及斯坦纳节点的位置)。在这些实施方式中,要最小化的目标函数是树系统的总成本(包括构建电缆和分支单元的成本)。

[0109] 以下描述本发明应用于海底通信电缆网络的具体实施方式。

[0110] 问题建模和表述

[0111] 以下首先给出本发明一些实施方式中的海底地形模型和电缆铺设成本模型。在这些实施方式中,电缆系统优化问题被表述化为具有约束条件的SMT(受约束的SMT)问题。

[0112] 对于这些实施方式中的问题建模,利用 D 表示地球表面上的一个区域并且利用 x_1, x_2, \dots, x_N 表示 D 中的终端节点。这些实施方式的目标是为这些终端节点优化具有主干分支树形拓扑的海底通信电缆系统以使总成本最小化,并且同时,对一个或多个指定终端节点对之间的距离施加一个或多个约束条件。电缆系统的总成本包括所有电缆成本的总和,以及一个或多个新引入节点的成本,该节点对应斯坦纳节点(代表电缆系统中的分支单元)。在此示例中,使用以下符号: $\gamma(A, B) \in D$ (测地线)用于表示连接两个终端节点 $A, B \in D$ 的电缆。在 D 的曲线被假定为是根据自然参数化来被参数化,即将曲线 γ 参数化为弧长 S 的函数,以使得 $\gamma: [0, l(\gamma)] \rightarrow D$ 曲线是 $[0, l(\gamma)]$ 区间的函数,其取 D 的值,其中 $l(\gamma)$ 是曲线 γ 的长度。

[0113] 为了表示地球表面,使用了在 R^3 中的三角分段线性二维流形 M 来近似区域 D 。在此流形 M 中的每个节点 h 都由3D坐标 (x, y, z) 表示,其中 $z = \xi(x, y)$ 是地理位置 (x, y) 的高度。一般来说,节点越多,该表示的分辨率就越高,得到的最优结果就越真实。这些实施方式的目的是对于给定的表示找出问题的最优解。

[0114] 在这些实施方式中,在位置 h 的优化中使用的每单位长度成本是 $c(h)$ 。这种表示的细节可以在Z.Wang等人的题为“Multiobjective path optimization for critical infrastructure links with consideration to seismic resilience,”Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, vol.32, no.10, pp.836-855, 2017的文章中找到。在电缆 γ 的优化中使用的总成本为 $C(\gamma)$,这就是要被最小化的目标函数成本。这与实际电缆成本不同,因为它被调整以包含风险成分。通过应用成本的可加性假设(其细节可以在

Q.Wang等人的题为“Cost-effective path planning for submarine cable network extension,”IEEE Access,vol.7,pp.61 883-61 895,2019的文章以及Z.Wang等人的题为“Multiobjective path optimization for critical infrastructure links with consideration to seismic resilience,”Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,vol.32,no.10,pp.836-855,2017的文章中找到), $C(\gamma)$ 可以被写成

$$C(\gamma) = \int_0^{l(\gamma)} c(\gamma(s))ds \quad (1)$$

[0115] 通常,分支单元是连接三个终端的Y形电缆连接器。以下实施方式仅考虑具有三个分支的分支单元。不希望受理论的束缚,本发明的其他实施方式可以考虑其他类型的分支单元,例如具有四个分支的分支单元(例如,当两个Y形分支单元直接相互连接时,它们每一个都连接到另外两个终端)。通常,四个分支的分支单元较不稳定,因此不如三个分支的分支单元那么常用。

[0116] 在问题表述方面,这些实施方式将具有主干分支树拓扑的海底通信电缆系统的最优路径设计表述为受约束的SMT问题(即,具有一个或多个约束条件的SMT问题)。在此示例中,SMT的边缘是M中的最小成本测地线(而不是直线),其成本由公式(1)给出。在这些实施方式中,问题基于流形模型,终端对之间的电缆路径通过快速行进方法获得,并且节点之间的最佳连接(即测地线)是弯曲的。

[0117] 为了以一种便于计算的形式来表述这个问题,将H限定为在M中的一组网格点,并且H是紧凑的,将N限定为终端节点的数量,将R限定为延迟约束条件的组;将 N_b 限定为斯坦纳节点的数量,将 c_b 限定为分支单元的成本,将 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{N_b}\}$ 限定为在M中的斯坦纳节点的一组位置,将 Γ 限定为斯坦纳树的一组测地线曲线,以及将 $f(S)$ 限定为电缆系统的电缆敷设成本(其取决于斯坦纳节点S和测地线曲线 Γ 的位置)。

$$f(S) = \sum_{\gamma_i \in \Gamma} C(\gamma_i) \quad (2)$$

[0118] 对应于受约束的SMT的电缆系统优化问题可以表示为:

$$\min_{S \in H, \Gamma} F(S) = f(S) + c_b \cdot N_b$$

$$s.t. d_k(x_i, x_j) \leq b_k(x_i, x_j), k=1, \dots, |R| \quad (3)$$

其中 x_i 和 x_j 是受到约束要求的任何一对终端节点,该延迟要求的值被写为 $b(x_i, x_j)$ 。 $d_k(x_i, x_j)$ 是由节点 x_i 和 x_j 之间的电缆路径的长度,

$$d_k(x_i, x_j) = \sum_{\gamma_\mu \in E_k} l(\gamma_\mu)$$

其中 E_k 是节点 x_i 和 x_j 之间的一组测地线曲线, $E_k = \{\gamma_{(x_i, s_1)}, \gamma_{(s_1, s_2)}, \dots, \gamma_{(s_n, x_j)}\}$, s_i 是在节点 x_i 和 x_j 之间的路径中的中间斯坦纳节点。在一些实施方式中,可能在几对节点存在延迟约束。

[0119] 图1示出了一个示例,其涉及四个节点(x_1, x_2, x_3, x_4)和两个斯坦纳节点(s_1, s_2)。应当注意,在图1中有五个链路/电缆(一个在 x_1 和 s_1 之间,一个在 x_2 和 s_1 之间,一个在 s_1 和 s_2 之间,一个在 x_4 和 s_2 之间,一个在 x_3 和 s_2 之间)。在 x_1 和 x_2 之间的路径的长度具有一个约束条件,即 $d(x_1, x_2) \leq b(x_1, x_2)$ 。这种情况下,该受约束的优化问题可以表述为:

$$\begin{aligned} \min_{s_1, s_2 \in H, \Gamma} F(s_1, s_2) &= f(s_1, s_2) + 2c_b \\ \text{s. t. } l(\gamma_{(x_1, s_1)}) + l(\gamma_{(s_1, x_2)}) &\leq b(x_1, x_2) \quad (4) \end{aligned}$$

[0120] 解决方案(解)

[0121] 本发明的一些实施方式提供了一种方法,其称为拉格朗日快速行进方法(Lagrangian Fast Marching, LAFM),以用于解决以上讨论的流形上的受约束的SMT问题。在这些实施方式中,首先,应用拉格朗日罚函数方法(Lagrangian penalty-function approach)将受约束问题转换为无约束问题。拉格朗日惩罚函数方法的一个示例可以在H.Everett III的题为“Generalized Lagrange multiplier method for solving problems of optimum allocation of resources,”Operations Research, vol.11, no.3, pp.399-417, 1963的文章中找到。在以下示例中,提供了用于解决单约束条件问题的LAFM-I算法和用于解决多约束条件问题的LAFM-II算法。

[0122] 对给定拓扑的LAFM

[0123] 要将公式(3)中的问题转换为无约束问题,首先使用拉格朗日乘数模型构建联立方程:

$$L(S, \lambda) = f(S) + \sum_{k=1}^{|R|} \lambda_k (g_k(S) - b_k(x_i, x_j)) + c_b \cdot N_b \quad (5)$$

其中 $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{|R|}]^T$ 是拉格朗日乘数的向量并且 $\lambda_k \geq 0$ 。 $f(S)$ 表示系统的电缆敷设成本。 $g_k(S)$ 表示 d_k ,其由在受约束的节点 x_i 和 x_j 之间的一个或多个基础设施链路的路径上的斯坦纳节点的位置确定。对于具有给定拓扑和终端的电缆系统, $f(S)$ 和 $g(S)$ 是斯坦纳节点 S 和电缆路径的函数。

[0124] 在尝试找到受约束的问题(3)的最优解之前,必须排除最优解不存在的情况。也就是说,如果其中一个约束条件 h 是使得 $l(\gamma_{k(x_i, x_j)}) \leq b_k(x_i, x_j)$,即连接 x_i 和 x_j (通过斯坦纳节点)的路径的允许最大长度小于它们之间的测地线的长度(无论是否通过斯坦纳节点),则问题(3)无最优解。假设情况并非如此,并且因此存在问题(3)的最优解。

[0125] 限定 $m_L^*(\lambda)$ 为

$$m_L^*(\lambda) = \min_{s \in H, \Gamma} L(s, \lambda) \quad (6)$$

[0126] 那么(5)的对偶问题可以表述为

$$\max_{\lambda} \min_{s \in \Gamma} L(S, \lambda) = \max_{\lambda} m_L^*(\lambda) \quad (7)$$

[0127] 通过弱对偶性,对于任何给定的 $\lambda \geq 0$,如果 S 相对于问题(3)中的约束条件是可行的,则 $m_L^*(\lambda)$ 提供问题(3)的最优值的下限。原始问题(3)的最优解等于对偶问题(7)的解,前提是后者满足互补松弛条件,即, $\lambda_k g_k(S^*) = \lambda_k b_k(x_i, x_j)$, $k=1, \dots, |R|$,其中 S^* 解决了 $\lambda = \lambda^*$ 对偶问题。

[0128] 以下首先考虑只有一个延迟的约束情况下的SMT问题。该问题可以通过一些实施方式的LAFM-I算法来解决,该算法在温和的假设下可以找到原始问题(3)的最优解。以下接着考虑在多个延迟约束条件的情况下的SMT问题。该问题可以通过一些实施方式的LAFM-II算法来解决,该算法在某些情况下可以找到原始问题(3)的最优解。LAFM-II算法通常可以提供合理的最优解。

[0129] 用于一个延迟约束条件问题的LAFM方法

[0130] 在一些实施方式中,提供了用于解决受约束的SMT问题(具有单个约束条件)的LAFM-I算法。可以在算法1中找到LAFM-I算法的细节。

| 算法1: LAFM-I算法 | |
|---------------|---|
| 输入: | N 个终端节点的坐标, 受约束的一对节点 (x_i, x_j) , 约束要求 b , 电缆铺设成本 c , 分支单元(BU)建设成本 c_b , 以及斯坦纳树的拓扑 |
| 输出: | 斯坦纳节点的坐标 $S^* = \{s_i, i = 1, 2, \dots, m - 2\}$, 以及斯坦纳树的路径 Γ |
| | 1: 对每个终端节点 $x_i, i = 1, 2, \dots, m - 2$ 运行FMM以获得相应的水平集(距离图) d_i |
| | 2: 通过利用距离图的输入和给定的拓扑执行有向无环图最低成本系统(DAG-Least-Cost-System)算法来获得斯坦纳节点 S 的坐标 |
| | 3: if $(l(\gamma_{x_i, x_j}) - b) < 0$ then |
| | 4: return \emptyset |
| | 5: else |
| | 6: 设 λ^0 为一个可导致可行的解的大数 |
| | 7: 根据与约束条件相关的 λ 的值, 更新距离图 d_i : |
| | $d_i = (1 + \lambda) \cdot d_{x_i}, d_{x_i} = (1 + \lambda) \cdot d_{x_j}$, 其中 x_i 和 x_j 是受约束的一对节点 |
| | 8: 通过利用更新的 d_i 和给定的拓扑执行有向无环图最低成本系统算法来获得斯坦纳节点 S 的坐标 |
| | 9: while $g(S) - b \neq 0$ do |
| | 10: $\lambda^{l+1} = \lambda^l + \frac{1}{l} \cdot \frac{g(S^l) - b}{ g(S^l) - b }$ |
| | 11: 利用新的 λ 来更新距离图 d_i |
| | 12: 通过利用更新的 d_i 和给定的拓扑执行有向无环图最低成本系统算法来获得斯坦纳节点 S 的坐标 |
| | 13: $l = l + 1$ |
| | 14: end while |
| | 15: end if |
| | 16: 获得包括斯坦纳节点 S^* 的最佳结果 |
| | 17: 为给定的拓扑计算最小成本 $T, T = f(S^*) + N_b \cdot c_b$ |
| | 18: return S, Γ 和 T |

[0131] 如算法1所示,LAFM-I可被视为有向无环图(DAG)最小成本系统的动态规划算法的扩展,该DAG最小成本系统的动态规划算法在Z.Wang等人的题为“Optimal submarine cable path planning and trunk-and-branch tree network topology design”IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.28, no.4, pp.1562-1572, August 2020的文章中和T.Wang等人的题为“Submarine cable network design for regional connectivity”2022, IEEE/ACM Transactions on Networking的文章中公开。在本公开中使用该DAG最小成本系统来为给定的拓扑的3D空间中的三角不规则2D流形找出SMT(没有任何延迟约束条件)。

[0132] LAFM-I通过在每次迭代中对固定的 λ 的值找到公式(5)中的 $L(S, \lambda)$ 的最小值而获得 S^* 。在 $l(\gamma_{x_i, x_j}) \leq b$ 的前提下,LAFM-I从 λ 等于一个大数开始,得到一个可行的解,然后沿着原始对偶次梯度法更新 λ 。该原始对偶次梯度法的示例实施可以在Y.Nesterov的题为

“Primal-dual subgradient methods for convex problems,” *Mathematical Programming*, vol. 120, no. 1, pp. 221-259, 2009的文章中找到。

[0133] 更具体地说,在迭代I, λ^I 被更新为

$$\lambda^{I+1} = \lambda^I + \frac{1}{I} \cdot \frac{g(S^I) - b}{|g(S^I) - b|}, \text{ if } g(S^I) - b \neq 0 \quad (8)$$

其中b是允许的最大延迟,当LAFM-I开始时 λ 足够大以导致可行的解,则 $g(S^I)$ 小于b。 λ 的值从一次迭代到下一次迭代减少,并且如前所述, $g(s)$ 随着 λ 减少而增加并且 $f(s)$ 随着 λ 减少而减少。当 $g(s)$ 取得满足约束条件的最大值时, $f(s)$ 取得最小值,这就是是要寻求的最优解。

[0134] LAFM-I的最优性(optimality)

[0135] 为证明LAFM-I可以找到原始问题(3)的最优解,写:

$$M_\lambda = \{S: L(S, \lambda) = m_L^*(\lambda)\}$$

$$m_f^*(\lambda) = \min\{f(S): L(S, \lambda) = m_L^*(\lambda)\}$$

$$m_g^*(\lambda) = \min\{g(S): L(S, \lambda) = m_L^*(\lambda)\}$$

[0136] 然后,做出以下假设:

假设1: $f(S)$ 和 $g(S)$ 在 S 中都是连续的
假设2: 对于每个 λ 的值, $|M_\lambda| = 1$

[0137] 以下的定理证明了LAFM-I的最优性:

[0138] 定理1: 对于给定的拓扑,在假设1和假设2下,LAFM-I可以为电缆系统设计提供最优解(在考虑电缆敷设成本、分支单元成本以及一对终端节点的延迟约束条件的情况下)。

[0139] 定理1的证明依赖于以下的引理1。

[0140] 引理1: 对于固定的给定拓扑和一个延迟要求,在 λ 中 $m_f^*(\lambda)$ 不减少,并且在 λ 中 $m_g^*(\lambda)$ 为连续的并且不增加。为简单起见,以下不提供引理1的详细证明。

[0141] 定理1的证明: 在图2中示出了 $m_f^*(\lambda)$ 和 $m_g^*(\lambda)$ 的单调性(monotonicity)。对于给定的延迟要求b和 $l_{(x_i, x_j)} \leq b$, 在算法1中从大的 λ 的值开始,并根据公式(8)对 λ 进行调整。由 $m_g^*(\lambda)$ 的单调性和连续性,可求出这样的 λ^* 其中 $g(S^*) = b$ 。那么,对于 $\lambda = \lambda^*$,相应一组斯坦纳节点 S^* 将是原始问题(3)的最优解,因为它满足互补松弛条件。

[0142] 在一些实施方式中,由于地形数据采样的精度有限,因此不能保证可以找到长度等于延迟约束条件的值的路径。在某些实施中,一旦受约束的路径的长度非常接近延迟要求(例如,达到与延迟要求相关联的阈值),则算法1的迭代将停止。

[0143] LAFM-I的最优性证明基于假设1和假设2。假设2是 $m_g^*(\lambda)$ 的连续性的条件,并且它并不简单也不一定总是正确的。图3示出了一个 $|M_\lambda| = 2$ 的示例。如果没有假设2, $m_g^*(\lambda)$ 将是半连续的,在这种情况下,确定LAFM-I在哪些情况中可以找到 S^* 以使得 $g(S^*) = b$ 的问题要深得多。在某些实施中,在迭代中 $f(S)$ 的最小上限被保留并作为原始问题(3)的次优解(suboptimal solution)输出。

[0144] 用于多延迟约束条件问题的LAFM方法

[0145] 通常,具有多个延迟要求的问题比只有一个延迟要求的问题更复杂。

[0146] 在一些实施方式中,提供了用于解决受约束的SMT问题(具有多个约束条件)的LAFM-II算法。可以在算法2中找到LAFM-II算法的细节。LAFM-II可以被认为是将LAFM-I扩展到多 λ 的情况。

算法2: LAFM-II算法

输入:

N 个终端节点的坐标, 一组约束要求 $R = \{r_k\}, k = 1, 2, \dots, |R|$, 其示出具有延迟要求 b_k 的一些节点对, 电缆铺设成本 c , 分支单元(BU)建设成本 c_b , 以及斯坦纳树的拓扑

输出:

斯坦纳节点的坐标 $S = \{s_i\}, i = 1, 2, \dots, n - 2$, 以及斯坦纳树的路径 Γ

- 1: 对每个终端节点 $x_i, i = 1, 2, \dots, n - 2$ 运行FMM以获得相应的水平集(距离图) d_i
- 2: 通过利用距离图 d_i 的输入和给定的拓扑执行有向无环图最低成本系统算法来获得斯坦纳节点 S 的坐标
- 3: 对于每个约束要求 r_k do
- 4: if $(l(\gamma_{k(x_i, x_j)}) - b_k) < 0$ then
- 5: return \emptyset
- 6: end if
- 7: end for
- 8: 设 $\lambda_k^0, k = 1, \dots, |R|$ 为可导致可行的解 S' 的大数;

- 9: 根据与约束条件相关联的 λ 的值更新距离图 d_i ;
- 10: for $i = 1, 2, \dots, n$, do
- 11: $\hat{\lambda} = 0$,
- 12: for $k = 1, 2, \dots, |R|$, do
- 13: if 节点 x_i 是约束条件 r_k 的一个终端 then
- 14: $\hat{\lambda} = \hat{\lambda} + \lambda_k$
- 15: end if
- 16: $d_{x_i} = (1 + \hat{\lambda}) \cdot d_{x_i}$
- 17: end for
- 18: end for
- 19: 通过利用更新的距离图 d_i 和给定的拓扑执行有向无环图最低成本系统算法来获得斯坦纳节点 S 的坐标以及相应的 $f_{LB}(S)$
- 20: while $\lambda_k \cdot g_k \neq \lambda_k \cdot b_k$ & $I \leq I_{max}$ do
- 21: $\lambda_k^{I+1} = \lambda_k^I + \frac{1}{I} \cdot \frac{g(S^I) - b_k}{|g(S^I) - b_k|}, k = 1, \dots, |R|$
- 22: if $f^I(S) < f_{LB}(S')$ then
- 23: $f_{LB}(S') = f^I(S)$
- 24: $S' = S$
- 25: end if
- 26: $I = I + 1$
- 27: 通过利用更新的距离图 d_i 和给定的拓扑执行有向无环图最低成本系统算法来获得斯坦纳节点 S 的坐标
- 28: end while
- 29: 获得包括斯坦纳节点 S^* 的最佳或次优结果
- 30: 为该拓扑计算最小成本 $T, T = f(S^*) + N_b \cdot c_b$
- 31: return S, Γ 和 T

[0147] 在算法2中,对于给定的拓扑,首先计算并确定 $l_{k(x_i, x_j)}$ 和 b_k 之间的关系。如果其中

一个 $l_{k(x_i, x_j)} > b_k$, 则此拓扑没有可行的解。对于给定的拓扑, 在 $l_{k(x_i, x_j)} \leq b_k, k = 1, 2, \dots, |R|$ 的前提下, LAFM-II 从等于大到足以导致可行的解的 λ 的值开始, 及其相应的 $f_{LB}(S')$ 。然后使用公式 (9) 更新所有 λ :

$$\lambda_k^{I+1} = \lambda_k^I + \frac{1}{I} \cdot \frac{g(S^I) - b_k}{|g(S^I) - b_k|}, \text{ if } g_k(S^I) \neq b_k \quad (9)$$

[0148] 在每次迭代后, 如果当前的 $f(S)$ 较小并且满足约束条件, 则将 S' 和 $f_{LB}(S')$ 更新。在 $\lambda_k g_k(S) = \lambda_k b_k, k = 1, 2, \dots, |R|$ 时或当达到最大迭代次数时, LAFM-II 将停止。

[0149] 综上所述, 如果 LAFM-II 在预定的最大迭代次数内输出解, 则该解为原始问题 (3) 的最优解 (因为满足互补松弛条件)。然而, 在某些情况下, 由于其复杂性, LAFM-II 可能无法保证找到原始问题 (3) 的最优解。如果在问题 (3) 中的二维流形只是二维平面, 则结论可能会得到加强, 因为 $f(s)$ 和 $g_k(s)$ 两者都是凸形的。基于 LAFM-II 的模拟表明, 在很多情况下, LAFM-II 都能得到问题 (3) 的最优解。此外, 在一些实施方式中, 可以保留 LAFM-II 迭代中用于 $f(s)$ 的最佳边界并将其用作最优 $f(s)$ 的估计 (如果 LAFM-II 没有找到最优的话)。表示为 $G_{l,u}$ 的最优解的上限和下限之间的差距取决于拉格朗日乘数和受约束路径的实际长度与长度要求的差异, 如公式 (10) 所示:

$$G_{l,u} = \sum_{k=1}^{|R|} \lambda_k \left(g_k(S) - b_k(x_i, x_j) \right) \quad (10)$$

[0150] 用于未知拓扑的 LAFM 方法

[0151] 上述实施方式适用于具有给定拓扑的一组终端节点。上述实施方式中的 LAFM-I 和 LAFM-II 算法以已知拓扑开始。基于该拓扑, 分支单元的数量以及这些分支单元如何与彼此连接和与终端连接是已知的。通过每个分支单元的流量需求是已知的。这使得可以准确估算成本。在一些实施方式中, 算法可以对不同的分支单元使用不同的成本。然而, 对于一个未知拓扑的问题, 需要考虑终端节点的所有可能拓扑, 包括所有全斯坦纳拓扑 (包括退化的拓扑)。在没有指定拓扑的示例中, 可能需要考虑所有可能的拓扑, 包括所有全斯坦纳拓扑及其退化拓扑。这是因为, 在考虑分支单元的成本时, 具有最小总电缆敷设成本的全斯坦纳拓扑并不总是或并不恰好是最小的电缆系统构建成本。总电缆长度的增加可能导致分支单元数量的减少, 从而可能导致总成本的减少。

[0152] 过程大致如下。首先, 通过 Smith 的分支定界 (B&B) 方法列出二维流形中的所有可能的全斯坦纳拓扑, 其中该分支定界 (B&B) 方法例如在 W.D.Smith 的题为 “How to find Steiner minimal trees in Euclidean d-space” Algorithmica, vol.7, no.1, pp.137-177, 1992 的文章中公开。根据在 T.Wang 等人的题为 “Submarine cable network design for regional connectivity” 2022 的文章中公开的, 所有退化拓扑都可以从全斯坦纳拓扑中得到。然后, 对于每个全斯坦纳拓扑, 运行迪克斯特拉 (Dijkstra) 算法, 沿受约束的节点对之间的路径寻找内部节点。应当注意: 在一些实施方式中, 当应用 Dijkstra 算法时, 两个节点之间的每条路径的权重被认为是相同的。然后, 考虑沿路径的内部节点的数量, 列出所有可能的退化拓扑。

[0153] 详细的枚举 (enumeration) 原则如下:

(1) 如果如图 4A 所示的沿受约束路径有一个内部节点, 延迟要求在节点 x_1 和 x_5 之间, 则可以通过对该拓扑应用 LAFM 来获得最优解。当分支单元成本被视为总电缆建设成本

的一部分时,随着 λ 变化,当斯坦纳节点的位置与受约束的节点对中的一个节点重合时,分支单元的数量将减少。因此,存在如图4B和图4C所示的两种情况。对于这两种情况,受约束的节点对 x_1 和 x_5 已经连通,所以只需要对剩余的四个节点进行动态规划(不用考虑约束要求)。

(2) 如果如图5A所示的沿受约束路径有两个内部节点,那么随着 λ 变化,分支单元的数量可能会减少。因此,存在五种情况,如图5B至图5F所示。

(3) 如果如图6A所示的沿受约束路径有三个内部节点,则对该两个内部节点情况的类似分析表明,对于三个内部节点拓扑,存在八种情况,如图6B至图6I所示。

[0154] 综上所述,如果受约束的节点对之间的路径上有 n 个内部节点,则由于斯坦纳节点和终端节点的不同组合,将有 $3n$ 个不同的拓扑(包括原始的全斯坦纳情况)。应当注意,在一些实施方式中,不需要考虑图5D至图5F中的拓扑,因为它们将不可避免地导致不会比图4A至图4C中的拓扑更好的解。

[0155] 应当注意,当受约束的节点对 x_1 和 x_5 直接连接时,只需应用FMM方法优化节点对 x_1 和 x_5 之间的路径,并对其余四个节点运行有向无环图最低成本系统(DAG-Least-Cost-System)动态规划算法(不考虑约束要求)。

[0156] 对于每个拓扑,分别应用LAFM方法、DAG-Least-Cost-System动态规划算法和FMM方法(用于点到点距离计算)来计算电缆系统的总成本,并且选择最小的总成本。

[0157] LAFM的计算复杂度分析

[0158] 由于SMT问题是NP困难的问题,以下推导出对给定拓扑的一次迭代的计算要求。假设在区域 M 中有 $|H|$ 个网格节点和有 N 个要连接的终端。那么,复杂度分析将与Z.Wang等人在题为“Optimal submarine cable path planning and trunk-and-branch tree network topology design”IEEE/ACM Transactions on Networking, vol.28, no.4, pp.1562-1572, August 2020的文章中和T.Wang等人在题为“Submarine cable network design for regional connectivity,”2022的文章中和一样:对于具有 N_0 个斯坦纳节点的给定拓扑来说,每次迭代的计算复杂度为 $O(|H|^2(\log |H| + N_0 - 1))$ 。LAFM算法的运行时间取决于 λ 的初始值的设置和分辨率的允许容差范围。计算流形 M 的每对网格节点的成本并将其存储在数据库中。因此,在最坏情况下,该算法需要至少 $O(|H|^2)$ 的内存。

[0159] 数值结果

[0160] 上述方法应用于三个现实的示例,这些示例使用来自全球多分辨率地形合成的经度和纬度(以30弧秒增量)的测深数据。该三个示例的目标区域 D 从西北角(45.000°N , 0.000°E)跨越到东南角(36.000°N , 11.000°E)。该区域有五个终端节点如图7所示:马赛(43.297°N , 5.359°E)、撒丁岛(40.557°N , 8.312°E)、阿尔及尔(36.761°N , 3.074°E)、巴塞罗那(41.368°N , 2.190°E)、和安纳巴(36.928°N , 7.760°E),其分别记为A、B、C、D、E。在这些示例中,分支单元的成本被认为是100万美元。在该示例中,为了简化说明,仅电缆长度和海底通信电缆位置影响目标函数成本。本发明的发明人经过研究、实验和试验,发现:除了在靠近电缆登陆站的区域外,在浅水区域的电缆的长度应尽可能短。电缆最好铺设在深海区域中,以减少人类活动所带来的风险。随着电缆敷设区域深度的增加,电缆故障的威胁会减少。公式(11)的设计和参数的选择可以根据电缆工程师的建议。需要说明的是,式(11)并不是绝对的,并且可以根据不同的实际情况进行调整,而这种调整不会影响本发明得实施方

式得算法的适用性。

[0161] 以 z 表示的深度在目标成本函数中以美元为单位进行考虑。

$$c(x) = \begin{cases} 37500 & \text{if } z \geq 0 \text{ km} \\ 25000 - 25000 \times |z| & \text{if } 0 \text{ km} > z \geq 2 \text{ km} \\ \frac{8000}{|z|+0.2} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

其中 x 是网状节点, $c(x)$ 是网状节点 x 处的每公里电缆成本。

[0162] 上述实施方式中的LAFM-I和LAFM-II算法针对所有可能的解运行,根据问题涉及单个延迟约束条件还是多个延迟约束条件,基于约7.48公里的分辨率,来确定斯坦纳节点的位置和电缆路径。为了进行比较,应用模拟退火(SA)算法来在单个延迟约束条件和多个延迟约束条件下并基于相同分辨率设计海底通信电缆的路径。

[0163] 模拟退火SA算法的示例细节可以在以下文章中找到:

P.J.Van Laarhoven等人的题为“Simulated annealing,”in Simulated Annealing:Theory and Applications.Springer,1987,pp.7-15的文章

D.Bertsimas等人的题为“Simulated annealing,”Statistical Science,vol.8, no.1,pp.10-15,1993的文章

P.C.Schuur的题为“Classification of acceptance criteria for the simulated annealing algorithm”Mathematics of Operations Research,vol.22,no.2, pp.266-275,1997的文章

J.Haddock等人的题为“Simulation optimization using simulated annealing,”Computers&Industrial Engineering,vol.22,no.4,pp.387-395,1992的文章

S.Kirkpatrick等人的题为“Optimization by simulated annealing,”Science,vol.220, no.4598,pp.671-680,1983的文章

在算法3中示出了在比较中应用的SA算法。

| |
|-----------|
| 算法3: SA算法 |
| 输入: |

给定拓扑以及 m 个分支单元 (BU) 位置 $B_0 := \{B_m(x_m, y_m)\}$, 其中 x_m 和 y_m 为BU B_m 的经度和纬度, 延迟限制, 初始温度 T_0 , 最终温度 T_f , 在温度 $T(k)$ 下的最大迭代次数 $L_M^{T(k)}$, 具有冷却时间 k 的温度衰减函数 $T(k)$, BU位置 L_{arc} 的最大变化

输出:

$B_{best} := \{B_m\}$, 其提供以最小的总成本连接所有节点同时满足所有延迟要求的路径

```

1:  根据给定的拓扑连接所有节点和 BU
2:   $k = 1, B_{current} = B_0$ 
3:  计算当前总成本 $C_{current}$ ;
4:  while  $T(k) > T_f$  do
5:    for  $i = 1, 2, \dots, L_M^{T(k)}$  do
6:      for  $j = 1, 2, \dots, m$  do
7:         $\alpha \sim U(-1, 1), \beta \sim U(-1, 1)$ 
8:         $x_m = x_m + \alpha \cdot L_{arc}$ 
9:         $y_m = y_m + \beta \cdot L_{arc}$ 
10:     end for
11:     根据给定的拓扑连接所有节点和 BU;
12:     if 所有的路径都满足延迟要求 then
13:        $B_{new} := \{B_m(x_m, y_m)\}$ 
14:       计算新的总成本 $C_{new}$ 
15:       if  $C_{new} < C_{current}$  then
16:          $C_{current} = C_{new}, B_{current} = B_{new}$ 
17:         if  $C_{new} < C_{best}$  then
18:            $C_{best} = C_{new}, B_{best} = B_{new}$ 
19:         end if
20:       else
21:          $\alpha \sim U(0, 1)$ 
22:         if  $\alpha < e^{-(C_{new} - C_{current})/T(I)}$  then
23:            $C_{current} = C_{new}, B_{current} = B_{new}$ 
24:         else
25:            $B_{new} = B_{current}$ 
26:         end if
27:       end if
28:     end if
29:   end for
30:    $k = k + 1$ 
31: end while
32: return  $B_{best}$ 

```

[0164] 更详细地,为了进行比较,应用模拟退火来在延迟要求下优化海底通信电缆的路径。在给定拓扑的前提下,SA用于获取分支单元的位置 $B_0, B_0 := \{B_m(x_m, y_m)\} : m = 1, 2, \dots, N_b$, 其中 x_m 和 y_m 分别是第 m 个分支单元的经度和纬度。

[0165] SA是一种技术,其模拟加热材料然后缓慢降低温度以减少缺陷的物理过程,这导致系统落入最小能量状态。Kirkpatrick等人的文章(在以上引用的)表明,系统能量可以对某些组合优化问题(例如,旅行推销员问题)的成本函数进行建模,其中寻求最低成本等同于寻求最低能量。因此,SA算法是在Metropolis算法的基础上开发的,并且用于优化问题。在第 i 次迭代中,根据提供更好解决方案趋势的 x_i 的邻域的分布,从当前的解 x_i 生成新解

x_{i+1} 。该分布由温度参数 T 参数化。当 T 较大时,该分布更加分散。在迭代中,由 k 为索引,温度根据退火时间表降低: $T=T_0>T_1>T_2>\dots>T_k>\dots$ 。在典型的应用中,如果更新的解 x_{i+1} 提高了目标函数的值,则算法会接受更新的解,但在一定的与温度相关概率,算法会接受使目标值变差的解。在正确的温度时间表下,接受使目标变差的解可以使算法避免陷入并保持在局部最小值并在全局范围(global)内探索更多可能的解。在一个示例中,退火时间表被设计为随着SA系统地进行而降低温度。随着算法的进行,系统温度逐渐降低,解的搜索范围缩小并趋向最小值。在某些类型的退火时间表和对于许多问题,该趋向得到有效保证。

[0166] 在一个示例中,在降低温度之前,温度在多次迭代中保持不变。使用了两个迭代索引:冷却时间索引 k 和执行索引 i 。终止温度表示为 T_f 。随着SA算法的进行,温度将随着冷却

时间 k 根据 $T_k = \frac{T_0}{1+\log(1+k)}$ 降低。在温度 $T(k)$ 下的最大迭代次数(由 i 索引)用 $L_M^{T(k)}$ 表示。

[0167] 在每次迭代中,随机选择一个分支单元并更新其经度和纬度。根据分支单元的新位置,计算当前总成本 C_{current} 和路径的长度(有延迟要求的)。如果所有路径都满足延迟要求限制,并且当前总成本 C_{current} 小于记录的最优解 B_{best} ,则更新最优解。否则,如果新的位置增加了总成本,这些位置将根据Metropolis标准以一定的概率 $P = e^{-\Delta/T(k)}$ 被接受,其中 $T(k)$ 是当前温度, Δ 是偏差,其等于以前的总成本减去新的总成本。在当前温度达到 T_f 时,SA停止。在SA算法执行过程中,温度降温越慢并且迭代次数越多,越有可能找到全局最优解。

[0168] 在本发明的一些实施中,对于单个约束条件的问题,由于LAFM-I被证明是最优的,因此其可以作为评估SA性能的基准。另一方面,对于多个约束条件的问题,对两种方法的结果进行了比较并选择较好的结果作为最终结果。该比较展示了具有两个延迟约束条件和四个延迟约束条件的两种情况,其中LAFM-II可以提供最优解并表明LAFM-II在这两种情况下优于SA。在这些实施方式中,基于LAFM算法的实验在具有2.00GHz英特尔酷睿i5 CPU的平台上运行,而基于SA的实验在具有2.60GHz英特尔酷睿i7-9750H CPU的平台上运行。

[0169] 具有一个延迟要求的示例

[0170] 在一个示例中,目标是找到连接图7的五个终端节点并且成本最低的电缆系统,其中成本限定为电缆系统的总成本,包括分支单元构建成本和电缆敷设成本,并且在节点A和节点E之间具有延迟要求($l_{AE} \leq 500$ 公里)。

[0171] 对于五个终端,共有十五个全斯坦纳拓扑。根据工程经验,避免了电缆的交叉敷设,因此图8A至图8E所示的五个拓扑可以涵盖用于这五个终端的所有实际拓扑。在图9A示出了寻找最佳SMT(具有拓扑I)的过程。该过程从 $\lambda=20$ 的可行但非最优解开始。由于 λ 在每次迭代时被更新,因此斯坦纳节点的位置移动以使节点A和节点E之间的路径的长度更接近500公里的电缆长度要求。LAFM-I在 $I > I_{\text{max}}$ ($I_{\text{max}} = 100$)时停止,其结果如图9B所示。对特定拓扑执行一次LAFM-I大约需要5.5小时。这仅适用于在节点A和节点E之间具有两个斯坦纳节点的拓扑I。但是,随着 λ 变化,节点A和节点E之间的斯坦纳节点的数量可能会发生变化。因此,有必要对不同拓扑(其在节点A和节点E之间具有不同数量的斯坦纳节点)应用LAFM-I算法。对于拓扑I,如果沿约束路径的分支单元的数量减少一个(由于一个斯坦纳节点与节点A或节点E重合),将需要考虑两种情况。在图10A和图10B示出了这两种情况的最佳结果。如果节点A和节点E沿路径直接地连接而没有分支单元,根据第四部分的讨论,将有两种情况,如图11A和图11B所示。这包括节点A和节点E直接地连接的所有退化拓扑:没有约束条件

的电缆系统由节点A、B、C、D组成,并且一电缆路径直接连接节点A和节点E,如图11A所示;没有约束条件的电缆系统由节点E、B、C、D组成,并且一电缆路径直接连接节点A和节点E,如图11B所示。

[0172] 对于图8B所示的拓扑II,对图12A至图12F所示的相应六种情况进行比较。图12A为在节点A和节点E之间的路径上具有三个分支单元的情况提供了最佳结果;图12B和图12C提供了两种情况的最佳结果,其中沿在节点A和节点E之间的路径有两个分支单元。随着其中一个斯坦纳节点被驱使与节点A重合(在第一种情况下)或与节点E重合(在第二种情况下),这种情况被简化为图12D至图12F所示的情况,从而提供了沿着在节点A和节点E之间的路径只有一个分支单元的最佳结果。对于沿着在节点A和节点E之间的路径没有分支单元的情况,该结果对应于图11A和图11B中的拓扑。

[0173] 对于图8C所示的拓扑III,图13A和图13B示出了沿受约束路径具有一个斯坦纳节点的退化拓扑。

[0174] 图8D和图8E所示的拓扑IV和拓扑V的最终最佳结果在图14A和图14B中示出。形成这两个拓扑的退化情况的结果可以在以上讨论的拓扑I至拓扑III的退化情况中找到。

[0175] 最后,表I包含了从五种可能的全斯坦纳拓扑中生成的结果。通过比较所有这些结果,在此示例获得的最佳结果为图14A所示的,其中总成本为961万美元并且两个分支单元位于(41.5887°N,4.8801°E)和(40.0425°N,7.2556°E)。

表I:不同的拓扑的SMT结果

| 拓扑 | 沿路径的分支单元(BU)数量 | l_{AE} (公里) | 系统中的分支单元(BU)数量 | 总长度(公里) | 总成本(百万美元) | 图 |
|-------|----------------|---------------|----------------|---------|-----------|-----|
| 拓扑I | 2 | 482.62 | 3 | 1781.09 | 9.72 | 9B |
| | 1 | 487.08 | 2 | 1769.95 | 10.13 | 10A |
| | 1 | 485.20 | 2 | 2006.86 | 11.08 | 10B |
| | 0 | 490.22 | 2 | 1876.54 | 9.96 | 11A |
| | 0 | 490.22 | 2 | 1900.71 | 10.54 | 11B |
| 拓扑II | 3 | 488.87 | 3 | 1900.84 | 11.32 | 12A |
| | 2 | 494.76 | 2 | 2450.20 | 11.17 | 12B |
| | 2 | 485.20 | 2 | 2006.86 | 10.68 | 12C |
| | 1 | 498.43 | 1 | 2565.55 | 10.54 | 12D |
| | 1 | 488.21 | 1 | 2228.17 | 10.33 | 12E |
| | 1 | 473.98 | 1 | 2179.89 | 10.04 | 12F |
| 拓扑III | 1 | 485.20 | 1 | 1802.11 | 10.26 | 13A |
| | 0 | 490.22 | 0 | 1906.79 | 9.75 | 13B |
| 拓扑IV | 1 | 446.69 | 2 | 1670.37 | 9.61 | 8D |
| 拓扑V | 1 | 482.89 | 1 | 1950.38 | 9.67 | 8E |

[0176] 多个延迟要求

[0177] 在一些示例中,LAFM-II被应用于解决具有多个约束条件的电缆系统的优化问题,并且对其性能与SA的性能进行了比较。

[0178] 在一个示例中,目标是找到一棵成本最低的斯坦纳树,其连接五个终端节点,满足

在两对节点(A,E)和(B,C)之间的两个延迟要求,并且约束条件分别为 $l_{A,E} \leq 450$ 公里和 $l_{B,C} \leq 510$ 公里。

[0179] 对于多个延迟要求的问题,这些终端可能的拓扑更容易排除,因此简化了拓扑的选择过程并减少了计算的量。对于图8A至图8E所示的五个全斯坦纳拓扑,其最佳结果是从图8D或图8E中的拓扑生成的。

[0180] 在图15B示出了基于图8D的拓扑得到最优解的过程。LAFM-II从一个可行但不是最优的解开始,其中 $\lambda_1 = 10$ 和 $\lambda_2 = 10$ 。然后, λ_1 和 λ_2 在每次迭代中根据公式(8)进行更新。在 $\lambda_1 = 0.735$ 和 $\lambda_2 = 0$ 时,LAFM-II停止。在节点A和节点E之间的电缆路径的长度为446.699公里,这可以被视为与所需长度相同(考虑到7.48公里的分辨率)。在节点B和节点C之间的电缆路径的长度为464.433公里,满足 $\lambda_2 = 0$ 的要求。该解被认为是近似最优解($G_{1,u} = 0$),其总成本为961万美元,总长度为1670.373公里。对此拓扑执行LAFM-II大约需要4.5小时。在图15A示出了基于图8E的拓扑得到最优解的过程。LAFM-II在 $I > i_{\max}$ ($I_{\max} = 100$)时停止,其总成本为1083万美元,总长度为1873.13公里。对此拓扑执行LAFM-II大约需要6.5小时。

[0181] 经过比较,这两个受约束问题的最终结果是基于图8D中的拓扑的结果,其如图15C所示,其中两个分支单元分别位于(41.5887°N,4.8801°E)和(40.0425°N,7.2556°E)。表II示出了近似最优解的细节。

表II:具有两个约束条件的最终SMT结果

| 拓扑 | 要求 | 受约束的长度 | λ_s | 分支单元(BU)数量 | 总长度(公里) | 总成本(百万美元) | 图 |
|-----|--|--|--|------------|---------|-----------|-----|
| 拓扑V | $l_{AE} \leq 450 \text{ km}$ $l_{BD} \leq 510 \text{ km}$ | $l_{AE} = 446.69 \text{ km}$ $l_{BD} = 464.43 \text{ km}$ | $\lambda_1 = 0.735$ $\lambda_2 = 0$ | 2 | 1670.37 | 9.61 | 15C |

[0182] 在另一个示例中,目标是找到一棵成本最低的斯坦纳树,其连接这五个终端节点,满足四对节点(A,E),(A,B),(B,C)和(B,D)之间的延迟要求,并且约束条件分别为 $l_{A,E} \leq 450$ 公里, $l_{A,B} \leq 500$ 公里、 $l_{B,C} \leq 500$ 公里和 $l_{B,D} \leq 700$ 公里。在排除明显不能满足约束条件的拓扑后,发现了图8D所示的拓扑提供了满足约束条件并实现了最短长度(在所提出的算法考虑的解决方案)的解。LAFM-II的性能取决于初始值。在此示例中, λ 的值被初始化为 $\lambda_1 = 10$, $\lambda_2 = 10$, $\lambda_3 = 10$, $\lambda_4 = 10$ 然后根据公式(9)更新。在 $\lambda_1 = 5.686$, $\lambda_2 = 0$, $\lambda_3 = 4.102$, $\lambda_4 = 1.068$ 时,LAFM-II停止,得到近似最优解($G_{1,u} = 0$),其总长度为1682.75公里并且总成本为1018万美元。最终结果如图16和表III所示,其中三个分支单元分别位于(42.3677°N,5.5849°E)、(40.2236°N,7.7463°E)和(39.3126°N,7.8643°E)。受约束路径的长度 $l_{A,E}$, $l_{B,C}$ 和 $l_{B,D}$ 大体等于要求(在由分辨率限制的范围内)。

表III:具有四个约束条件的最终SMT结果

| 拓扑 | 要求 | 受约束的长度 | λ_s | 分支单元(BU)数量 | 总长度(公里) | 总成本(百万美元) | 图 |
|------|--|--|--|------------|---------|-----------|----|
| 拓扑IV | $l_{AE} \leq 450 \text{ km}$ $l_{AB} \leq 500 \text{ km}$ $l_{BC} \leq 500 \text{ km}$ $l_{BD} \leq 700 \text{ km}$ | $l_{AE} = 445.26 \text{ km}$ $l_{AB} = 416.92 \text{ km}$ $l_{BC} = 500.46 \text{ km}$ $l_{BD} = 698.78 \text{ km}$ | $\lambda_1 = 5.686$ $\lambda_2 = 0$ $\lambda_3 = 4.102$ $\lambda_4 = 1.068$ | 3 | 1682.75 | 10.18 | 16 |

[0183] 与SA的比较

[0184] 为了进行比较,在上述LAFM(LAFM-I,LAFM-II)实现的各种延迟要求下,SA算法被应用于设计海底通信电缆的路径。SA是一种用于逼近给定函数的全局最优值的概率技术。具体来说,它提供了在大型搜索空间中对全局最优解的近似。对于在固定时间内找到近似的全局最优值比找到精确的局部最优值更重要的问题,SA可用于精确算法,例如梯度下降或分支定界。SA已用于在广泛的解决方案空间和NP困难组合问题中提供解决方案。在电缆路径规划背景下,在X.Wang等人在题为“Submarine cable path planning based on weight selection of design considerations”,IEEE Access,vol.9,pp.123 847-123860,2021的文章中,SA已被用于获得比电缆专家人工设计的真实世界路径更好的电缆路径。由于在具有十或几十亿个节点的巨大离散网状网络中寻找多个分支单元的最优位置的问题是NP困难问题,为了缩短获得解决方案的时间,应用SA来寻找最优解并且与LAFM(LAFM-I,LAFM-II)获得的结果进行比较。

[0185] 表IV提供了在比较中的SA的参数设置。表V示出了SA在比较中获得的解(在图8D所示的给定拓扑的一个、两个和四个约束条件下)。

表IV:SA的参数设置

| | |
|------------|-------------------------------------|
| 初始温度 T_0 | 500 |
| 退火温度 T_k | $T_k = \frac{T_0}{1 + \log(1 + k)}$ |
| 最终温度 T_f | 0 |

表V:在不同延迟约束条件下的SA结果

| 延迟要求 | 总长度 (公里) | 总成本 (百万美元) | 受约束的长度 | 运行时间 (秒) |
|--|-------------|---------------|--|----------|
| $l_{AE} \leq 500 \text{ km}$ | 1689.48 | 10.32 | $l_{AE} = 478.86 \text{ km}$ | 74772 |
| $l_{AE} \leq 450 \text{ km}$ $l_{BC} \leq 510 \text{ km}$ | 1744.68 | 9.68 | $l_{AE} = 441.19 \text{ km}$ $l_{BC} = 509.67 \text{ km}$ | 69773 |
| $l_{AE} \leq 450 \text{ km}$ $l_{AB} \leq 500 \text{ km}$ $l_{BC} \leq 500 \text{ km}$ $l_{BD} \leq 700 \text{ km}$ | 1798.07 | 10.70 | $l_{AE} = 442.21 \text{ km}$ $l_{AB} = 406.69 \text{ km}$ $l_{BC} = 498.88 \text{ km}$ $l_{BD} = 670.31 \text{ km}$ | 92113 |

[0186] 对于SA,具有一个延迟约束的问题的总成本和长度分别为1032万美元和1689.48公里。如上所述,LAFM-I获得的总成本和长度分别为961万美元和1670.37公里。由于LAFM-I是最优的,因此SA不能比LAFM-I表现更好。对于具有两个延迟约束的示例,SA获得的总成本和总长度分别为968万美元和1744.68公里,而LAFM-II找到了最优解。对于四个延迟约束的情况,SA获得的总成本和长度分别为1070万美元和1798.07公里,这再次差于LAFM-II获得的最优结果。

[0187] 如表V所示,对于每个示例,SA的运行时间在20小时至26小时的范围内。LAFM-I和LAFM-II的运行时间取决于的初始值和 λ 的更新策略。对于上述示例,LAFM方法的平均运行时间在4.5小时至6.5小时范围内,其明显短于SA的运行时间。

[0188] 通过上述对LAFM和SA在结果的质量和运行时间方面进行比较,可以看出,在具有延迟约束要求的海底通信电缆网络优化方面,LAFM方法总体上优于SA方法。

[0189] 本发明的上述实施方式提供了不同的优点和独特特征。在一些实施方式中,提供

了一种新的方法(和相关的系统),其用于解决具有主干分支拓扑的电缆系统的延迟感知优化问题。本发明的一些实施方式可以被认为是US16/265,337(授权为US10805207B2)中的教导的改进,其中US16/265,337公开了用于确定基础设施链路网络的最优路径布置的系统和方法,但其没有考虑延迟约束并且因此不能用于解决具有主干分支拓扑的电缆系统的延迟感知优化。一些实施方式提供了用于主干分支海底通信电缆网络的优化电缆路径规划解决方案,其在受制于一个或多个指定节点对之间的延时约束的情况下使与深度和节点数有关的成本函数最小化。在一些实施方式中,将具有主干分支拓扑的电缆系统的总构造成本最小化的问题被看作SMT问题。一些实施方式还考虑指定节点对之间的延迟约束要求。在一些实施方式中,提供了一种方法,称为拉格朗日快速行进(LAFM)方法,其用于在3D空间中不规则2D流形上解决SMT问题,其中对连接给定的一组节点对中的一对节点的每条电缆的总长度进行约束。在一些实施方式中,基于LAFM方法,提供了不同的LAFM算法,包括对单个约束条件问题求解的LAFM-I算法和对多个约束条件问题求解的LAFM-II算法。在一些实施方式中,LAFM-I算法为单个约束条件问题(对于给定的数据分辨率)提供最优解而LAFM-II算法为涉及多个延迟约束的问题提供具有可证明边界的优质可行的解。在一些实施方式中,LAFM-II可以实现在边界之间零间隙的最优解。在一些实施方式中,LAFM-I或LAFM-II和SA算法被应用在几个真实的场景中。在这些场景中,LAFM结果(包括LAFM-II结果)是最优的,以使得它们可以作为SA结果的基准。在一些实施方式中,在LAFM-II边界之间的差距很大的情况下,SA具有进一步的潜在好处。因此,在一些实施方式中,组合使用或选择性地使用LAFM-II和SA可能是有利的。LAFM可以优化具有延迟约束的主干分支树拓扑电缆系统。这已经针对由三角流形建模的地球表面的网络进行(其考虑了电缆系统的总成本,其中包括实际电缆和分支单元成本以及与位置相关的风险的度量。具体而言,一些实施方式的重点为使电缆系统的成本最小化,同时确保一些节点对之间的电缆长度满足延迟要求。一般来说,LAFM是在FMM的基础上寻找在区域内的任意一对位置(网格点)之间的最优电缆路径,进而确定斯坦纳节点的位置。在问题中的斯坦纳节点的数量可能会有所不同,同时会产生惩罚(成本),并且它们的度数可能会被限制为三。已经证明,LAFM一般可以为具有一个延迟约束的电缆系统找到最优解并为具有多个延迟约束的电缆系统找到可行的解。除了作为最优成本解决方案的上限的可行解决方案之外,也提供了最优成本解决方案的下限。已经证明,LAFM-II可以为具有多个延迟约束的问题提供具有可证明边界的解决方案。已经证明,可以找到最佳解决方案(例如,在边界之间的间隙为零),例如,对于具有两个和四个延迟约束的示例。LAFM方法一般优于SA方法。在某些情况下,当LAFM-II提供的结果不是最优时,LAFM-II和SA的组合(例如,通过将LAFM-II的结果用于SA算法)可以提供进一步的改进。本领域的技术人员将理解,本发明的各种实施方式可具有此处未具体描述的一个或多个优点。

[0190] 示例系统

[0191] 图18示出了示例性数据处理系统1800,其可以用于实施本发明的计算机实现方法的实施方式的至少一部分。数据处理系统1800一般包括用于接收、存储和执行适当的计算机指令、命令或代码所必需的适当部件。数据处理系统1800的主要部件是处理器1802和存储器1804。处理器1802可以包括以下一个或多个:一个或多个中央处理器、一个或多个微控制器单元、一个或多个图形处理单元、一个或多个控制器、一个或多个逻辑电路、一个或多个树莓派芯片、一个或多个数字信号处理器(DSP)、一个或多个专用集成电路(ASIC)、一个

或多个现场可编程门阵列 (FPGA) 和/或被配置为解释和/或执行程序指令和/或处理信号和/或信息和/或数据的任何其他一个或多个数字或模拟电路。存储器1804可以包括一个或多个易失性存储器 (例如RAM、DRAM、SRAM等)、一个或多个非易失性存储器 (例如ROM、PROM、EPROM、EEPROM、FRAM、MRAM、FLASH、SSD、NAND和NVDIMM等), 或其任何组合。适当的计算机指令、命令、代码、信息和/或数据 (包括用于实现本发明的计算机实现方法实施方式的至少一部分的指令) 可以存储在存储器1804中。可选地, 数据处理系统1800还包括一个或多个输入装置1806。输入装置1806可以包括以下一个或多个: 键盘、鼠标、手写笔、图像扫描仪、麦克风、触觉/触摸输入装置 (例如, 触敏屏幕)、图像/视频输入装置 (例如, 照相机) 等。输入装置1806可用于接收与对本发明的模型和/或算法的输入相关联的用户输入。例如, 用户输入可以包括用于LAFM-I模型的输入、用于LAFM2模型的输入、地理位置的选择 (与地形相关联)、斯坦纳拓扑的选择。可选地, 数据处理系统1800还包括一个或多个输出装置1808。输出装置1808可以包括以下一个或多个: 显示器 (例如, 监视器、屏幕、投影仪等)、扬声器、磁盘驱动器、耳机、耳麦、打印机、增材制造机 (例如3D打印机) 等。显示器可以包括LCD显示器、LED/OLED显示器或任何其他可能是或可能不是触摸敏感的合适的显示器。显示器可以显示本发明计算机实现方法实施方式的判断结果。数据处理系统1800还可以包括一个或多个磁盘驱动器1812, 其可以包括以下一个或多个: 固态驱动器、硬盘驱动器、光盘驱动器、闪存驱动器、磁带驱动器等。合适的操作系统可以安装在数据处理系统1800, 例如, 在磁盘驱动器1812或存储器1804中。存储器1804和磁盘驱动器1812可以由处理器1802操作。可选地, 数据处理系统1800还包括通信装置1810, 其用于建立与一个或多个其他计算装置 (例如, 服务器、个人计算机、终端、平板电脑、电话、手表、IoT装置或其他无线或手持式计算装置) 的一个或多个通信链路 (未显示)。通信装置1810可以包括以下一个或多个: 调制解调器、网络接口卡 (NIC)、集成网络接口、近场通信收发器、ZigBee收发器、Wi-Fi收发器、蓝牙®收发器、射频收发器、光学端口、红外端口、USB连接器或其他有线或无线通信接口。收发器可以由一个或多个装置 (集成的发射器和接收器、单独的发射器和接收器等) 实现。通信链路可以是有线的或无线的, 其用于传送命令、指令、信息和/或数据。在一个示例中, 处理器1802、存储器1804和可选的输入装置1806、输出装置1808、通信装置1810和磁盘驱动器1812通过总线、外围组件互连 (PCI), 例如外围组件互连高速 (PCI Express)、通用串行总线 (USB)、光学总线或其他类似的总线结构直接或间接连接。在一个实施方式中, 这些部件中的一些可以通过诸如因特网或云计算网络的网络连接。本领域技术人员将理解, 图18所示的数据处理系统1800仅仅是示例性的, 并且其他实施方式中的数据处理系统可以具有不同的配置 (例如, 具有额外的部件、更少的部件、不同的部件等)。信息处理系统1800可以是专用的信息处理系统或非专用的信息处理系统。

[0192] 尽管不是必需的, 但是参考附图描述的实施方式可以实现为应用程序编程接口 (API) 或开发者使用的一系列库, 或者可以包括在另一个软件应用程序中, 例如终端或计算机操作系统或便携式计算设备操作系统。通常, 由于程序模块包括有助于执行特定功能的例程、程序、对象、部件和数据文件, 因此本领域技术人员将理解, 软件应用程序的功能可以分布在多个例程、对象和/或部件, 以实现本文所需的相同功能。

[0193] 还将理解, 在本发明的方法和系统完全地由计算系统实现或部分地由计算系统实现的情况下, 可以使用任何适当的计算系统架构。这将包括独立计算机、网络计算机、专用

或非专用硬件设备。在使用术语“计算系统”、“计算装置”和“计算设备”的情况下,这些术语旨在包括(但不限于)能够实现所述功能的计算机或信息处理硬件的任何适当布置。

[0194] 本领域的技术人员将理解,可以对如具体实施方式中所示的本发明进行许多变化和/或修改以提供本发明的其他实施方式。因此,所描述的本发明的实施方式在所有方面都应该被认为是说明性的而不是限制性的。

[0195] 例如,虽然上述实施方式着重于海底通信电缆网络,但是本发明可以可选地或附加地应用于其他基础设施链路网络,例如但不限于缆线(通信、电力、光、电等)网络、管/管道(用于输送流体或固体(例如,油、燃料、水、污水))网络、公共交通(铁路、公路、隧道、桥梁等)网络等,其可以布置在地下、地上、海中、海底或其任何组合。在一些实施方式中,本发明包括确定具有主干分支拓扑的基础设施链路网络的路径布置,然后根据确定的路径布置来构建该基础设施链路网络。

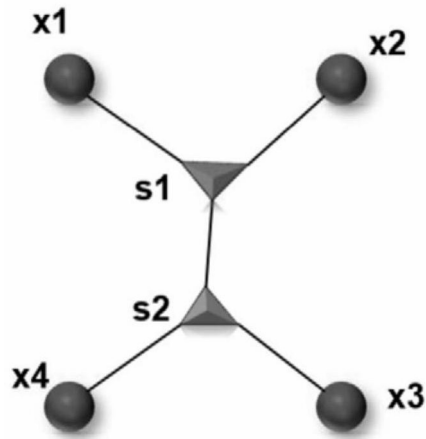


图1

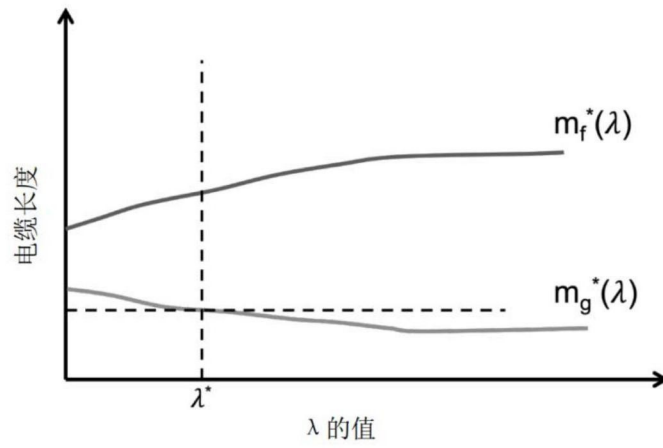


图2

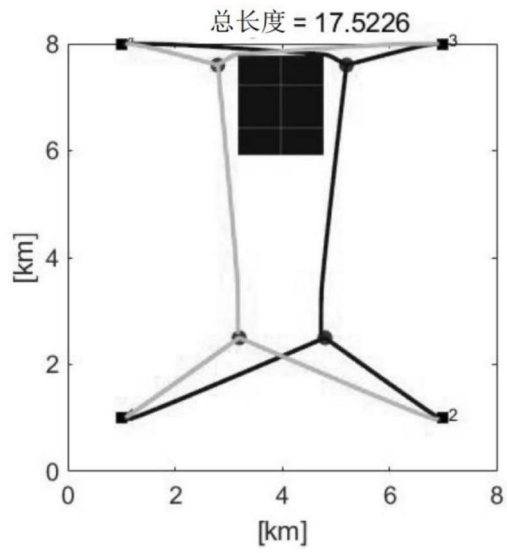


图3

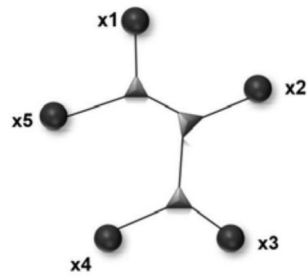


图4A

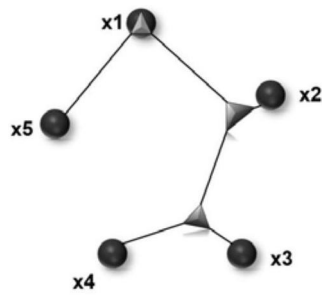


图4B

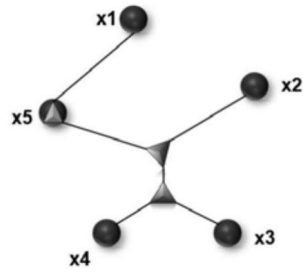


图4C

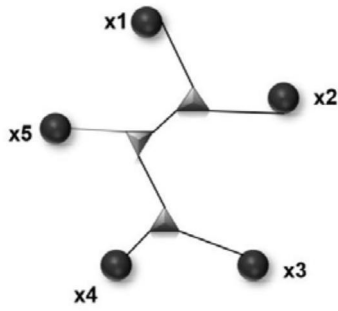


图5A

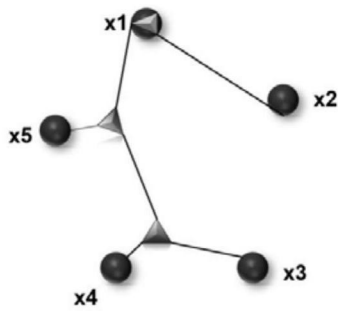


图5B

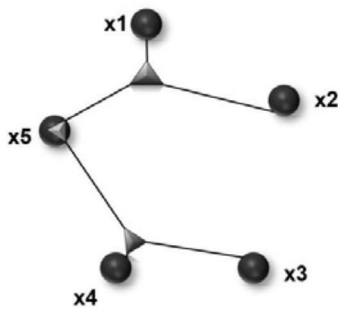


图5C

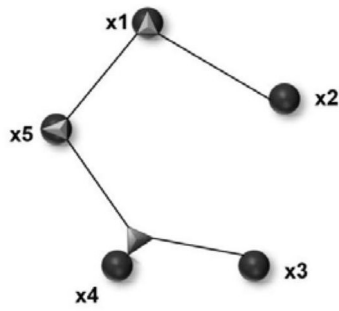


图5D

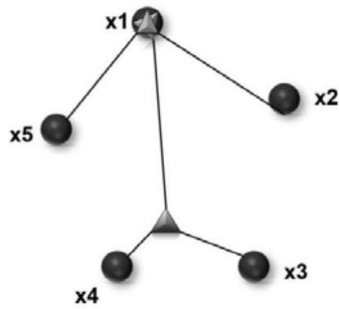


图5E

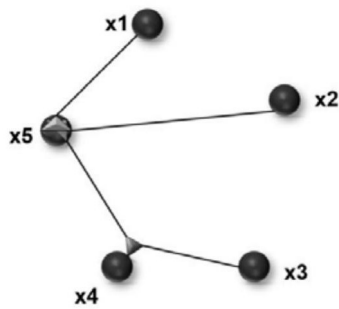


图5F

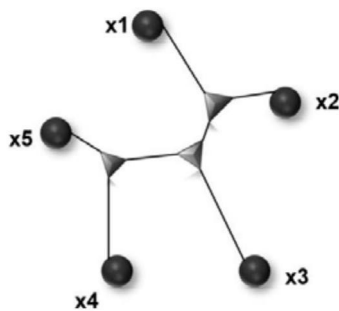


图6A

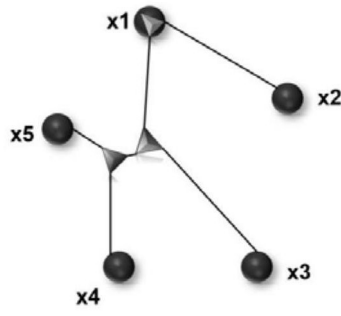


图6B

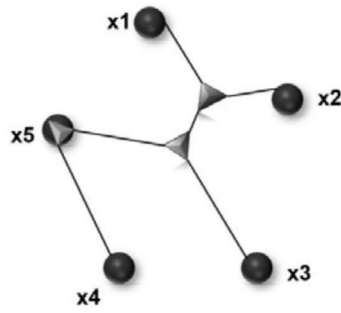


图6C

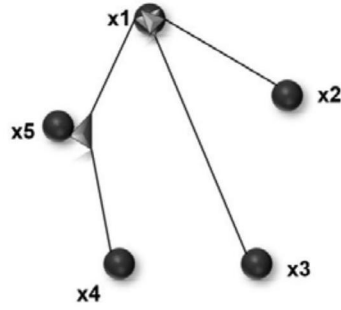


图6D

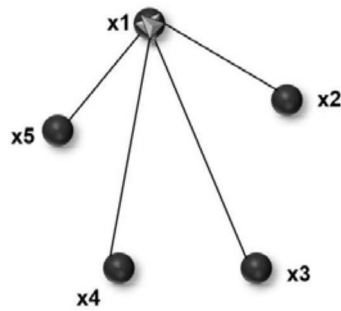


图6E

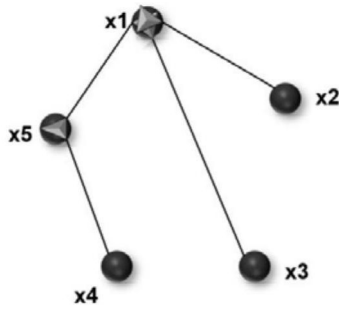


图6F

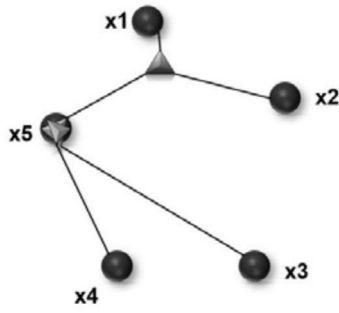


图6G

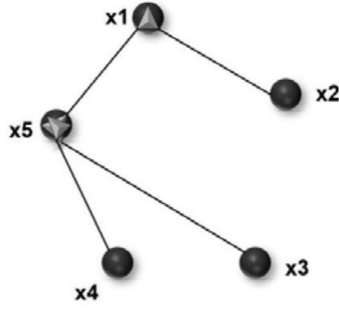


图6H

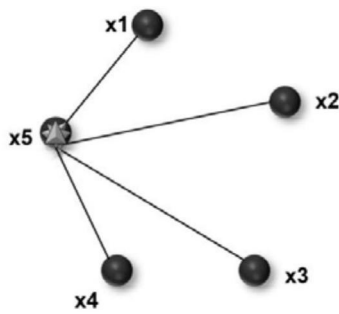


图6I

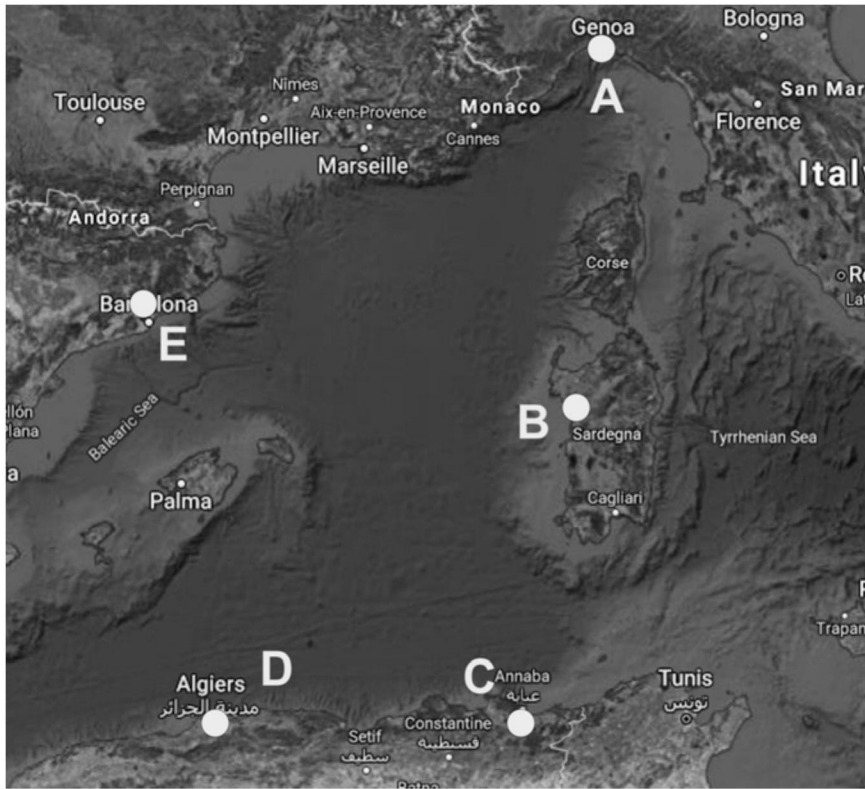


图7

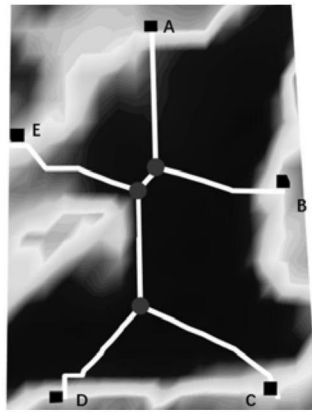


图8A

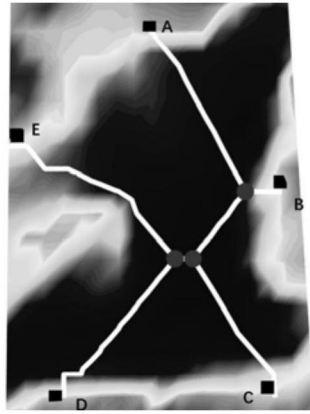


图8B

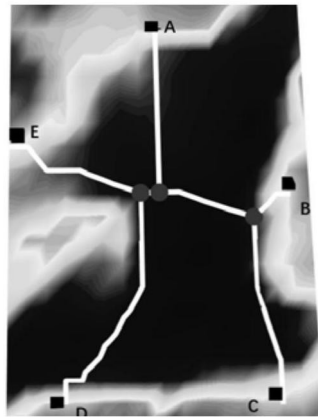


图8C

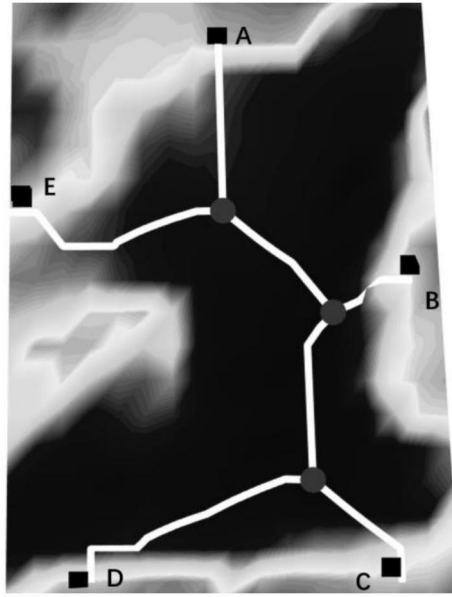


图8D

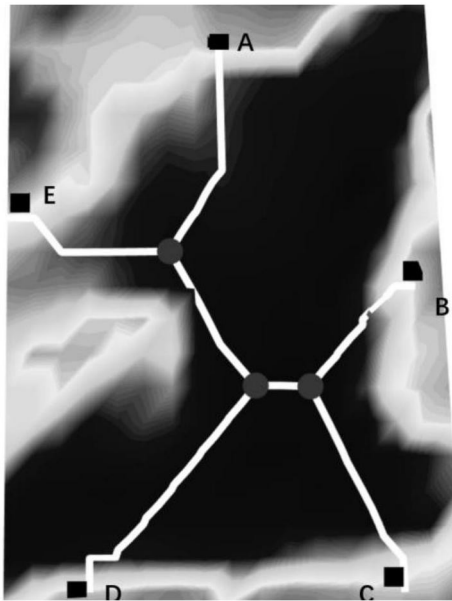


图8E

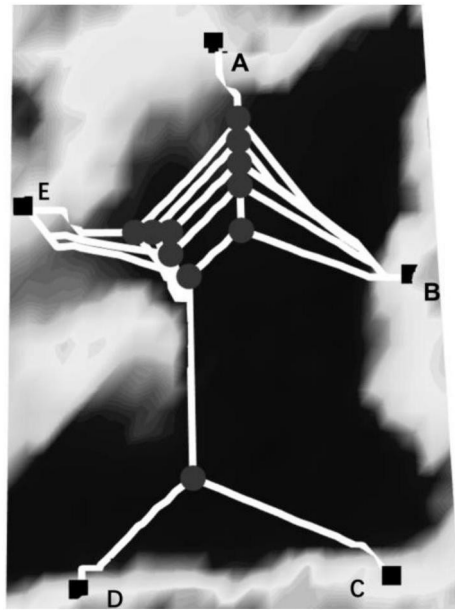


图9A

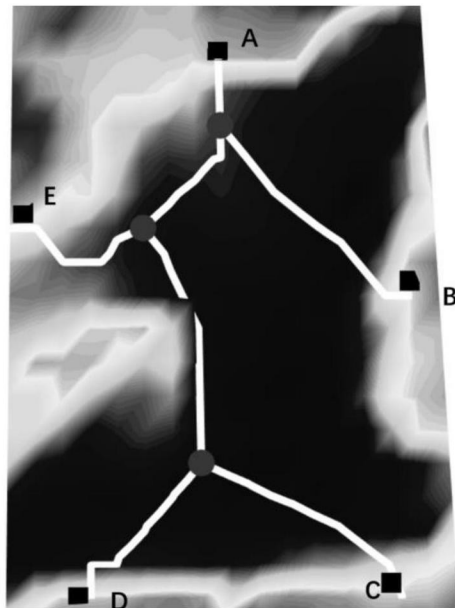


图9B

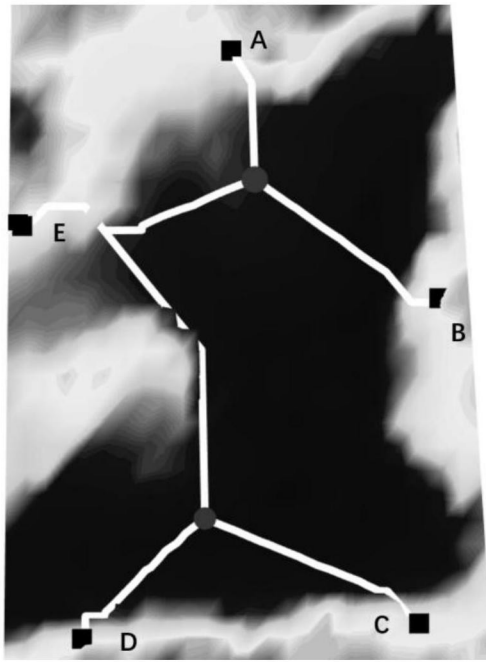


图10A

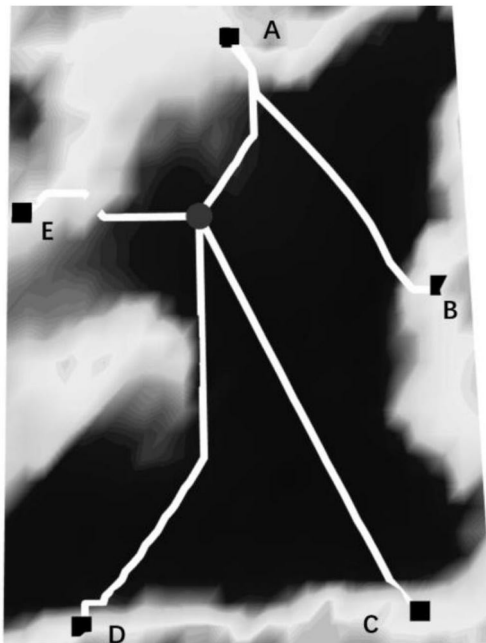


图10B

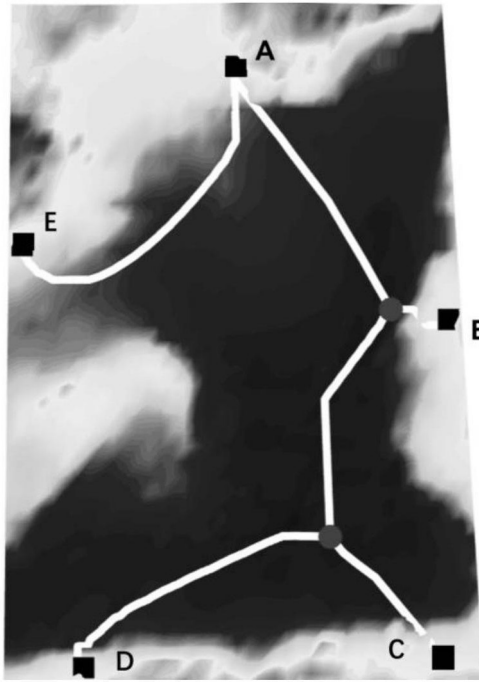


图11A

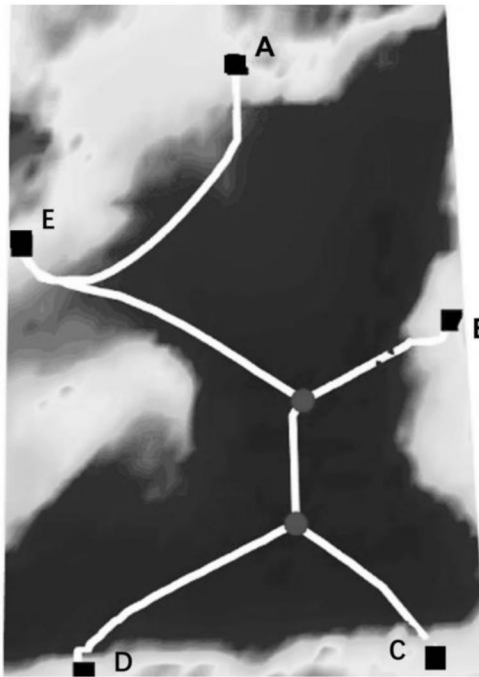


图11B

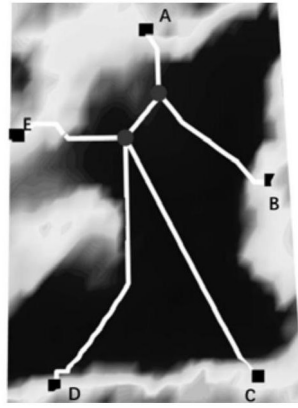


图12A

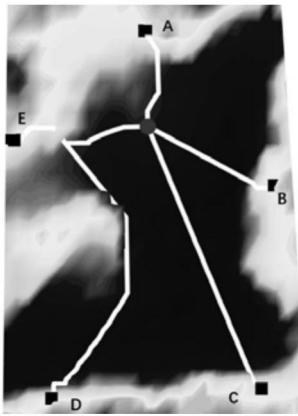


图12B

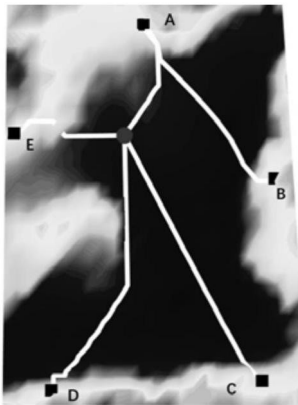


图12C

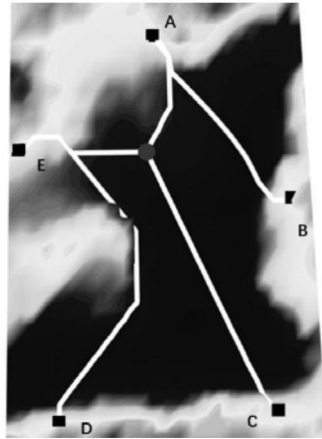


图12D

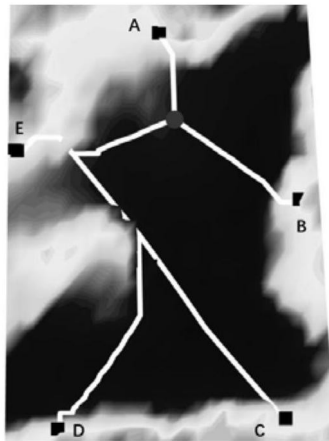


图12E

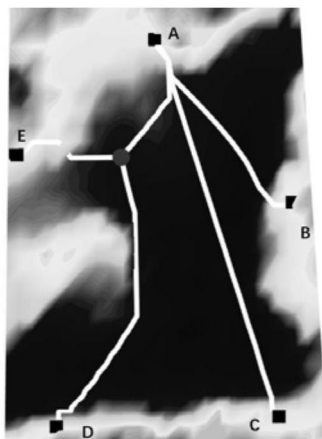


图12F

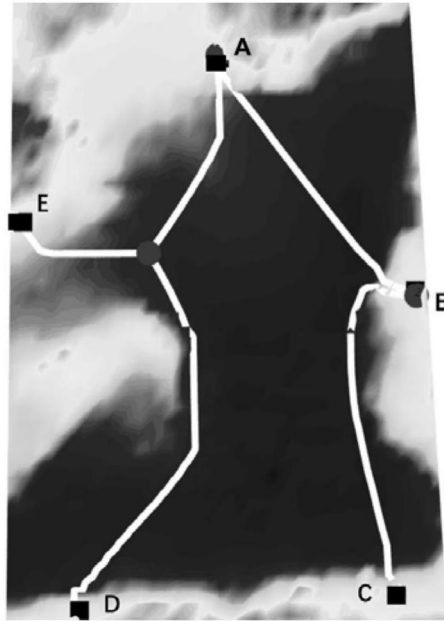


图13A



图13B

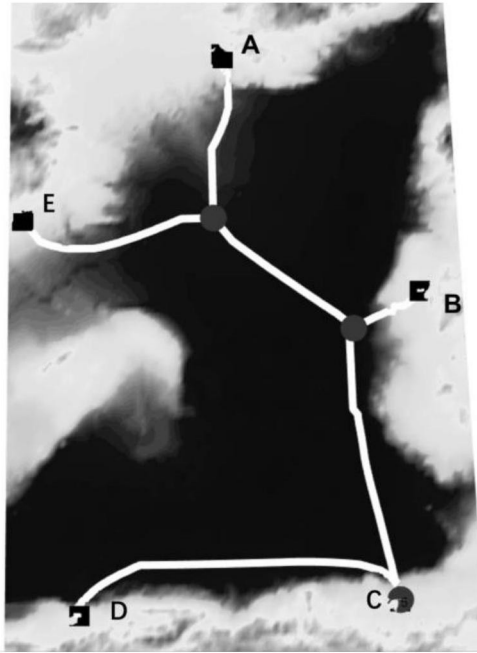


图14A

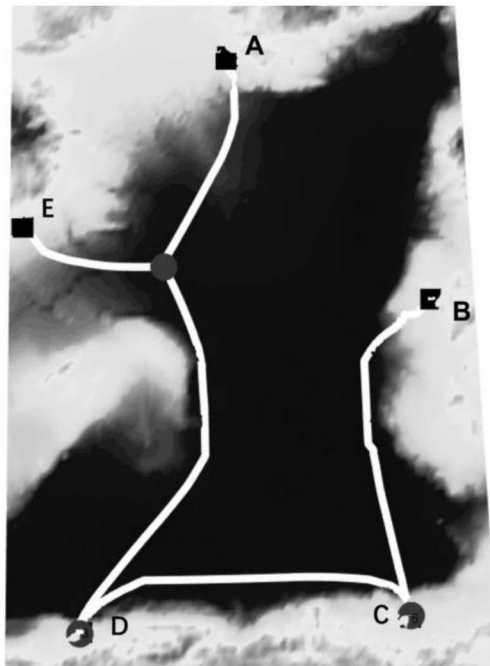


图14B

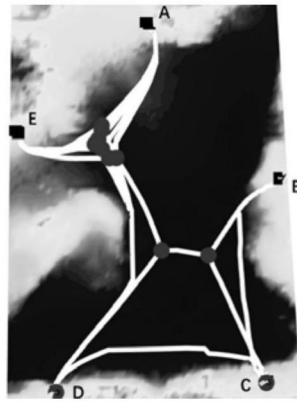


图15A

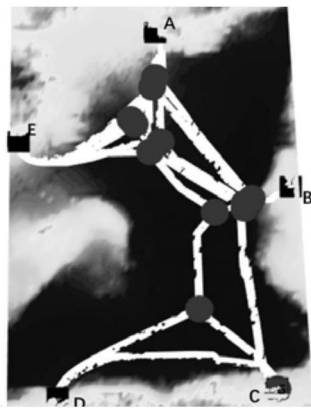


图15B

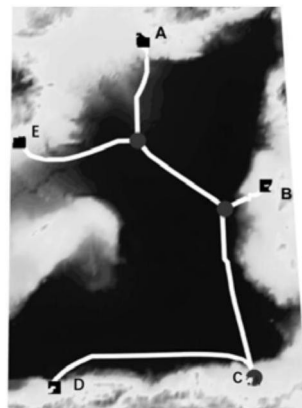


图15C

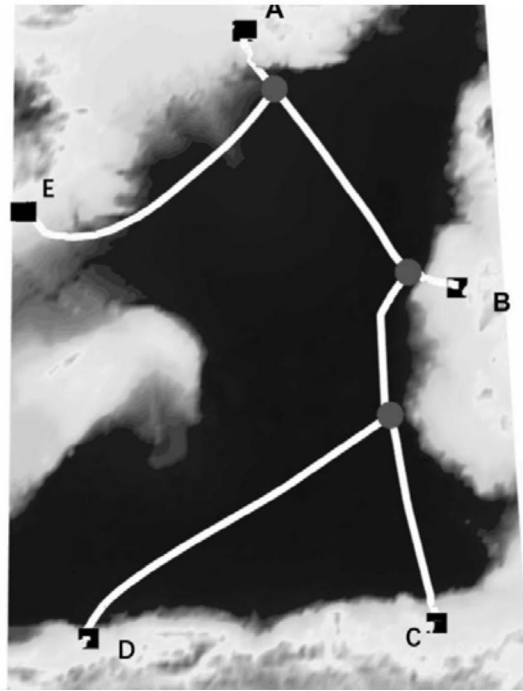


图16

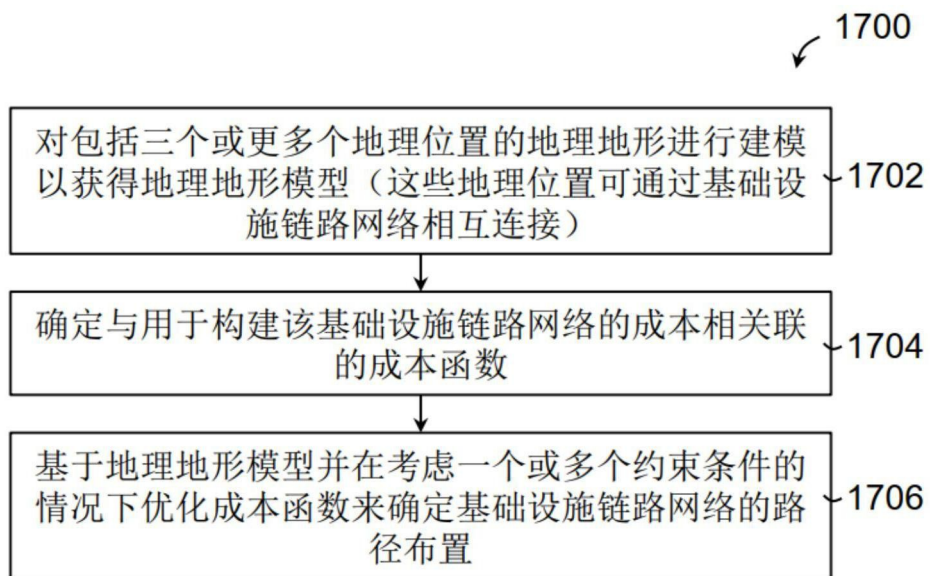


图17



图18