

引用本文:王小瑞,徐宏,何红杰. 深空光通信网中定向路由算法[J]. 光通信技术,2022,46(5):50-54.

深空光通信网中定向路由算法

王小瑞,徐宏,何红杰

(郑州轻工业大学 计算机与通信工程学院,郑州 450000)

摘要:为了尽量节省深空光网络节点的能量,提出定向洪泛路由算法(DFRA),该算法根据深空光通信对角度和方位的敏感特性,基于多接口的深空节点模型,将空分复用和频分复用充分结合,支持定向的多跳路由传输,路由寻路的过程中只有部分节点参与。仿真分析结果表明:与传统洪泛路由算法(TFRA)相比,DFRA 能够避免 TFRA 存在的无方向性和盲目性的问题,更加节能,且网络传输时延和时延抖动等性能都优于 TFRA 方法。

关键词:深空通信;光通信;定向路由

中图分类号:TN929.12 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2022)05-0050-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.05.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Directional routing algorithm in deep space optical communication network

WANG Xiaorui, XU Hong, HE Hongjie

(School of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to save as much as possible of deep space optical network node energy, directional flood routing algorithm (DFRA), the algorithm is based on deep space optical communication is sensitive to angle and azimuth of features, based on the deep space node model of the interface, will air separation combination of reuse and frequency division multiplexing, supports the transfer of multiple hops routing orientation, in the process of the routing path finding only part of the nodes involved. The simulation results show that, compared with the traditional flood routing algorithm (TFRA), DFRA can avoid the non-directionality and blindness problems existing in TFRA, and is more energy efficient, and the performance of network transmission delay and delay jitter is better than TFRA.

Key words: deep space communication, optical communication, directional routing

0 引言

目前,探月计划的成功促进了我国未来深空探测的发展,许多国家对太阳系内各行星的探索也愈加深入,如何与其它行星间的探测器进行有效通信成为了一个至关重要的问题。一种可行的方案是在深空中部

署若干中继节点组成深空光通信网,通过中继转发,使得行星间探测器可以进行有效的数据传输^[1-4]。这些由中继节点组成的深空光通信网与空间光通信有相似之处,都具有激光通信的特点,但由于空间网络环境的不同,现有的网络路由技术很难直接应用于深空光网络中。因此,对深空光通信网的路由算法研究是十分必要的。

深空光网络路由设计面临的挑战有间断连通性、可变的长时延、不对称链路带宽、较高的误比特率以及节点能量有限。极远的传输距离要求系统具备高功率发射机和高灵敏度的接收机^[5-6]才能进行有效传输。因此,节点的能量绝大部分用于信号的传输和接收。深空光网络节点的能量有限,将极大的限制网络的生存时间。基于以上分析,在设计深空光通信网路由时,除了以上挑战之外,还应充分考虑激光通信的特点,

收稿日期:2021-09-30。

基金项目:河南省自然科学基金项目(批准号:212300410302)资助;博士启动基金项目(0131/13501050033)资助;河南省科技攻关项目(批准号:212102210554)资助;郑州市重大科技创新专项(No.2019CXZX0042)资助。

作者简介:王小瑞(1984—),女,博士,现于郑州轻工业大学计算机与通信工程学院任教,主要从事无线紫外光通信、空间光通信关键技术研究。2016年,获得河南省教育厅优秀科技成果奖二等奖;2019年,成为郑州泰恩科技有限公司特聘教授;2021年,主持河南省自然科学基金项目。



从而设计出更加有效、可靠的深空光通信网路由算法。

因此,本文根据深空光通信对角度和方位的敏感特性,并基于多接口的深空节点设计模型,将空分复用和频分复用充分结合,提出定向洪泛路由算法(DFRA)。

1 DFRA 描述

传统洪泛路由算法(TFRA)是一种广播式路由算法,具有路由实现简单的优点,适用的场合要求健壮性高。但是,TFRA 存在以下缺点^[7]:①盲目地使用网络资源,即洪泛时不考虑节点能量的可用情况。深空光网络中节点一般使用太阳能供电,但是由于到达深空节点的太阳能大小与节点离太阳的距离的平方成反比,当某些深空节点距离太阳较远时,光照环境较差,节点获得的能量很少。因此,当采用 TFRA 时,不论节点的能量如何都要传送数据包,不仅浪费网络资源,还影响了网络的连通性,同时降低了整个网络的生存性。②数据内爆的问题,即同一个数据包可能多次被一个节点接收到,从而导致网络中充斥了大量的无用报文,这对于深空网络节点中有限的存储空间来说,将造成严重的资源浪费,使得节点能量被严重消耗。

1.1 DFRA 定向路由由节点设计

本文为深空光网络中节点进行相应的设计,每个节点上配备多套收发设备,发射装备上配置有 6 个激光发射器,每个激光器的覆盖区域是一个扇形,且每个扇形的张角均为 60° ,接收装置是一个探测器。

首先,在每个节点进行邻居节点发现以后,节点间再通过定期的信息交换使每个节点清楚网络的拓扑结构。然后,在路由发现的过程中,探测器进行信道的探测和接收,通过探测某方向上信号的强弱来确定信号源的位置,从而调整探测器的角度接收信号。最后,通过信息分析,确定下一跳的位置后,选择合适的激光发射器发射信号,直到找到最终的目的节点。具体的实现过程如图 1 所示。源节点 S 的 6 个激光发射器被分成了 6 个扇形区域,每块区域的最远覆盖距离(即节点的最远传输距离)为 R ,且覆盖扇形区域的张角均为 60° 。若源节点 S 与目的节点 D 进行消息路由,首先源节点 S 会查找中间节点 A、B 和 C 的位置,并通过计算其与节点 A、B、C 的水平夹角,找到邻节点所处的覆盖区域。如果与源节点的水平夹角在 $\pm\pi/6$ 之内,那么就可以确定节点 C 处于源节点 S 的 1 号覆盖区,节点 A 和节点 B 分别处于源节点的 3 号和 6 号覆盖区;当确定了每个中间节点在源节点 S 的位置后,节点间通过信息交换,源节点 S 则知道节点 C 是目的

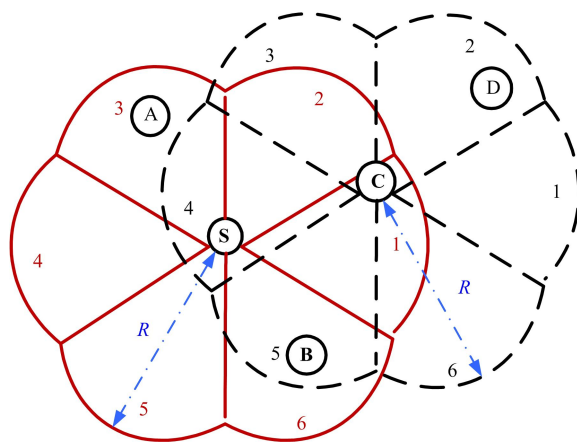


图 1 定向路由方法过程

点 D 的邻居节点,然后通过 1 号覆盖区的激光发射器向节点 C 发送信息。同样地,节点 C 通过 2 号覆盖区的激光器向目的节点 D 发送数据,即完成了源节点向目的节点的数据传输。

定向路由中的节点设计结合了激光通信对角度和方位敏感的特性,本文在进行节点设计时充分考虑了节点的方向性和方位性,设计了多个收发接口的节点模型。另外,随着深空光网络中通信节点的日益增加,当节点密度较大时,本节点模型还可以将空分复用和频分复用结合起来,即在不同方向上的节点选择不同波长的激光发射器进行信号的发射传输。基于多接口节点设计下的 DFRA,其优点可以有效地避免 TFRA 的无方向性、盲目性,降低网络中无用能量的消耗,使得网络生存周期得到延长。

1.2 DFRA 信道数学模型

深空光通信的工作方式为直视通信,直视通信的发射端之间不能存在障碍物,障碍物将阻碍光信号的传输(激光通信需要对准、捕获和跟踪)。激光直视链路几何模型如图 2 所示。其中, φ_1 是发射端光源 Tx 的发散角, φ_2 是接收端 Rx 的接收视场角, r_1 和 r_2 分别是发射端覆盖范围和接收端覆盖范围, V 为收发节点的覆盖重叠区。

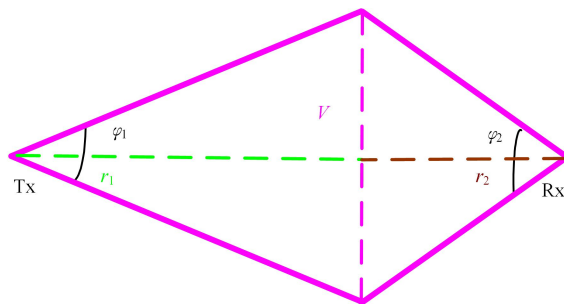


图 2 直视通信链路

王小瑞,徐宏,何红杰:深空光通信网中定向路由算法

在距离地球几十万千米到几百万千米的深空,不会有大气存在,此时的深空几乎接近真空。因此,进行深空光通信时,信号在传输的过程中不再受到大气湍流的影响。在深空星间光通信系统中,由激光器发射的信号光功率经过发射光学系统的衰减、发射天线增益、深空信道衰落、太阳风和日冕等背景噪声影响、跟踪误差衰减、接收光学系统衰减以及接收天线增益之后,由探测器接收到通信光功率,其接收功率^[8]表示为

$$P_R = P_T \eta_T \eta_R G_R G_T L_R (\lambda / 4\pi d)^2 \quad (1)$$

其中, P_R 和 P_T 分别是系统的接收功率和发射功率, η_R 是系统的接收效率, η_T 是系统的发射效率, G_R 和 G_T 分别是系统的接收增益和发射增益, L_R 为接收瞄准误差因子, L_T 为发射瞄准误差因子, λ 为通信波长, d 为通信距离。

2 仿真与性能分析

本文提出的 DFRA 是基于 NS2 仿真软件实现的。在进行该路由算法仿真之前,首先根据 1.2 节中深空光通信链路数学传输模型,建立深空光通信信道传输模型,并在 NS2 仿真软件中的 Two-Rayground 模型添加深空光通信链路传输模型;然后,进行仿真场景的配置,设置网络节点的个数、节点的坐标、节点与节点之间的跳数,节点的运动时间、速度、方向和目的坐标;最后,编辑分析仿真结果的应用文件(如吞吐量、时延和时延抖动等分析文件)。

2.1 仿真步骤

本文针对深空光通信的特性,路由寻路时采用一种定向洪泛路由请求机制,即 DFRA,其基本思想是源节点和中间节点分别计算自己到目的节点的方向,中间节点将数据定向地转发给朝着有利于目的节点方向的所有一跳节点,直到信息成功地发送给目的节点。主要的仿真步骤如下:

步骤一:网络初始化,初始化每个节点的初始能量,设置源节点和目的节点。

步骤二:源节点根据目的节点信息,首先确定源节点到目的节点之间的中间节点,然后源节点计算与下一跳的邻居节点的水平夹角并判断出自己的邻居节点均处的覆盖区域,选择对应覆盖区的激光器向中间邻居节点发送数据信息。

步骤三:中间邻居节点接收到源节点发送过来的数据信息,判断该数据是否已经被接收或者转发。如果是,丢弃该信息;否则,在缓存中添加该数据,并根据该数据信息,确定下一跳中间转发节点,且计算下

一跳转发节点所处的覆盖区,使用相应的激光发射器转发信息,直到目的节点收到来自源节点的数据信息。

步骤四:算法结束,保存仿真结果。

最后,根据 2 种算法的时延、时延抖动和吞吐量等分析文件对仿真结果进行分析。

2.2 仿真参数设置

NS2 中 10 节点网络拓扑图如图 3 所示。首先,在 NS2 仿真软件的仿真区域内配置 10 个节点,每个节点的初始能量均为 10 J;然后,在每个节点的发射装备配置 6 个激光发射器,且这 6 个激光发射器的覆盖的区域均为扇形,扇形的张角为 60° ,通信时可以选择较近方向的激光发射器发射信号,信道类型为直视通信。此外,每个节点还配置 1 个探测器进行信号的探测接收。具体仿真参数设置^[9]如表 1 所示。

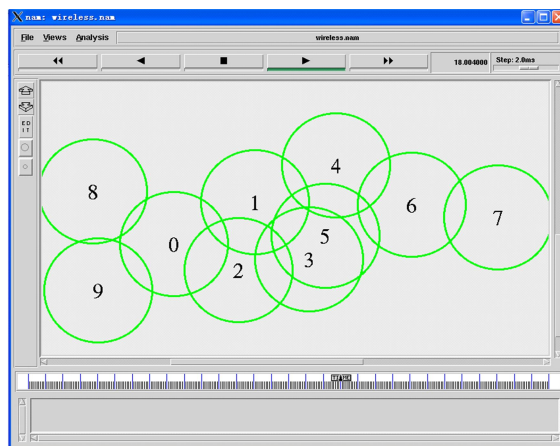


图 3 NS2 中 10 节点网络拓扑图

表 1 深空光网络仿真参数

参数	取值
比特率/(Mb·s ⁻¹)	2
波长/nm	1550
节点能量/J	10
发射天线孔径/cm	15
接收天线孔径/cm	15
发射效率	0.8
接收效率	0.8
发射器瞄准误差/rad	1.1
接收机瞄准误差/rad	1.1

2.3 性能分析

根据以上仿真参数设置,本文首先对比了 DFRA 与 TFRA 在不同仿真时间内的剩余能量,然后对不同跳数下 DFRA 的平均能量消耗进行分析,最后对 2 种算法的时延、时延抖动以及吞吐量进行仿真。

图 4 为 2 种算法平均剩余能量随着时间变化的

曲线图。可以看出,DFRA 比 TFRA 更节能。这是因为 TFRA 将消息广播给自身的所有邻居节点,然后邻居节点又将消息广播给自身的所有邻居节点,这样每个节点都参与了信息的传输,从而造成不必要的资源浪费;而 DFRA 中消息路由只发生在有利于目的节点方向的特定路由区域内,路由区域外的节点不接收消息,所以传输路径上的节点数减少。因此,数据包由相同的源节点传输到相同的目的节点时,采用 DFRA 比 TFRA 转发的次数少。显然,参与洪泛的节点越少,节点的平均剩余能量就越大,从而更加有效地节约网络资源。

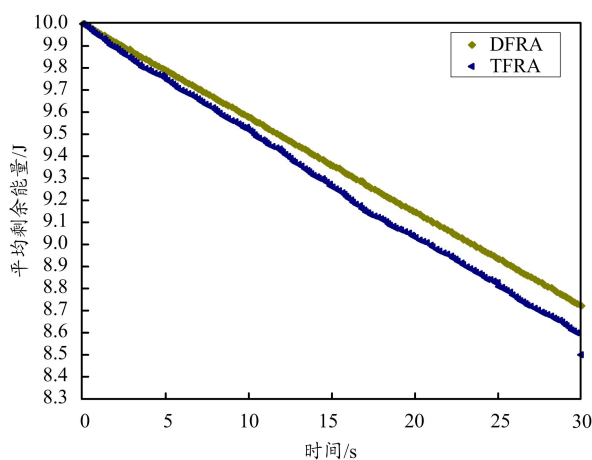


图4 2种算法平均剩余能量比较

深空光网络中节点的能量消耗主要包括发送、接收、空闲和休眠过程,其中数据发送过程中消耗的能量所占的比例最大。根据式(1)可知,深空光通信发送信号所消耗的能量与传输距离的平方成正比,所以要尽量减少发送距离,增加转发次数达到节能的目的。设能耗系数 ε_{amp} 与功率放大因子 E_{elec} 的取值分别为 $8.2(\text{pJ} \cdot \text{bity}^{-1})/\text{m}^2$ 和 50 nJ/bit ,且根据本节的仿真参数和拓扑设置,通过 $N_{\text{opt}} = \left\lfloor d \sqrt{\varepsilon_{\text{amp}} / 2E_{\text{elec}}} \right\rfloor$ [4] 计算得到最优跳数 $N_{\text{opt}}=5$ 。为此,文中对 DFRA 在 1 跳、5 跳和 9 跳通信时的平均能量消耗进行了仿真比较,如图 5 所示。可以看出,随着仿真时间的增加,节点的能量消耗也逐渐地增大。其中,1 跳通信的能量消耗是最大的,5 跳通信能量消耗最小。这主要是因为 1 跳通信时信号传输距离是最远的,因此需要的能量消耗最大;随着传输跳数的增加,中间节点的路由负荷和媒体接入控制层 (MAC) 负荷就会增加,这就是 9 跳通信的能量消耗大于 5 跳通信的原因。最优的跳数通信能够使网络中各节点的能量消耗最小,在仿真时间为 100 s 时,1 跳通信的能量消耗是 5 跳通信的 1.4 倍。通信跳数对通信

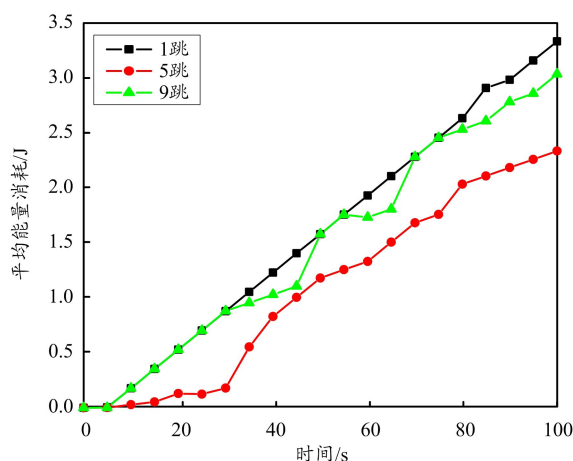


图5 不同跳数下DFRA的平均能量消耗

节点能量的消耗至关重要,在网络路由中,应选取最优的跳数进行通信,从而提高整个网络的生存时间。

图 6 为 2 种算法的时延比较图。TFRA 的时延明显高于 DFRA,约为 DFRA 最大时延的 1.4 倍。这是因为 TFRA 在传播消息的过程中所有的节点均采用广播的方式,相同情况下,源节点到达目的节点的跳数要比 DFRA 的多。为了降低碰撞概率,在 MAC 层每一跳都将会随机时延,随着跳数的增加,时延就会越大;而 DFRA 则采用定向路由方法,只有部分节点参与了信息的传递,从源节点到目的节点的跳数也相对地减少,端到端的时延就相应减少。

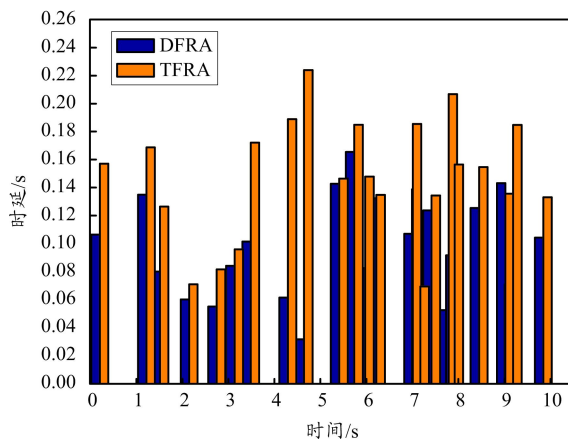


图6 2种算法时延比较

图 7 为 2 种算法的时延抖动比较图。可以看出,DFRA 的时延抖动变化较小,而 TFRA 的时延抖动相对波动较大,波动时延最大值是 DFRA 的 9 倍。这是因为多跳传输对时延抖动的影响,即跳数越多数据包之间碰撞的几率就越大,时延抖动就越大。

图 8 为 2 种算法的吞吐量比较图。可以看出,2 种算法的吞吐量在初始时达到最大,最后都趋于平稳,

王小瑞, 徐宏, 何红杰: 深空光通信网中定向路由算法

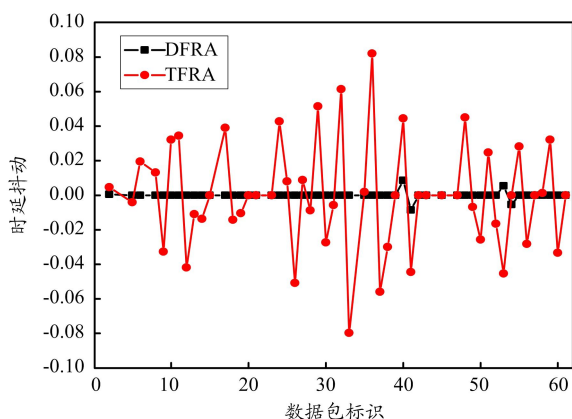


图7 2种算法时延抖动比较

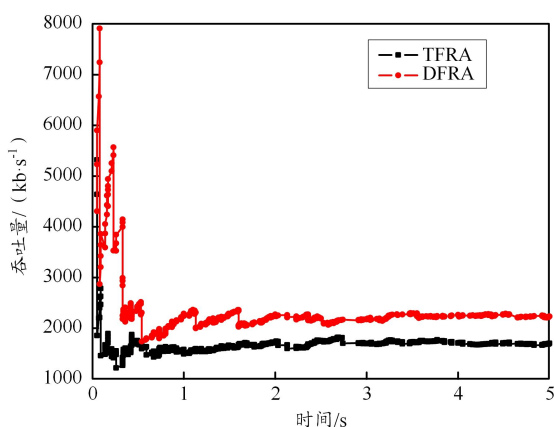


图8 2种算法吞吐量比较

DFRA 的吞吐量高于 TFRA, 其吞吐量提高了近 1 倍。这是因为 DFRA 的通信方式覆盖距离远, 可以通过最小的跳数到达目的节点, 参与数据包转发的节点少, 竞争信道的节点就少, 吞吐量就大。通过以上的仿真分析可知, 本文提出的 DFRA 性能远比 TFRA 优越。

3 结束语

本文针对深空光网络中节点能量有限的特点, 并基于多接口的深空通信节点模型, 将空分复用和频分复用充分结合, 提出了深空光通信网中 DFRA。该算法

支持定向的多跳路由传输, 路由寻路的过程中只有部分节点参与, 主要过程是让洪泛路由的过程大体上呈现为有方向地转发数据包, 即网络中的节点不是把数据转发给所有的邻居节点, 而是只转发到本节点特定的覆盖范围内的节点, 使路由过程向着有利于目的节点的方向推进。仿真结果表明: 本文提出的 DFRA 能够避免 TFRA 中的无方向性和盲目性, 更加节能; 同时, 网络传输时延和时延抖动等性能都优于 TFRA。

参考文献:

- [1] AMHOUD E M, TRICHILI A, OOI B S, et al. OAM mode selection and space-time coding for atmospheric turbulence mitigation in FSO communication[J]. IEEE, 2019, (7): 88049–88057.
- [2] HUANG S J, MANSOURI V S, SAFARI M. Game-theoretic spectrum trading in RF relay-assisted free-space optical communications [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(10): 4803–4815.
- [3] HU J L, WANG R H, SUN X, et al. Memory dynamics for DTN protocol in deep-space communications [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, 29(2): 22–30.
- [4] BAI D, SHI W R, GAO P, et al. Hop optimized unequal clustering routing algorithm for wireless sensor networks [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(32): 60–64.
- [5] DAVARIAN F, ASMAR S, ANGERT M, et al. Improving small satellite communications and tracking in deep space—a review of the existing systems and technologies with recommendations for improvement. Part II: small satellite navigation, proximity links, and communications link science [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2020, 35(7): 26–40.
- [6] GU Z Q, ZHANG J W, SU X, et al. Optimizing networked flying platform deployment and access point association in FSO-based fronthaul networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(8): 1221–1225.
- [7] JUANG C F, HUANG C W, HSU C H. Rule-based cooperative continuous ant colony optimization to improve the accuracy of fuzzy system design [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2013, 22(4): 723–735.
- [8] PATNAIK B, SAHU P K. Inter-satellite optical wireless communication system design and simulation [J]. IET Communication, 2012, 6(16): 2561–2567.
- [9] WANG X R, GUO L, LIU Y J, et al. Link design of moon-to-earth optical communication based on telescope array receivers[J]. Optics Communications, 2014, 310(1): 12–18.