

# 基于粒子群的无线紫外光网络快速信道分配方法

赵太飞 李琼 王一丹 张爱利

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 针对无线紫外光散射通信中非视距(NLOS)传输特点和信道干扰模型,采用基于粒子群的无线紫外光网络快速信道分配方法,充分考虑了空间角度对信道冲突矩阵的影响,实现了一种定向、快速的信道分配新方法。仿真分析了该算法的平均迭代次数、平均干扰度以及收敛时间与粒子群数目和信道数目的关系。实验结果表明此紫外光网络信道分配方法具有收敛速度快、冲突度小的优势,保障了无线紫外光网络信道分配的快速性和准确性。

**关键词** 光通信;紫外光;信道分配;粒子群;冲突度;收敛时间

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0106002

## Fast Channel Allocation Method in Wireless Ultraviolet Network Based on Particle Swarm

Zhao Taifei Li Qiong Wang Yidan Zhang Aili

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** A fast channel allocation method in wireless ultraviolet network based on particle swarm is adopted aiming at the characteristic of non-line-of-sight and channel interference model. Fully considering the influence of conflict matrix caused by the space angle, a directional and fast channel allocation is designed. The relationship between average number of iterations, interference degree, convergence time and particle swarms number, channels are simulated and analyzed. Experimental results show that the channel allocation method of ultraviolet light network in this paper has the advantages of fast convergence speed and small degree of conflict. Meanwhile, it can ensure the quickness and accuracy of the channel allocation in wireless ultraviolet network.

**Key words** optical communications; ultraviolet light; channel allocation; particle swarm; degree of conflict; convergence time

**OCIS codes** 060.2605; 060.4251; 060.4510; 060.4250

## 1 引言

紫外光(UV)是一种波长在10~400 nm的光波,根据不同波长范围的紫外光特性通常可以划分为UVA(320~400 nm),UVB(280~320 nm),UVC(10~280 nm)三个波段<sup>[1]</sup>。地球大气中的臭氧层对太阳光中200~280 nm的紫外光有强烈的吸收作用,使得这一波段的紫外光在近地平面附近辐射几乎为零,因此该波段称为“日盲区”<sup>[2]</sup>。紫外光通信主要采用“日盲”波段的紫外光作为信息传输

的载体,利用大气中的粒子、气溶胶、灰尘等微粒对紫外光的散射<sup>[3]</sup>进行信息传递。与传统的通信方式相比,紫外光通信具有抗干扰能力强、全方位性、可用于非视距(NLOS)<sup>[4]</sup>通信和无需捕获、对准、跟踪(APT)<sup>[5]</sup>等优点,具有广泛的应用前景。无线紫外光技术广泛应用于医疗卫生、商业防伪和火灾探测等民用领域<sup>[6]</sup>,军事上的应用主要包括紫外制导、紫外告警<sup>[7]</sup>和紫外光通信,还可广泛应用于海陆空三军专用局域军事保密通信,或在特定条件下作为其

**收稿日期**: 2013-07-10; **收到修改稿日期**: 2013-08-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(61001069)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2011JQ8028,2013JQ8011)、陕西省教育厅科研计划项目资助(2013JK1104)、西安市碑林区科技计划项目(GX1302)、西安市科技计划项目CXY1350(1)

**作者简介**: 赵太飞(1978—),男,博士,副教授,主要从事紫外光通信网络和无线光通信等方面的研究。

E-mail: year623@163.com

他通信手段的一种补充,对未来战争、现代化国防具有特殊的使用价值和实际意义。

粒子群优化<sup>[8]</sup> (PSO)算法是由 Kennedy 和 Eberhart 博士在 1995 年共同提出的一种新的模仿鸟类群体行为的智能优化算法,具有容易实现和收敛速度快等优势。该算法通过初始化一群随机粒子,并利用迭代方式,使每个粒子向自身找到的最好位置和群体中最好粒子靠近,从而搜索最优解。信道分配<sup>[9]</sup>问题是一个离散优化问题,虽然传统的 PSO 算法并不适合求解离散问题,但自其位置和速度更新公式改进后,其求解离散优化问题得以解决。文献[10]针对无线 Mesh 网络(WMN)信道分配,重点考虑了连通度、最小化干扰以及流动模型等问题,并针对上述问题采用不同的信道分配策略。文献[11]讨论了基于粒子群的无线多跳网络信道分配方法,分别给出了离散粒子群优化(DPSO)算法、Tabu-Based 和 Heuristic 算法的性能对比曲线。文献[12]提出了无线 Mesh 网络中基于 DPSO 的信道分配算法,并将此方法与文献[11]中的 Tabu-Based 算法对比,该算法能有效降低网络干扰并提升网络性能,充分体现了基于粒子群的离散信道分配的优越性。上述信道分配方法都是应用于无线 Mesh 网络中,其干扰具有全向性,在一定程度上造成了资源的浪费。本文针对无线紫外光散射通信中 NLOS 传输特点和信道干扰模型,采用基于粒子群的无线 UV 网络快速信道分配方法,充分考虑空间角度对信道冲突矩阵的影响,实现了一种定向、快速信道分配新方法。

## 2 离散粒子群信道分配算法

基本 PSO 算法主要针对连续函数进行搜索运算,但许多实际问题都描述为离散的组合优化问题。为了解决上述问题,Kennedy 等<sup>[13]</sup>于 1997 年提出了离散二进制离子群算法,采用二进制方式对粒子位置进行编码,通过 Sigmoid 函数将速度约束在 $[0, 1]$ 区间,并以此确定取 1 的概率。基本的二进制粒子群算法同基本粒子群优化算法类似,都会由于粒子在运动过程中产生惰性而发生早熟收敛。为解决这一问题,杨红孺等<sup>[14]</sup>于 2005 年基于基本二进制 DPSO 算法,提出了改进的二进制 DPSO 算法。新算法利用基本粒子群算法中“粒子依赖自身经验及粒子群全体经验,同时克服自身飞行惰性”的思想,改进了粒子的更新公式,并将离散的二值由 0、1 改为 -1、1。

本文所涉及的基于粒子群的无线 UV 网络快速信道分配方法,是将信道分配方案抽象为粒子群中的粒子,初始化过程中随机产生一群粒子,即多种信道分配方案,根据给出的网络及干扰模型判断此粒子是否最优,并通过迭代产生新的粒子,最终找到合适的信道分配方案。离散粒子群算法的粒子群表述为

$$\mathbf{X} = [X_1, X_2, \dots, X_M], \mathbf{X}_i = [x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^N], \quad (1)$$

式中  $M$  为粒子群的群体规模,  $N$  为粒子群离散化后的位数。离散粒子每一位  $x_i^j$  可取的值与信道数目有关。假设信道数目为  $K$ , 则  $x_i^j$  可取值为  $0-K$  中的任意整数。离散粒子群粒子的更新公式为

$$x_{i+1} = x_i + v, \quad (2)$$

式中  $x_i$  表示粒子当前时刻的位置,  $x_{i+1}$  表示粒子下一时刻的位置,  $v$  表示粒子的更新速度, 更新速度要根据实际情况来选择。

## 3 网络模型及问题描述

### 3.1 网络模型

本文研究的网络模型是由  $M_0$  个无线 Mesh 路由器组成的无线 Mesh 主干网, 每个路由器相当于一个网络节点。将无线 Mesh 主干网建模成一个有向图  $\mathbf{G}=(V, E)$ , 其中,  $V$  表示 Mesh 路由器节点,  $E$  表示节点间的边, 即通信链路。当两个节点处于各自的通信范围且具有相同的信道时, 便可构成一条通信链路。信道是指信号的传输媒质, 分为有线信道和无线信道。本文采用无线信道进行通信, 即根据信号的频率来区分不同的信道, 网络中可用信道数目是有限的, 在此用  $K$  表示。

### 3.2 干扰模型

由于无线媒介广播特性的存在, 处于通信范围内的两个节点间的通信可能对属于其干扰范围内的其他节点造成不必要的干扰, 干扰的存在必然会影响整个网络的通信质量。目前, 对干扰的描述主要有物理模型和协议模型。采用协议模型进行描述, 即根据节点间的距离判断其组成的链路之间是否存在干扰, 相互干扰用 1 表示, 否则用 0 表示。文中将采用冲突度对干扰进行量化描述。

对于给定的干扰模型, 假设冲突域为一跳。相互干扰的链路同时使用相同信道时, 可用冲突图表示。冲突图  $\mathbf{G}_c(V_c, E_c)$  可定义为顶点集  $V_c$  和冲突边集  $E_c$ , 表示链路  $(l_{ij}, l_{ab})$  之间使用同一信道时的相互干扰情况。图 1 表示网络拓扑图与对应的邻域

冲突图之间的关系,相应的网络拓扑矩阵和邻域冲突矩阵可表示为

$$\mathbf{G} = [0\ 1\ 1\ 1\ 0; 1\ 0\ 1\ 1\ 0; 1\ 1\ 0\ 0\ 1; 1\ 1\ 0\ 0\ 1; 0\ 0\ 1\ 1\ 0],$$

$$\mathbf{G}_c = [0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0; 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0; 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1; 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 0; 1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1; 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1; 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 1\ 0].$$

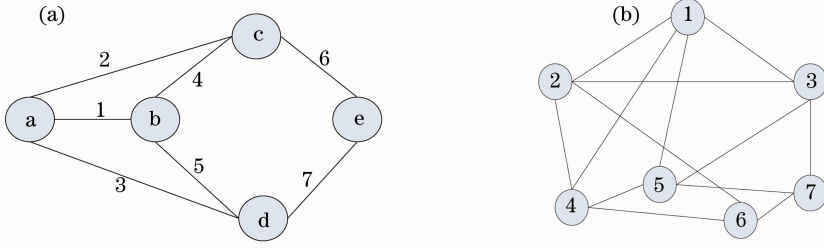


图1 网络拓扑图与对应的邻域冲突图。(a)网络拓扑图;(b)邻域冲突图

Fig.1 Network topology and the corresponding neighborhood conflict graph. (a) Network topology; (b) neighborhood conflict graph

### 3.3 紫外光网络信道分配问题与约束条件

根据发射光束发散角、接收视角角、发送接收角度不同形成的重叠散射区域的特性,紫外光 NLOS

通信可以分为(a)、(b)、(c)三类<sup>[15]</sup>,具体情况如图2所示,图中 T、R 分别表示发送端和接收端。

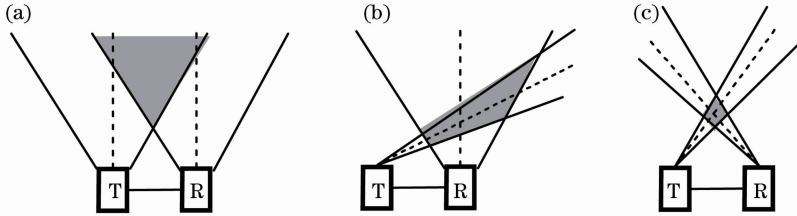


图2 紫外光 NLOS 通信三种工作模式

Fig.2 Three working modes of NLOS UV communication

图3为紫外光 NLOS 通信的投影立体图。假设发送端节点的发散角  $\phi_t$ ,发送仰角为  $\theta_t$ ,接收端节点的视角角  $\phi_r$ ,接收仰角为  $\theta_r$ , $\theta_s$  为散射角,发送和接收节点之间的距离为  $r$ 。发送端功率能量是有限的,假设其最远传输距离是  $r_1$ ,做以  $r_1$  为高,  $GH$  为底面圆直径的圆锥在地面的投影,投影区域为  $EAFD$ ,假设可见覆盖范围方位角为  $\theta$ 。由图3可得:

$$B'E = OG, \tan\left(\frac{\phi_t}{2}\right) = \frac{OG}{OA}, \cos \theta_t = \frac{AB'}{OA},$$

$$\tan\left(\frac{\angle EAF}{2}\right) = \frac{B'E}{AB'} = \frac{OG}{AB'} = \frac{OA \cdot \tan\left(\frac{\phi_t}{2}\right)}{OA \cos \theta_t} = \frac{\tan\left(\frac{\phi_t}{2}\right)}{\cos \theta_t}.$$

因此,覆盖范围的方向角为

$$\theta = \angle EAF = 2\arctan\left[\frac{\tan\left(\frac{\phi_t}{2}\right)}{\cos \theta_t}\right]. \quad (3)$$

由自由空间路径损耗公式  $L = P_t/P_r = \xi r^\alpha$ <sup>[16]</sup> 可得覆盖范围的扇形半径为

$$r = \sqrt[\alpha]{P_t/(P_r \xi)}, \quad (4)$$

式中  $\xi$  为路径损耗因子,  $\alpha$  为路径损耗指数,  $P_t$  为发送端功率,  $P_r$  为接收端功率。

根据协议模型的规定,处于同一扇区的节点之间的通信将会相互干扰,不同扇区的节点通信之间

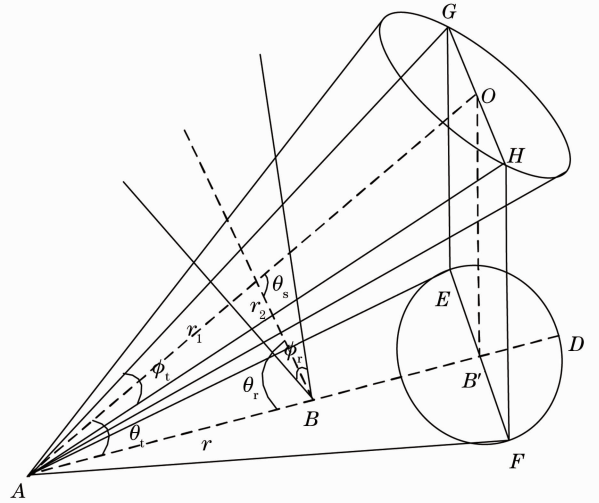


图3 紫外光 NLOS 通信的投影立体图  
Fig.3 Stereo projection of the NLOS UV communication

则互不干扰。在信道分配中,不同扇区的链路之间通信则可以使用相同的信道<sup>[17]</sup>,同一扇区的链路之间必须使用不同的信道。图4为紫外光覆盖范围扇形区域图,其中,S为源结点,A、B、C、D分别为目的结点,当S与C和D同时进行通信时,由于其处于同一扇形区域内,因此要使用不同的信道;当S与A和B同时进行通信时,目的结点处于不同的扇形区域内,就可以使用同一信道。

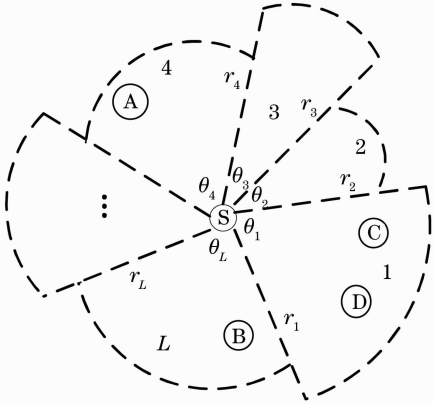


图4 紫外光通信覆盖范围扇形区域图

Fig. 4 Sector area covered by UV communication

基于上述分析,信道分配问题可描述为:根据紫外光散射特性,将节点的覆盖范围分为L个扇区,按逆时针方向排序后的集合表示为  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_L\} = \{1, 2, \dots, L\}$ 。每个扇区的覆盖范围如图4所示,第i个扇区的张角 $\theta_i (i \in [1, 2, \dots, L])$ 和覆盖半径 $r_i$ 可分别由(3)式和(4)式求得。用 $\beta_i$ 表示第i个扇区沿逆时针方向旋转的起始方向角,规定第一个扇区的起始方向为零度方向,即 $\beta_1 = 0$ ,因此,第i个扇区 $s_i$ 可以用 $(\theta_i, r_i, \beta_i)$ 来表示。假设目标结点集合为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_L\}$ , $s^i$ 表示第i个节点所在扇区且每个节点只被划分到一个扇区内, $a_{ij}^s$ 表示i节点与j节点所在扇区s的冲突情况。则信道分配的冲突条件可以表示为

$$\begin{cases} \theta_i = 2\arctan\left[\frac{\tan\left(\frac{\phi_{vi}}{2}\right)}{\cos\theta_{vi}}\right] \\ r_i = \sqrt{P_{vi}^{\text{th}}/(P_{vi}\xi)} \\ \beta_i = \beta_{i-1} + \theta_{i-1}, \beta_1 = 0 \\ a_{ij}^s = \begin{cases} 1, & s^i = s^j; i, j \in P; s^i, s^j \in S \\ 0, & s^i \neq s^j; i, j \in P; s^i, s^j \in S \end{cases} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $a_{ij}^s = 1$ 表示信道之间发生冲突, $a_{ij}^s = 0$ 表示信道之间无冲突; $\phi_{vi}$ 表示第i个节点的发散角, $\theta_{vi}$ 表示第i个节点的发射仰角, $P_{vi}$ 表示第i个节点的发送功率, $P_{vi}^{\text{th}}$ 表示第i各节点的接收功率门限值。

### 3.4 性能指标

由于粒子群算法的随机性,一次实验并不能反映整体算法的真实性能,而要通过多次实验取其平均才能更好地反映算法的实用性与可靠性。本文主要通过以下几个性能指标对所提出的信道分配算法进行评价。

1) 平均迭代次数:反映算法寻找最优解的速度,用 $n'_{\text{ave}}$ 来表示,计算公式如(6)式,其中 $n'_i$ 表示第i次实验的迭代次数, $N'$ 表示总的实验次数。

$$n'_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} n'_i}{N'}. \quad (6)$$

2) 平均干扰度:反映算法在执行过程中各个粒子之间的干扰程度,用 $f_{\text{ave}}$ 来表示,如(7)式,其中 $\bar{f}_i$ 表示第i次试验中各个粒子的平均干扰,如(8)式所示,中 $f_j$ 表示第j个粒子的干扰度, $N_0$ 表示粒子群数目, $N'$ 表示总的实验次数。

$$f_{\text{ave}} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} \bar{f}_i}{N'}, \quad (7)$$

$$\bar{f}_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} f_j}{N_0}. \quad (8)$$

3) 平均收敛时间:反映算法的收敛速度,用 $\bar{T}$ 来表示,如(9)式所示, $t_i$ 表示第i次实验时算法的收敛时间, $N'$ 表示实验次数。

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{N'} t_i}{N'}. \quad (9)$$

## 4 算法步骤

粒子群算法是通过各个粒子的迭代来找到最优解的,同样,在信道分配时,也是通过粒子的迭代来找到合适信道的。采用的基于粒子群的无线UV网络快速信道分配方法,主函数流程图如图5(a)所示。大体步骤可描述为:1)通过初始化随机产生一群粒子,即多种信道分配方案;2)根据给出的网络及干扰模型判断此粒子是否最优,干扰模型中冲突矩阵主要通过conflict函数生成,具体流程图如图5(c)所示,图5(c)中 $\theta$ 为扇形覆盖范围角度,并通过迭代产生新的粒子,粒子的迭代过程主要通过jump函数实现,具体流程图如图5(b)所示;3)通过约束条件判断选择冲突度最小的粒子作为最佳信道分配方案。

基于粒子群的无线UV网络快速信道分配方法具体步骤如下:

步骤1:初始化各个参数。假定信道数是K,粒子群数为 $N_0$ ,网络拓扑为 $G$ ,它的邻域拓扑(冲突域为一跳)为 $G_c$ , $G$ 有E条边,并设定最大迭代次数阈

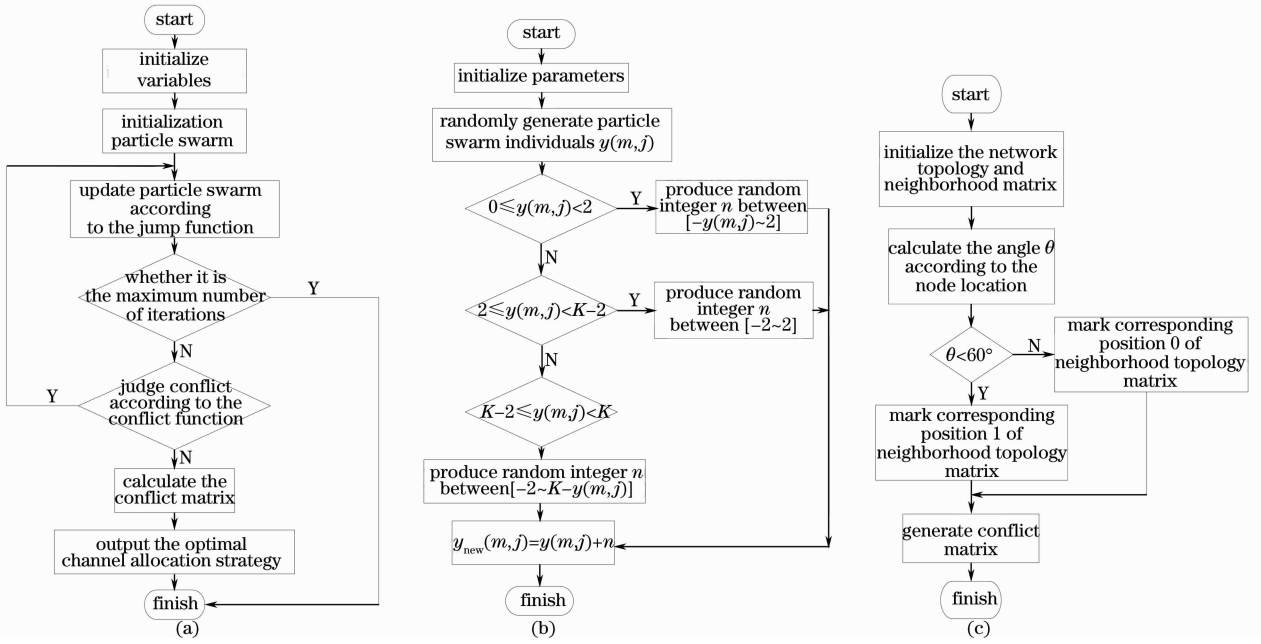


图5 基于粒子群的无线紫外光网络信道分配方法流程图。(a)主流程图；(b) jump 函数流程图；(c) conflict 函数流程图

Fig. 5 Flow chart of channel allocation method in wireless UV network based on particle swarm. (a) Main flow chart; (b) flow chart of jump; (c) flow chart of conflict

值。根据上面的假设条件,粒子群初始化为  $E \times N_0$  的矩阵,而每个粒子根据信道数的范围初始化为  $E \times 1$  的矩阵。这里产生的矩阵即为初始化的随机信道分配方式。

步骤2:迭代更新(速度和位置的更新)。采用算法中的 jump 函数进行粒子群速度和位置的更新,规定速度的最大范围为  $[-2, 2]$ ,假设信道数  $K=5$ 。速度更新要根据实际情况来进行选择,粒子要朝着比较适合信道的方向去选择,比如当此时两个节点的链路发生了冲突,即信道为0时,这时速度只能为0、1或2;当信道为1时,速度可以取-1、0、1或2,以此类推。

步骤3:判断迭代次数是否超过阈值,是,则转步骤7;否则,转步骤4。

步骤4:根据 conflict 函数进行冲突域的判断。若满足,转步骤5;不满足,记录当前的空间位置,迭代次数加1,转步骤2。所谓的约束条件主要就是看信道是否会发生冲突,防止它产生同道干扰和邻道干扰,主要通过冲突邻域矩阵  $G_c$  来判断。

步骤5:求冲突矩阵。冲突度用 flag 矩阵来表示,每发生一次冲突,它对应的冲突度数就加10,最终选择冲突度为0的信道分配方式作为最优选择。

步骤6:输出满足条件的信道分配方案。

步骤7:算法结束。

## 5 仿真结果分析

采用 Matlab 软件平台来实现该算法。网络模型中节点的覆盖范围采用等分方式,对于给定的网络拓扑,假设信道数目为  $K$ ,粒子群数目为  $N_0$ ,最大迭代次数阈值为100。当给定迭代次数阈值时,由于粒子群算法的随机性,因此在给定的阈值内并不一定都能找到最优解,即信道分配在100次迭代内存在一定的失败概率。经统计,当信道数目  $K=3$  时,失败概率大约为0.51;当  $K=4, 5, 6$  时,失败概率仅仅为0.01或接近于0。下面分别给出了算法的有效迭代次数,粒子的平均干扰度以及算法的收敛时间随粒子群数目的变化曲线。图中数据均是以100次实验取其平均得到的结果。

图6为无线UV网络中信道分配性能指标变化曲线,其中图6(a)为算法的平均迭代次数随粒子群数目的变化曲线,图6(b)为粒子的平均干扰度随粒子群数目的变化曲线。从图6中可以看出:1)当信道数目  $K$  和扇形覆盖范围的角度  $\theta$  固定时,随着粒子群数目的增大,平均迭代次数和平均干扰度都逐渐减小,并且当粒子群数目达到一定数量时,迭代次数和干扰度都将趋于平缓;2)当粒子群数目固定时,随着信道数目的增加,平均迭代次数和平均干扰度也逐渐减小,这是因为粒子群数目增大时,可供选择的信道方法数目就增大,因此更容易获得合适的信



道选择方案;3)当可用信道数目一定时,随着角度  $\theta$  的减小,平均迭代次数和干扰度逐渐减小,这是因为随着  $\theta$  的减小,节点覆盖范围的扇形区域逐渐减小,

不易对周围节点造成影响,此时平均迭代次数和干扰度都将减小。

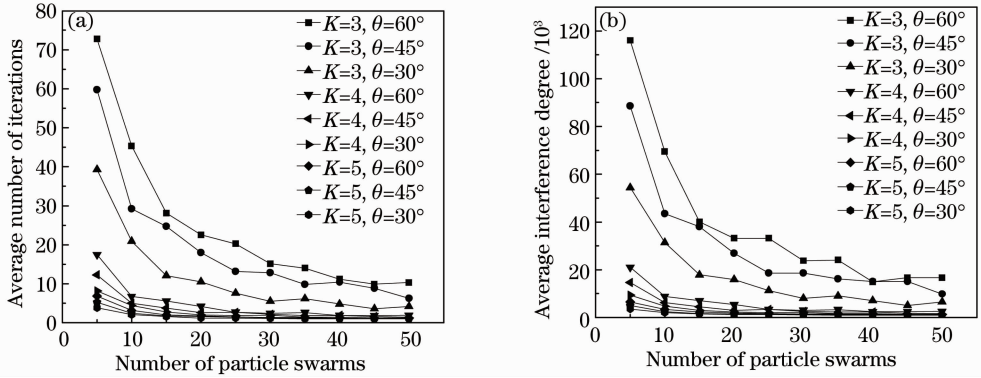


图 6 无线紫外光网络信道分配性能指标变化曲线。(a)平均迭代次数的变化曲线;(b)平均干扰度的变化曲线  
Fig. 6 Performance curves of channel allocation index in wireless UV network. (a) Curves of average number of iterations; (b) curves of average interference degrees

图 7 为算法的平均收敛时间随粒子群数目的变化曲线,其中数据是在主频为 3 GHz 的台式机上测得的数据。可以看出;1)信道数目固定时,随着粒子群数目的变化,算法的收敛时间基本保持一致,这是因为随着粒子群数目的增加,相应的迭代次数也减少,因此收敛时间基本保持一致;2)粒子群数目一定时,随着信道数目的增加,收敛时间明显下降;3)可用信道数目一定时,随着角度  $\theta$  的减小,平均收敛时间也减小。

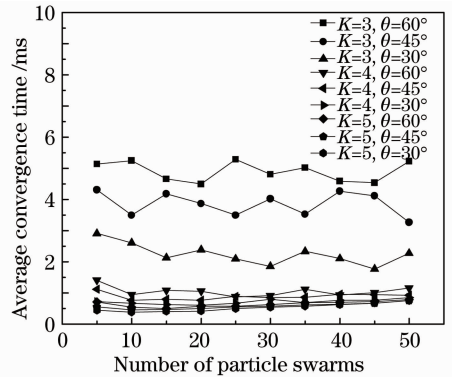


图 7 平均收敛时间变化曲线

Fig. 7 Curves of average convergence times

时,平均迭代次数和平均干扰度都将趋于平缓;2)当粒子群数目一定时,无线 UV 网络的迭代次数和干扰度均小于无线 Mesh 网络,这是因为在无线 Mesh 网络中,由于其干扰是具有全向性的,即  $\theta$  较大,相

时,平均迭代次数和平均干扰度都将趋于平缓;2)当粒子群数目一定时,无线 UV 网络的迭代次数和干扰度均小于无线 Mesh 网络,这是因为在无线 Mesh 网络中,由于其干扰是具有全向性的,即  $\theta$  较大,相

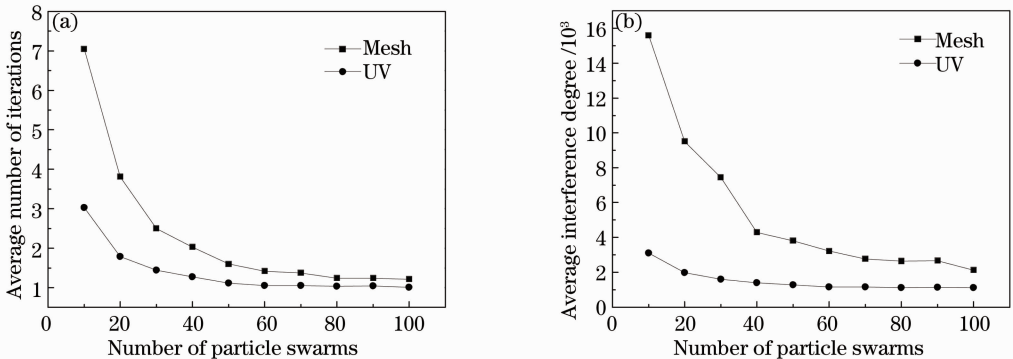


图 8 算法在无线 Mesh 网络和无线 UV 网络中的性能比较。(a)平均迭代次数的变化曲线;(b)平均干扰度的变化曲线  
Fig. 8 Performance comparison of algorithms between wireless Mesh network and wireless UV network. (a) Curves of average number of iterations; (b) curves of average interference degree

当于  $360^\circ$ ，而无线 UV 网络中，由于其覆盖范围为扇形区域， $\theta$  较小，因此无线 Mesh 网络在信道分配时，冲突矩阵的条件要更严格一些。所以将此算法应用于与角度相关的无线 UV 网络中，具有收敛速度快、冲突度小的优势，且保障了无线 UV 网络信道分配的快速性和准确性。

## 6 结 论

针对无线紫外光散射通信中 NLOS 传输特点和信道干扰模型，采用基于粒子群的无线 UV 网络快速信道分配方法，充分考虑了空间角度对信道冲突矩阵的影响，实现了一种定向、快速的信道分配新方法。仿真结果表明，对于无线 UV 网络的信道分配，平均迭代次数和平均干扰度均随着粒子群数目的增加而逐渐减小，并将趋于基本不变趋势；信道分配算法的收敛时间与信道数目和扇形覆盖范围角度有着密切的关系，根据不同的网络拓扑，选择合适的信道数目和角度，能更好地降低算法的收敛时间，提高收敛速度；在相同的参数条件下，无线 UV 网络的迭代次数和干扰度都将优于无线 Mesh 网络。综上所述，本文采用的无线 UV 网络信道分配方法具有收敛速度快、冲突度小的优势，保障了无线 UV 网络信道分配的快速性和准确性。

## 参 考 文 献

- 1 M R David, T M Daniel, A M John. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks [C]. SPIE, 2004, 5611: 244–254.
- 2 Ding Haipeng, Chen Gang, Majumdar, *et al.*. Turbulence modeling for non-line-of-sight ultraviolet scattering channels [C]. SPIE, 2011, 8038: 80380J.
- 3 Meng Xiangqian, Hu Shunxing, Wang Yingjian, *et al.*. Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0901001.  
孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散射相函数与大气能见度的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0901001.
- 4 Mohamed A El-Shimy, Steve Hranilovic. Binary-input non-line-of-sight solar-blind UV channels: modeling, capacity and coding [J]. J Commun Netw, 2012, 4(12): 1008–1017.
- 5 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1006003.

- 姜会林, 胡源, 丁莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1006003.
- 6 Zhao Taifei, Zhang Aili, Jin Dan, *et al.*. Research on the inter-link interference model in wireless ultraviolet non-line-of-sight communication [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706023.  
赵太飞, 张爱利, 金丹, 等. 无线紫外光非视距通信中链路间干扰模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706023.
  - 7 Wang Zhengfeng, Fu Xiuhua, Zhang Jing. Research on imaging filter in solar blind ultraviolet alarm system [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1207002.  
王正凤, 付秀华, 张静. 日盲紫外告警系统中成像滤光片的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1207002.
  - 8 Juan Luis Fernandez-Martinez, Esperanza Garcia-Gonzalo. Stochastic stability analysis of the linear continuous and discrete PSO models [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2011, 15(3): 405–423.
  - 9 Le Thanh Tan, Long Bao Le. Channel assignment with access contention resolution for cognitive radio networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(6): 2808–2823.
  - 10 Yulong Chen, Ning Xie, Gongbin Qian, *et al.*. Channel assignment schemes in wireless Mesh networks [C]. Global Mobile Congress, 2010. 1–5.
  - 11 Xiaofang Zhuang, Hongju Cheng, Naixue Xiong, *et al.*. Channel assignment in multi-radio wireless networks based on PSO algorithm [C]. International Conference on Future Information Technology, 2010. 1–6.
  - 12 Zhang Xu, Yin Changsheng, Xiong Hui, *et al.*. Channel allocation algorithm based on discrete particle swarm optimization in the wireless Mesh network [J]. Modern Electronics Technique, 2013, 8(36): 31–34.  
张旭, 殷昌盛, 熊辉, 等. 无线 Mesh 网络中基于离散粒子群优化的信道分配算法[J]. 现代电子技术, 2013, 8(36): 31–34.
  - 13 J Kennedy, R C Eberhart. A discrete binary version of the particle swarm algorithm [C]. IEEE International Systems, Man and Cybernetics Computational Cybernetics Simulation, 1997, (5): 4104–4108.
  - 14 Yang Hongru, Gao Hongyuan, Pang Weizheng, *et al.*. Multi-user detection based on discrete particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(9): 1303–1306.  
杨红孺, 高洪元, 庞伟正, 等. 基于离散粒子群优化算法的多用户检测器[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(9): 1303–1306.
  - 15 G A Shaw, A M Siegel, J Mode. Recent progress in short-range ultraviolet communication [C]. SPIE, 2005, 5796: 214–225.
  - 16 Gang Chen, Zhengyuan Xu, Haipeng Ding, *et al.*. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications [J]. Opt Express, 2009, 17(5): 3929–3940.
  - 17 Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306001.  
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306001.