

# 认知工业物联网中基于麻雀搜索算法的频谱分配策略

尹德鑫<sup>1</sup>, 张达敏<sup>1</sup>, 张琳娜<sup>2</sup>, 蔡朋宸<sup>1</sup>, 秦维娜<sup>1</sup>

(1. 贵州大学大数据与信息工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学机械工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 针对工业物联网因海量数据交换导致的频谱短缺问题, 本文将认知无线电技术运用到工业物联网中, 提出一种认知工业物联网(Cognitive industrial internet of things, CIOT)中基于改进麻雀算法和功率控制的频谱分配策略。该策略以最大化公平性和能量效率为前提, 首先使用一种基于改进地图指南针算子和步长因子的二进制麻雀搜索算法(Improved binary sparrow search algorithm, IBSSA)对CIOT用户进行频谱分配; 然后使用基于接收信噪比(SINR)的闭环功率控制算法对通信过程中的用户进行动态功率调整, 达到发射功率最佳, 最后将系统能量效率和公平性作为评价指标, 与二进制麻雀算法(Binary sparrow algorithm, BSSA)和二进制蝙蝠算法(Binary bat algorithm, BBA)进行比较。仿真结果表明, 相比BSSA和BBA算法, IBSSA算法可以获得更高的系统能量效率和用户公平性, 说明本文提出的优化策略明显提高了认知工业物联网的公平性和能量效率。

**关键词:** 认知工业物联网; 频谱分配; 能量效率; 公平性; 麻雀搜索算法

**中图分类号:** TN929.5      **文献标志码:** A

## Spectrum Allocation Strategy Based on Sparrow Algorithm in Cognitive Industrial Internet of Things

YIN Dexin<sup>1</sup>, ZHANG Damin<sup>1</sup>, ZHANG Linna<sup>2</sup>, CAI Pengchen<sup>1</sup>, QIN Weina<sup>1</sup>

(1. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of spectrum shortage caused by massive data exchange in industrial internet of things, cognitive radio technology is applied to the industrial internet of things in this paper. This paper proposes a spectrum allocation strategy based on improved sparrow algorithm and power control in cognitive industrial internet of things (CIOT). This strategy is based on the premise of maximizing fairness and energy efficiency. First, this paper uses improved binary sparrow search algorithm (IBSSA) based on improved map compass operator and step-size factor, which is used to allocate spectrum for CIOT users. Then, in the communication process to optimize the transmitting power, this paper uses the closed-loop power control algorithm based on receiving SINR to adjust the dynamic power of the users. Finally, the energy efficiency and fairness of the system are taken as evaluation indexes, and the binary sparrow algorithm (BSSA) and binary bat algorithm (BBA) are compared. Simulation results demonstrate that IBSSA can achieve higher system energy efficiency and user fairness than BSSA and

BBA, showing that the proposed optimization strategy significantly improves the fairness and energy efficiency of the CIOT.

**Key words:** cognitive industrial internet of things (CIOT); spectrum allocation; energy efficiency; fairness; sparrow search algorithm

## 引言

工业物联网(Industrial internet of things, IIOT)是工业领域的物联网技术<sup>[1-2]</sup>,它将采集到的数据通过网络传输或处理,并不断将其集成到工业生产过程的各个环节的技术中去,实现工业智能化<sup>[3]</sup>。工业物联网需要用到无线通信技术,相对传统物联网,接入工业物联网的工业设备种类和数量众多,系统需要处理的数据量迅速增长,因此会对计算资源和通信资源导致一定的压力<sup>[4]</sup>。无线资源的分配往往决定着通信系统的吞吐量、能效以及频谱效率等关键性能。因此,有限的无线资源限制了工业物联网发展,而认知无线电(Cognitive radio, CR)的出现有效地改善了这一问题<sup>[5]</sup>。

认知工业物联网(Cognitive industrial internet of things, CIOT)是将 IIOT 与 CR 相结合,通过利用一些许可频谱来扩展可用频谱资源,例如无线电/电视频谱、4G/5G 频谱和其他工业频谱,因此,CIOT 可以很好地适应大量工业数据的处理和传输,但是目前关于 CIOT 的研究还很少<sup>[6-7]</sup>。

为了最大限度地提高能量效率,文献[8]提出一种基于无线能量收集的 CIOT,以获取主用户信号的射频能量,并在不同频谱接入方式下提出资源分配策略,最大化 CIOT 的平均传输速率,并保证其节能要求;文献[9]提出了一种在认知无线电传感器网络用于能量收集的分布式传输功率控制策略,根据网络情况动态调整节点的传输功率,以维系网络连接性,这种动态传输功率调节可转换网络逻辑拓扑,以更好地适应网络的功率状况。

为了最大限度地提高频谱效率,文献[10]提出了一种优化认知物联网(Cognitive internet of things, CIOT)能量和频谱效率方案,其中每个节点可以机会性地访问空闲频谱并从周围的射频源获取能量;文献[11]提出了一种在空闲频段和非空闲频段中运行的,使用认知无线电的低功耗广域网的物联网动态频谱接入技术,主要目的是在不干扰许可低功耗广域网(Low power wide area network, LPWAN)主要用户的情况下,最大化认知用户的频谱容量。

为了提高物联网用户的公平性,文献[12]在工业物联网中提出一种联合非正交多址和时分多址(Non-orthogonal multiple access-time division multiple access, NOMA-TDMA)的资源分配方案,通过非正交多址(Non-orthogonal multiple access, NOMA)实现多个传感器在同一时频资源块内传输,共同优化了用户调度、时隙分配和功率控制,以使系统最大化在发射功率约束和最小速率约束下的公平效用。

综上所述,文献[8]虽将认知无线电与工业物联网结合来解决 IIOT 资源分配问题,但没有考虑频谱优化问题,文献[9-12]主要考虑优化频谱分配和功率控制,但未对提出的资源分配算法进行优化,致使最终获取的不是最佳资源分配方案。基于此,本文引入认知工业物联网的概念来优化用户的能量效率和公平性,解决工业物联网中的频谱分配和干扰问题,提出一种联合改进二进制麻雀搜索算法(Improved binary sparrow search algorithm, IBSSA)和改进闭环功率控制算法的频谱分配方案,首先采用改进二进制麻雀搜索算法为 CIOT 用户分配频谱资源,然后采用改进闭环功率控制算法来降低用户间产生的干扰。仿真结果表明,改进后的策略优化了认知工业物联网中的频谱资源,明显提高了工业物联网的公平性和能量效率。

## 1 系统模型

随着工业数据的快速增长,工业物联网正在进入大数据时代,大数据时代需要更大的带宽来传输海量数据<sup>[13]</sup>,因此,未来的网络必须满足工业物联网的各种需求,例如频谱、功率和成本。由于预计将要连接大量设备,频谱稀缺是一个会影响服务质量(Quality-of-service, QoS)的约束。CIOT是将认知无线电与工业物联网结合,在主用户(PU)通信不被干扰的条件下,通过访问PU的频谱来扩展可用频谱资源,提升频谱利用率。由于CR的机会频谱接入可能会给PU带来一定程度的干扰并降低QoS,因此对功率控制进行优化,降低对PU的干扰并同时确保为所有用户提供最佳的QoS。

本文结合CIOT的概念,构建一种新的认知工业物联网模型。IIOT中的工业设备可以被作为是认知无线网络中的用户,通过在IIOT中融合认知无线电技术,实现主次工业物联网设备共享频谱资源,大大提升频谱资源利用率。系统模型如图1所示,假设在工厂环境中,存在随机分布的 $N$ 个认知用户(SU), $M$ 个主用户(PU)空闲的信道,分别用 $\rho=\{1, 2, \dots, N\}$ 和 $\kappa=\{1, 2, \dots, M\}$ 表示,主基站(PBS)和认知基站(CBS)都有各自的覆盖范围,在所属范围内用户使用自己分配到的信道和所属基站通信,CBS可供 $N$ 个SU服务,PBS可供 $K$ 个PU服务,当检测到可用频带时,将数据发送到数据中心,再由数据中心进行分配。

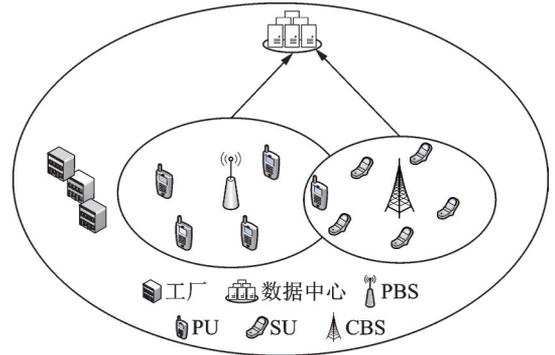


图1 认知工业物联网系统模型

Fig.1 CIOT system model

在工厂环境中,假设在SU和PBS之间没有信道增益,但是PU和CBS之间有信道增益,SU和CBS之间也存在信道增益,信道增益与用户距CBS的路径距离有关,信道增益可以表示为

$$h = A \frac{1}{\text{PL}(d^n)} \quad (1)$$

式中: $A$ 服从瑞利分布, $d^n$ 表示第 $n$ 个用户到CBS的距离, $\text{PL}(d^n)$ 表示路径损耗。假设第 $n$ 个SU的传输功率为 $P_n$ ,PU的传输功率为 $P_0$ ,第 $n$ 个SU的信干噪比(SINR)表示为

$$\text{SINR}_n = \frac{P_n h_n}{P_0 h_0 + \delta^2} \quad (2)$$

式中: $\delta^2$ 为具有零均值和方差的加性高斯白噪声, $h_n$ 为SU的信道增益, $h_0$ 为PU的信道增益。

根据文献[14],认知用户在通信过程中的路径损耗模型为

$$\text{PL}(d^i) = \begin{cases} 20 \lg \left( \frac{4\pi\lambda}{d^n} \right) & d^n \leq d_0 \\ 20 \lg \left( \frac{4\pi\lambda}{d^n} \right) + 10\gamma \lg \left( \frac{d^n}{d_0} \right) + X_g & d^n > d_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $d^n$ 表示认知用户 $n$ 到CBS的距离, $d_0$ 为参考距离, $\lambda$ 为发射频率波长, $\gamma$ 为路径损耗指数, $X_g$ 为阴影参数。根据以上内容定义系统模型主要组成部分如下

(1)可用矩阵: $U = \{u_{n,m} \mid u_{n,m} \in \{0, 1\}\}_{N \times M}$ , $U$ 为一个 $N \times M$ 二维矩阵, $u_{n,m}$ 为认知用户 $n$ 对信道 $m$ 的使用状况, $u_{n,m} = 0$ 表示SU $n$ 不能使用信道 $m$ , $u_{n,m} = 1$ ,则表示SU $n$ 可以使用信道 $m$ 。

(2)效益矩阵: $E = \{e_{n,m} \mid e_{n,m} > 0\}_{N \times M}$ , $E$ 为一个 $N \times M$ 的实数矩阵,矩阵内各个元素表示CIOT用

户  $n$  在信道上获取的效益,  $e_{n,m}$  通常用带宽或吞吐量表示, 根据香农定理, 可以表示为

$$e_{n,m} = w \log_2(1 + \text{SINR}) \quad (4)$$

式中  $w$  为信道  $m$  的带宽。

(3) 干扰矩阵: 当 PBS 和 CBS 覆盖范围有交叉重叠时, 使用相同信道产生的信道干扰值  $G_{n,m}$  构成在频段范围内的干扰矩阵  $\mathbf{G} = \{g_{n,k,m} \mid g_{n,k,m} \in \{0, 1\}\}_{N \times N \times M}$ ,  $\mathbf{G}$  为  $M$  个  $N \times N$  二维矩阵构成的三维矩阵,  $g_{n,k,m} = 0$  表示认知用户  $n$  和主用户  $k$  同时使用信道  $m$  不会产生干扰,  $g_{n,k,m} = 1$  则表示会产生干扰。

(4) 无干扰分配矩阵:  $\mathbf{X} = \{x_{n,m} \mid x_{n,m} \in \{0, 1\}\}_{N \times M}$ ,  $\mathbf{X}$  为一个  $N \times M$  二维矩阵,  $x_{n,m} = 1$  表示信道  $m$  可以被认知用户  $n$  占用。要想 SU 占用的信道对其他用户不造成影响, 无干扰分配矩阵必须满足无干扰分配条件  $g_{n,k,m} = 1, x_{n,m} \times x_{k,m} = 0, \forall 0 \leq n, k \leq N, 0 \leq m \leq M$ 。

(5) 用户效益值: 若在确定无干扰分配矩阵  $\mathbf{X}$  情况下, 用户  $n$  的效益  $r_n$  为

$$r_n = \sum_{m=1}^M x_{n,m} \cdot e_{n,m} \quad (5)$$

(6) 能量效率: 评估频谱分配策略对系统能量效率的影响, 表达式为

$$E = \frac{\sum_{n=1}^M r_n}{\sum_{n=1}^N P^n} \quad (6)$$

式中  $P^n$  为传输功率。

(7) Jain's 公平指数: 认知无线电中的公平性用于避免无线资源的不平衡利用,  $J$  为公平性评估指标,  $J \in (0, 1]$ , 当用户间的公平性越趋近于 1, 则说明公平性越好, 表达式为

$$J = \frac{\left( \sum_{i=1}^N e_i \right)^2}{N \sum_{i=1}^N e_i^2} \quad (7)$$

式中:  $i$  表示第  $i$  个次用户,  $N$  为最大次用户数,  $e_i$  为第  $i$  个次用户使用的带宽。

## 2 改进二进制麻雀搜索算法

2020 年, Xue 等<sup>[15]</sup> 提出一种新兴群智能算法——麻雀搜索算法 (Sparrow search algorithm, SSA), 具有操作简单、强鲁棒性和稳定性好等优点, 普遍被用于工程领域, 因此选择 SSA 算法为认知工业物联网用户寻找最佳频谱分配方案。

本节针对标准麻雀搜索算法收敛速度慢、易陷入局部极值和寻优精度不高等问题, 提出一种改进二进制麻雀搜索算法 (IBSSA)。

标准 SSA 算法由发现者、加入者和侦察者组成。SSA 中的发现者负责寻找食物, 并且为整个麻雀种群提供觅食区域和方向。但是发现者在搜索食物的过程中, 麻雀可能受地形干扰, 影响其寻找食物, 不利于麻雀快速向最优目标靠近。鸽群算法<sup>[16]</sup> 的地图指南针算子可以引导偏离目标位置的麻雀感知目标方向寻找食物。于是将鸽群算法的地图指南针算子嵌入发现者位置更新公式, 来提高收敛速度, 增强跳出局部最优能力, 计算公式如式 (8) 所示。

$$x_{i,j}(l+1) = \begin{cases} e^{-Rl} \cdot x_{i,j}(l) \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot L}\right) & R_2 < \text{ST} \\ e^{-Rl} \cdot x_{i,j}(l) + Q \cdot R & R_2 \geq \text{ST} \end{cases} \quad (8)$$

$$R = \left( R_{\min} + R_{\max} \cdot \frac{l}{L} \right) \cdot (1 + p_r \cdot (\text{rand} - 1)) \quad (9)$$

式中: $l$ 为当前迭代次数; $L$ 为最大迭代次数; $\alpha$ 为范围0到1的随机数; $R_2$ ( $R_2 \in [0, 1]$ )表示预警值; $ST$ ( $ST \in [0.5, 1]$ )表示安全值; $Q$ 为服从正态分布的随机数; $R$ 为 $1 \times d$ 的矩阵,其中每个元素都为1; $R$ 是鸽群算法的地图指南针因子, $R$ 越小,强度越强,搜索能力就越强、发展潜力越大, $R_{\max}$ 表示最大地图指南针因子值, $R_{\min}$ 表示最小地图指南针因子值; $p_r$ 为变异概率; $\text{rand}$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。但是传统的地图指南针算子属于线性变化,对每只麻雀赋予相同的值,并没有考虑麻雀在不同位置所处的差异,因此对地图指南针算子进行改进

$$R = \left( R_{\min} + R_{\max} \cdot \frac{l}{L} \right) \cdot (1 + p_r \cdot (\text{rand} - 1)) \cdot \frac{\text{WorstF}}{\text{BestF}} \quad (10)$$

式中: $\text{WorstF}$ 为麻雀最差适应度值, $\text{BestF}$ 为麻雀最佳适应度值。麻雀最差适应度值与最佳适应度值之比反映不同麻雀的位置差异,使麻雀能更好地寻找到目标值。

SSA中的加入者察觉发现者找到优质食物时,会立刻离开当前位置去争夺食物,其位置更新公式为

$$x_{i,j}(l+1) = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{x_{\text{worst}}(l) - x_{ij}(l)}{i^2}\right) & i > \frac{n}{2} \\ x_{\text{best}j}(l+1) + |x_{ij}(l) - x_{\text{best}j}(l+1)| \cdot A^+ \cdot R & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $x_{\text{worst}}(l)$ 表示当前全局最差位置, $x_{\text{best}j}(l)$ 表示在 $j$ 维空间第 $i$ 个发现者占据的最佳位置, $A$ 表示一个 $1 \times d$ 矩阵,随机分配元素1或-1,其中 $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$ 。当 $i > n/2$ 时,表示适应度值较差的第 $i$ 只加入者处于饥饿状态,它需要飞往其他方向寻找食物。

当麻雀种群觅食时,会选取一部分种群负责侦查周围情况,SSA中的侦查者占全部种群的10%~20%,在侦查者位置更新公式(12)中, $\beta$ 作为步长控制参数,对平衡算法局部开发能力和全局搜索能力起着重大作用。但是 $\beta$ 为一个随机数,并不能满足算法不同时期的需求,不同的 $\beta$ 会对麻雀寻优性能造成影响。因此,对步长控制参数 $\beta$ 进行优化,改进公式如(13)所示。

$$x_{i,j}(l+1) = \begin{cases} x_{\text{best}j}(l) + \beta(x_{i,j}(l) - x_{\text{best}j}(l)) & f_i \neq f_g \\ x_{i,j}(l) + K \left( \frac{x_{i,j}(l) - x_{\text{worst}j}(l)}{|f_i - f_w| + e} \right) & f_i = f_g \end{cases} \quad (12)$$

$$\beta = 1 - \beta_{\max} \cdot \left( \frac{l}{L} \right) \cdot (\beta_{\max} - \beta_{\min}) \cdot \exp\left(-\frac{l-L}{L}\right) \quad (13)$$

式中: $K \in [0, 1]$ 表示麻雀运动方向,也是步长控制参数; $f_i$ 表示当前麻雀的适应度值; $f_g$ 和 $f_w$ 分别表示当前全局最优值和最差值; $e$ 为一个常数。当 $f_i = f_g$ 时,表示处于种群中间位置的麻雀意识到危险,因此需要靠近其他麻雀来减少被捕食的概率。 $\beta_{\max}$ 为步长因子最大值, $\beta_{\min}$ 为步长因子最小值。 $\beta$ 的曲线变化图如图2所示,它随着迭代次数增大而慢慢减小,当迭代开始时 $\beta$ 的初值最大且递减速度很快,有利于进行全局探索,提高收敛速度;迭代后期 $\beta$ 值较小且递减速度缓慢易于局部探索,提升SSA的寻优能力。

由于CIOT中的频谱分配矩阵 $X$ 是由0和1构成的离散二维矩阵,但在标准麻雀算法中麻雀的位置是连续的,所以需

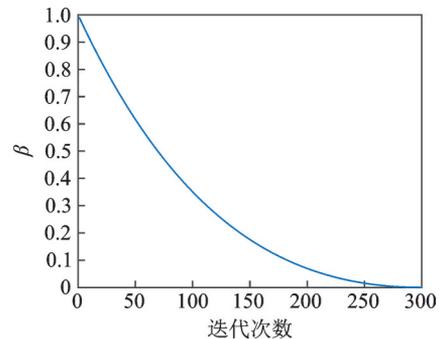


图2 步长因子变化趋势图

Fig.2 Chart of step factor change

要对麻雀位置进行离散处理。然后将每个麻雀的离散位置最优解映射到频谱分配矩阵  $X = \{(n, m) | x_{n,m}\}_{N \times M}$  中。并且将麻雀个体适应度函数作为频谱分配的目标函数。

大多数文献使用 Sigmoid 函数进行离散转换,而本文使用呈 V 形变化的反正切双曲时变传递函数 (TH)<sup>[17]</sup> 将连续值转换为离散值,相较于 Sigmoid 函数,TH 函数的优点在于不会强制麻雀位置转换为 0 或 1 的值,并且 TH 函数在避免陷入局部极值方面优于 Sigmoid 函数,位置更新公式为

$$x_i(l+1) = \begin{cases} 1 & T(x_i) > \text{rand} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

$$T(x_i(l+1)) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2} x_i(l)\right) \right| \quad (15)$$

但是 TH 函数仍不能完全解决易陷入局部极小值问题,基于此,提出一种动态传递函数来对 TH 时变函数进行改进,将一个新的控制参数  $\theta$  引入原始传递函数中, $\theta$  是呈非线性递减变化的,改进公式为

$$T(x_i(l+1)) = \left| \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2} \frac{x_i(l+1)}{\theta}\right) \right| \quad (16)$$

$$\theta = \theta_{\min} \left(1 - \frac{l}{L}\right) + (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \cdot \exp\left(-\frac{l}{L}\right) \quad (17)$$

式中  $\theta_{\max}$  和  $\theta_{\min}$  分别表示控制参数的最大值和最小值,参考文献[18],将  $\theta_{\max}$  和  $\theta_{\min}$  分别设置为 2 和 0.1。引入动态传递函数后,在优化过程中,算法在迭代早期将重点放在探索上,以避免落入局部点,但是在算法后期,则更多地关注于开发以提高算法解的质量。

为了验证改进二进制麻雀搜索算法 (IBSSA) 的性能,对表 1 所示的 4 个测试函数进行求解寻优,故将 IBSSA 与二进制麻雀算法 (Binary sparrow search algorithm, BSSA) 和二进制蝙蝠算法<sup>[19]</sup> (Binary bat algorithm, BBA) 的结果进行对比分析。利用单峰函数 F1 和 F2 来验证算法的收敛性能,多峰函数 F3 和 F4 验证算法跳出局部最优能力。将 IBSSA、BSSA 和 BBA 求解寻优函数所得的平均值和标准差作为评价指标,结果如表 2 所示。并且为了使仿真测试的公平性令人信服,将所有算法的共同参数均设置相同:种群大小  $N=50$ ,迭代次数最大为  $L=300$ ,空间维数  $D=30$ 。

从表 2 可以看出,与 BSSA 和 BBA 相比,对于求解单峰函数 F1,IBSSA 求解精度已达到理想值,对于求解 F2,IBSSA 虽没有达到理想值,但 IBSSA 的最优求解性至少高于 BSSA 和 BBA 两个数量级,且相较其他算法,IBSSA 的标准差小于其他 3 种算法,说明 IBSSA 在求解单峰函数方面拥有更好的寻优能力和稳定性。对于求解多峰函数 F3 和 F4,IBSSA 的寻优精度均高于 BSSA

表 1 基准测试函数

Table 1 Benchmark function

编号	函数	维度	定义域	最优解
F1	Sphere	30	$[-100, 100]$	0
F2	Scwefel	30	$[-10, 10]$	0
F3	Penalized 1	30	$[-50, 50]$	0
F4	Penalized 2	30	$[-50, 50]$	0

表 2 实验结果

Table 2 Experimental results

函数	算法	平均值	标准差
F1	IBSSA	0	0
	BSSA	6.52E-113	1.45E-112
	BBA	1.01E+02	7.44E+02
F2	IBSSA	0	0
	BSSA	9.23E-76	2.06E-75
	BBA	1.58E+00	2.73E+00
F3	IBSSA	1.26E-09	8.15E-08
	BSSA	9.91E-07	2.56E-06
	BBA	1.37E+00	2.25E-02
F4	IBSSA	1.34E-32	0
	BSSA	1.26E-09	8.19E-09
	BBA	1.12E-02	4.14E-02

和BBA,且标准差为0,说明IBSSA有良好的稳定性,不易陷于局部陷阱,能得到较好的解。由此得出结论,IBSSA无论面对简单问题还是多维问题都表现出较高的寻优性能。

### 3 频谱分配和功率控制

#### 3.1 基于IBSSA的频谱分配策略

针对CIOT频谱分配优化问题,本文提出基于IBSSA算法的频谱分配策略,将频谱分配<sup>[20]</sup>映射到麻雀种群中个体的位置,以进行频谱管理,最佳种群解与频谱分配的能量效率和认知用户之间的公平性指数相对应。所以,频谱分配问题的最终优化目标是在最大化系统能量效率和用户公平性的情况下,求解无干扰分配矩阵 $X$ <sup>[21]</sup>。因为可用矩阵 $U$ 会约束着信道分配矩阵 $X$ ,所以根据空闲矩阵中次用户使用信道的情况,当 $u_{n,m}=0$ 时,表明在目前通信状况下次用户 $n$ 不能占用频谱 $m$ ,而可用矩阵 $P$ 中的0元素在位置上与矩阵 $X$ 的0元素对应, $x_{n,m}=0$ 。因此,只需要对可用矩阵 $U$ 中值为1的元素实行编码。矩阵 $U$ 中元素为1的总数决定麻雀的编码长度 $L$ ,其数学公式为

$$L = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M u_{n,m} \quad (18)$$

如图3所示,假设在系统中认知用户数 $N=4$ ,可用频谱数 $M=4$ ,矩阵 $U$ 通过检测频谱被获取,然后在矩阵 $U$ 中抽取元素为1的值进行编码,得到解向量 $x=\{x_i \in (0,1), i=1,2,\dots,7\}$ ,最后将麻雀个体的解向量与分配矩阵 $X$ 映射。因为麻雀个体位置是随机生成的,按照这个编码方法并不能使每个分配方案成功,所以麻雀个体需遵守无干扰约束条件,任意频谱 $m(0 \leq m \leq M)$ 寻找满足条件 $g_{n,k,m}=1$ 的 $n$ 和 $k$ ,若 $X$ 中 $x_{n,m}$ 和 $x_{k,m}$ 都为1,那么就把其中一个元素设置为0,另一个不变,这样就能解决频谱分配问题。

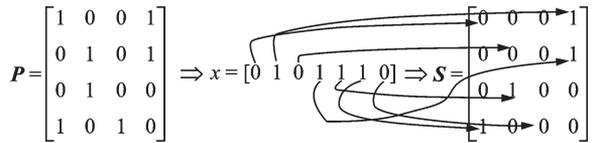


图3 解向量编码方式示例图

Fig.3 An example of a de-vector encoding scheme

算法具体实现步骤如下:

- (1)初始化麻雀参数和网络参数,例如主用户数、次用户数和信道数量等。
- (2)产生主用户和次用户的位置拓扑图,生成可用矩阵 $U$ 、效益矩阵 $E$ 和干扰矩阵 $G$ 。
- (3)干扰约束处理,判断干扰矩阵 $G$ 的元素两行元素是否为1,若为1,则随机把两行中的任意一行对应元素变为0,另一行仍为1。保证一个频谱分配给一个用户,将麻雀位置映射为分配矩阵 $X$ 。
- (4)计算种群最初的适应度值,对种群的历史最优、全局最优的适应度值进行保存,保存麻雀最佳位置及最优的频谱分配方案。
- (5)根据式(8,10~13)进行种群更新,更新麻雀位置。根据式(14,16)将连续麻雀位置进行离散化,重复步骤3根据干扰矩阵 $G$ 进行干扰约束,然后根据目标函数计算所有麻雀的适应度值,选出具有最大适应度值的个体,迭代寻优。
- (6)重复步骤4,5,当已达设置的最大迭代次数时,则返回迭代结束,并输出全局最优解,此时得到的全局最优解就是最佳频谱分配方案。

#### 3.2 基于接收SINR的闭环功率控制策略

系统模型如图1所示,在认知工业物联网中,CBS和PBS覆盖范围由于交叉重叠会产生干扰,为有效降低干扰的影响,本文采取的策略是:先利用开环功率控制算法对用户的发射功率进行初始化,再利用闭环功率控制算法动态调整用户的发射功率<sup>[22]</sup>。根据通信用户的信息参数,数据中心对其进行判

断,给出对应的功率控制命令(TPC),用户会根据收到的指令,对其发射功率选择上加一个步长或下降一个步长来动态调节功率控制。因为用户的信息会发生变化,在调整功率控制的过程中,根据信道的实时变化,利用新加入的反馈项 $f(\lambda_i)$ 来调整步长取值。认知工业物联网用户的开环功率控制和闭环功率控制数学表达式为

$$P_o = \min \{ P_{\max}, P_0 + a \cdot PL \} \tag{19}$$

$$P_c = \min \{ P_{\max}, P_0 + a \cdot PL + f(\lambda_i) \} \tag{20}$$

式中: $a$ 为路径补偿因子; $PL$ 为路径损耗; $P_{\max}$ 表示用户最大传输功率; $P_0$ 表示用户特定的额定参数,由文献[23]可知, $P_0$ 设置为 $-78$  dB时,能达到最佳去干扰效果。在闭环功率控制中的 $f(\lambda_i)$ 是根据 $\lambda_i$ 来对功率进行上调或下调的动态调整,其数学表达式为

$$f(\lambda_i) = f(\lambda_i) + \lambda_{i-k} \quad \lambda_i \in \{-1, 0, 1, 3\} \tag{21}$$

本文根据用户SINR的动态变化,采用基于接收SINR的闭环功率控制算法对功率控制进行动态调节。由用户当前的SINR和反馈项 $f(\lambda_i)$ 来确认闭环功率控制算法的参数。设置SINR门限值 $SINR_{low}$ 和 $SINR_{high}$ ,将当前SINR同 $SINR_{low}$ 和 $SINR_{high}$ 比较,根据经验取值,将下限值 $SINR_{low}$ 和上限值 $SINR_{high}$ 分别设置为 $-20$ 和 $30$  dB,当 $SINR < SINR_{low}$ 时,用户会受到来自其他用户的高强度干扰,因此需要增加用户发射功率来提高用户通信质量;当 $SINR > SINR_{high}$ 时,当下用户的SINR比上限值高,为了减少无效的频谱资源分配,在确保用户通信正常的前提下,选择减少用户的发射功率达到降低功耗的目的,并减少对其他用户造成的干扰;当 $SINR \leq SINR_{high}$ 并且 $SINR \geq SINR_{low}$ 时,说明目前用户的通信质量良好,不需要作调整。具体的算法流程如图4所示。

为了证明基于接收SINR闭环功率控制的频谱分配有效性,将改进二进制麻雀搜索算法联合基于接收SINR的闭环功率控制策略(IBSSA-SCLPC)、改进二进制麻雀搜索算法联合开环功率控制策略(IBSSA-OLPC)和基于改进二进制麻雀搜索算法的频谱分配策略(IBSSA)进行比较。系统用户效益值能直接反映用户所受的干扰,所以将系统用户效益为优化目标。图5为不同策略下的用户系统效益对比图。由图5可知,系统效益随着迭代次数的增加而增大,IBSSA-SCLPC的系统效益最高,而IBSSA-OLPC次之,IBSSA最差。这证明了功率控制可以有效地抑制用户间的干扰,基于接收SINR的闭环功率控制策略的抑制效果优于IBSSA-OLPC,明显提高了用户系统效益。

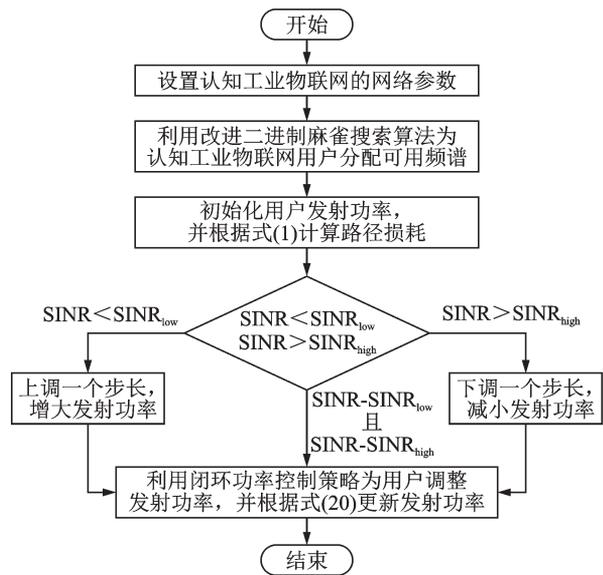


图4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of algorithm

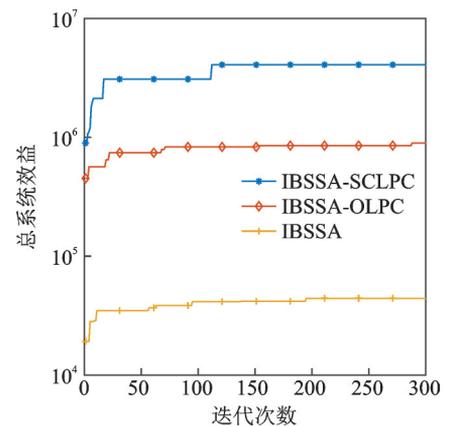


图5 不同策略下用户系统效益对比图

Fig.5 Chart of user system benefit under different strategies

### 3.3 算法复杂度分析

算法的时间复杂度反映了算法的有效性。虽然功率控制算法的复杂度会随认知工业物联网用户数目的增加而增加(复杂度为 $O(R)$ ),但算法本身复杂度不大,不影响频谱的分配。所以只考虑IBSSA算法的时间复杂度。IBSSA算法的复杂度取决于麻雀种群规模、最大迭代次数等参数。假设麻雀种群为 $N$ ,适应度函数时间为 $t$ ,在二进制转换过程,迭代次数为 $L_1$ ;在地图指南针算子中,迭代次数为 $L_2$ ;在自适应步长策略中,迭代次数为 $L_3$ ,则IBSSA的算法复杂度为 $O(N \times L_1 \times t) + O(N \times L_2 \times t) + O(N \times L_3 \times t)$ 。虽然IBSSA与SSA相比,计算复杂度有所增加,但IBSSA算法增强了全局和局部搜索能力,所以对算法的改进是有价值的。

## 4 仿真实验与结果分析

为了验证所提出的频谱分配策略能有效解决工业物联网频谱稀缺和干扰的问题,本文将基于接收SINR的闭环功率控制策略分别同SSA、BSSA和BBA<sup>[19]</sup>结合,由于用户的干扰情况会受能量效率的多少影响,所以,以最大化能量效率和公平性为优化目标,分析是否得到较优的频谱分配方案,是否有效抑制干扰。仿真测试在MATLAB R2016上进行,仿真设置网络区域范围为 $100 \times 100$ ,认知用户数 $N$ 、可用信道数 $M$ 和主用户数 $K$ 的初始值都设为10。参考文献[24-26]设置系统模型每个仿真参数,如表3所示。

图6表示基于不同群智能算法的频谱资源策略,从图6的曲线趋势可知,能量效率会跟着迭代次数的增大而增大,基于IBSSA的频谱分配方案的能量效率最大,BSSA次之,BBA最差。且IBSSA在3种频谱分配方案中是最快收敛,得到认知工业物联网中频谱分配问题的最优解。

为了表明不管在什么网络环境下,IBSSA算法均具有更优的公平性,在认知用户数与可用频谱数相等都为10时,将3种算法在30次不同网络环境下进行仿真,图7表示不同信道环境下的Jain's公平指数对比图。从图7可以看出,在不同的信道环境下,IBSSA算法的公平性均大于BSSA和BBA算法。

图8表示算法的能量效率与最大发射功率之间的联系,将不同发射功率下的能量效率独立运行30次取平均值进行比较。由图8可知,最初能量效率会跟着最大发射功率一起增加。当最大发射功率 $P_{\max} = 24$ 时,3种算法的能量效率都达到各自的最大(IBSSA的能量效率最高)后,能量效率开始随着 $P_{\max}$ 的增加而减小。虽然能量效率开始下降,但不管最大发射功率为何值,IBSSA的能量效率都优于BSSA和BBA。

图9表示在最大发射功率 $P_{\max} = 24$ 时,路径损耗因子 $a$ 变化,3种算法的能量效率也会跟着变化,将不同路径损耗因子下的能量效率独立运行30次取平均值进行比较。从图9可知,当 $a$ 增大时,能量效率会跟着减小,这是因为路径损耗因子的增大会导致信号在传输中的损耗也增大了,导致能量效率降低。但是IBSSA的能量效率虽降低,却始终优于其他算法。

图10表示SINR上限值对平均能量效率的影响,从图10的变化趋势可看出,随着SINR的增加平均能量效率也随着增大,在3种算法中,IBSSA的平均能量效率最高,BSSA次之,BBA最差。由此可知,

表3 仿真参数设置

Table 3 Simulation parameter setting

参数	数值
最大发射功率 $P_{\max}$ /dBm	24
热噪声 $P_{\text{noise}}$ /dBm	-174
发射频率波长 $\lambda$ /m	0.6
路径损耗指数 $\gamma$	3.5
影子参量 $X_g$ /dB	10
参考距离/m	1
系统带宽/MHz	1.25
路径补偿因子 $a$	0.8

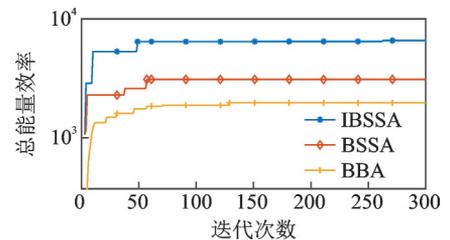


图6 不同算法能量效率对比图

Fig.6 Chart of energy efficiency of different algorithms

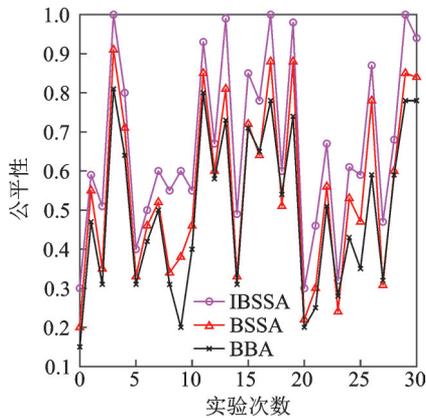


图7 不同环境下的 Jain's 公平指数

Fig.7 Jain's fair index under different algorithms

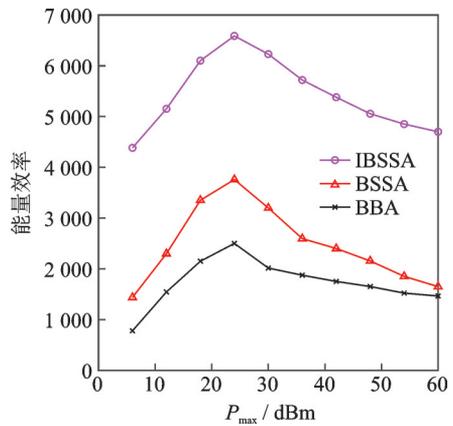


图8 3种算法在不同发射功率条件下的能量效率

Fig.8 Energy efficiency of three algorithms in different transmitting powers

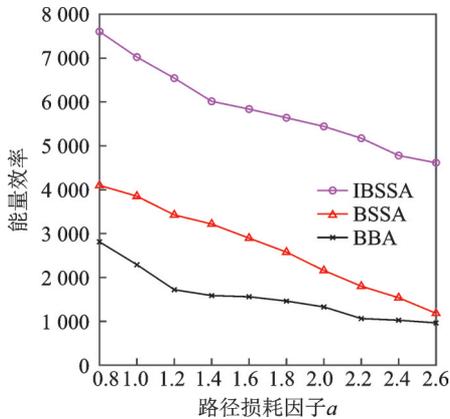


图9 3种算法不同路径损耗因子下的能量效率

Fig.9 Energy efficiency of three algorithms in different path loss factors

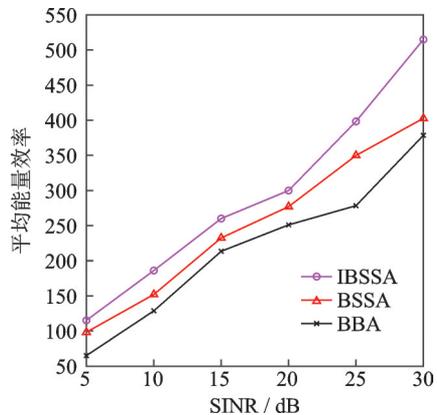


图10 3种算法不同信干噪比下的平均能量效率

Fig.10 Average energy efficiency of three algorithms in different signal-to-dryness ratios

信干噪比值的大小可以影响平均能量效率,并且设置的信干噪比越高,则越有利于认知工业物联网用户的通信。因为 SINR 值越高,那么认知工业物联网用户的功率就不须要减小 1 dB,使得认知用户通信性能良好。

图 11 表示不同发射频率波长对平均能量效率的影响,从图 11 的曲线趋势可以看出,随着发射频率波长的增加平均能量效率也随之增大,直到发射频率波长为 0.6 m 时,平均能量效率达到最大,随后开始下降。并且在不同的发射频率下,IBSSA 的平均能量效率都优于其他算法,这证明了本文提出的 IBSSA 能使网络性能达到更优。

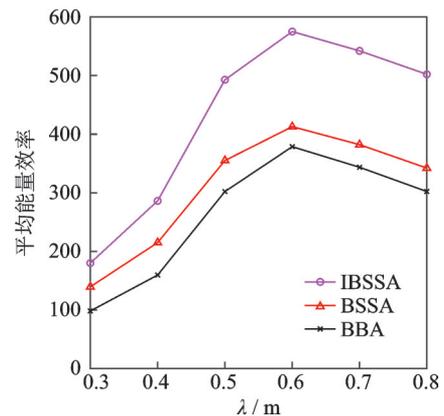


图 11 3 种算法不同发射频率波长下的平均能量效率

Fig.11 Average energy efficiency of three algorithms in different transmitting frequencies

## 5 结束语

本文针对工业物联网中的频谱资源稀缺问题,提出一种联合IBSSA算法和闭环功率控制的频谱分配策略。首先对麻雀搜索算法进行优化,解决麻雀算法面对多维函数求解精度不高、易陷于局部陷阱等问题。然后采用闭环功率控制算法减少认知工业物联网中用户之间产生的干扰。最后将改进二进制麻雀搜索算法与闭环功率控制结合来进行频谱分配。实验仿真结果表明,改进后的麻雀搜索算法的收敛速度得到了提高,同时本文所提的改进方案能有效提高系统能量效率和公平性,减少干扰。在未来的工作中,将研究CIOT中多对用户的动态资源分配,基于网络吞吐量优化进行资源分配。

### 参考文献:

- [1] JESCHKE S, BRECHER C, SONG H, et al. Industrial internet of things[M]. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017.
- [2] 杨伟,汪浩,万亚东,等.IETF 6TiSCH工业物联网研究综述:标准、关键技术与平台[J].计算机科学与探索,2020,14(3): 361-376.  
YANG Wei, WANG Hao, WAN Yadong, et al. Survey on IETF 6TiSCH industrial internet of things: Standards, key technologies and platforms[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2020, 14(3): 361-376.
- [3] 李士宁,罗国佳.工业物联网技术及应用概述[J].电信网技术,2014(3): 26-31.  
LI Shining, LUO Guojia. The overview of technologies and applications for industrial IOT[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2014(3): 26-31.
- [4] 胡江祺.工业物联网中动态资源分配机制的研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.  
HU Jiangqi. Research on dynamic resource allocation scheme in industrial internet of things[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [5] LI F, LAM K Y, SHENG Z, et al. Q-learning-based dynamic spectrum access in cognitive industrial internet of things[J]. Mobile Networks & Applications, 2018, 23(6): 1636-1644.
- [6] LIU X, ZHANG X. NOMA-based resource allocation for cluster-based cognitive industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019. DOI:10.1109/TII.2019.2947435.
- [7] ETIM I E, LOTA J. Power control in cognitive radios, Internet-of Things (IoT) for factories and industrial automation[C]// Proceedings of IECON 2016—42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.]: IEEE, 2016.
- [8] LIU X, HU S, LI M, et al. Energy-efficient resource allocation for cognitive industrial internet of things with wireless energy harvesting[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020. DOI: 10.1109/TII.2020.2997768.
- [9] ZAREEI M, VARGAS-ROSALES C, HERNANDEZ R V, et al. Efficient transmission power control for energy-harvesting cognitive radio sensor network[C]//Proceedings of 2019 IEEE 30th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops). [S.l.]: IEEE, 2019.
- [10] ASLAM S, EJAZ W, IBNKAHLA M. Energy and spectral efficient cognitive radio sensor networks for internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5(4): 3220-3233.
- [11] MOON B. Dynamic spectrum access for internet of things service in cognitive radio-enabled LPWANs[J]. Sensors, 2017, 17(12): 2818.
- [12] YANJING S, YIYU G, SONG L, et al. Optimal resource allocation for NOMA-TDMA scheme with  $\alpha$ -fairness in industrial internet of things[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1572.
- [13] RATHEE G, AHMAD F, IQBAL R, et al. Cognitive automation for smart decision-making in industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020(17): 2152-2159.
- [14] 张达敏,王依柔,徐航,等.认知智能电网中基于能效优化的频谱分配策略[J/OL].控制与决策.[2020-12-23].<https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1448>.  
ZHANG Damin, WANG Yirou, XU Hang, et al. Spectrum allocation strategy based on energy efficiency optimization in cognitive smart grid[J/OL]. Control and Decision. [2020-12-23]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1448>.
- [15] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.

- [16] DUAN H, QIAO P. Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning[J]. *International Journal of Intelligent Computing & Cybernetics*, 2014, 7(1): 24-37.
- [17] MANDAL A K, SEN R, CHAKRABORTY B. Binary owl search algorithm for feature subset selection[C]//*Proceedings of 2019 IEEE 10th International Conference on Awareness Science and Technology (ICAST)*. [S.l.]: IEEE, 2019.
- [18] ALGAMAL Z Y, QASIM M K, LEE M H, et al. High-dimensional QSAR/QSPR classification modeling based on improving pigeon optimization algorithm[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2020, 206: 104170.
- [19] 陈忠云,张达敏,辛梓芸,等.新的二进制蝙蝠算法的频谱分配优化[J].*微电子学与计算机*,2019,36(10): 27-31,36.  
CHEN Zhongyun, ZHANG Damin, XIN Ziyun, et al. Optimization of spectrum allocation for new binary bat algorithm[J]. *Microelectronics & Computer*, 2019, 36(10): 27-31, 36.
- [20] CHEN Y, XIONG Y, WANG Q, et al. Ensuring minimum spectrum requirement in matching-based spectrum allocation[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2018, 17(9): 2028-2040.
- [21] TEGOU T I, ANTONIOS T, VERGADOS D D, et al. Spectrum allocation in cognitive radio networks using chaotic biogeography-based optimization[J]. *IET Networks*, 2018, 7(5): 328-335.
- [22] MALIK A H. Uplink open loop power control for LTE HetNet[C]//*Proceedings of 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)*. [S.l.]: IEEE, 2016.
- [23] 张达敏,张绘娟,闫威,等.异构网络中基于鸽群优化算法的D2D资源分配机制[J].*控制与决策*,2020,35(12): 2959-2967.  
ZHANG Damin, ZHANG Huijuan, YAN Wei, et al. Resource allocation for D2D based on pigeon-inspired optimization algorithm in heterogeneous networks[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(12): 2959-2967.
- [24] ALAM S, AQDAS N, QURESHI I M, et al. Joint power and channel allocation scheme for IEEE 802.11af based smart grid communication network[J]. *Future Generation Computer Systems*. 2019, 95: 694-712.
- [25] 孙晨,张波.异构蜂窝网络中功率和资源分配博弈算法研究[J/OL]. *计算机工程*. [2020-12-24]. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0059207>.  
SUN Chen, ZHANG Bo. Research on game algorithm for power and resource allocation in heterogeneous cellular networks[J/OL]. *Computer Engineering*. [2020-12-24]. <https://doi.org/10.19678/j.issn.1000-3428.0059207>.
- [26] 安浩杰,彭艺,刘煜恒,等.基于改进遗传算法的D2D资源分配策略[J].*数据采集与处理*, 2021, 36(2): 357-364.  
AN Haojie, PENG Yi, LIU Yuheng, et al. D2D resource allocation strategy based on improved genetic algorithm[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2021, 36(2): 357-364.

## 作者简介:



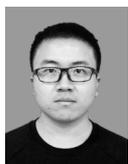
尹德鑫(1996-),女,硕士研究生,研究方向:认知无线电与优化计算, E-mail: 779620087@qq.com。



张达敏(1967-),通信作者,男,教授,硕士生导师,研究方向:计算机应用技术、智能算法、信号与信息处理, E-mail: 1203813362@qq.com。



张丽娜(1977-),女,硕士,讲师,研究方向:机械故障诊断、机械设计等。



蔡朋宸(1996-),男,硕士研究生,研究方向:认知无线电与优化计算。



秦维娜(1995-),女,硕士研究生,研究方向:认知无线电与优化计算。

(编辑:夏道家)