

# 认知无线传感器网络中能耗有效的协作频谱感测算法

虞贵财, 龙承志, 向满天

(南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 提出了一种新的认知无线传感器网络中能耗有效的协作频谱感测算法。首先, 为了降低分布式传感节点的能耗, 假定传感节点的瞬时信噪比和平均信噪比已知, 分析频谱感测节点的能耗与最优检测门限值之间的数学模型。然后, 结合感测节点选择和判决门限设定理论, 研究基于判决节点选择的有效协作频谱感测方案。理论分析和仿真结果表明, 算法有效地降低了认知传感器网络的节点总能耗, 提高了能耗效率。

**关键词:** 认知无线传感器网络; 检测概率; 能耗; 协作频谱感测; 检测门限

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

## Energy efficient cooperative spectrum sensing algorithm in cognitive wireless sensor networks

YU Gui-cai, LONG Cheng-zhi, XIANG Man-tian

(Faculty of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** A novel energy-efficient scheme of cooperative spectrum sensing in cognitive wireless sensor networks is proposed. Firstly, in order to reduce energy consumption of distributed sensor nodes, and assumed that instantaneous SNR and average SNR for each node is available. The mathematical model of spectrum sensing nodes energy consumption and optimum detection threshold are analyzed. Then, the theory of sensing node selection and decision threshold setting, combined an effective cooperative spectrum sensing scheme based on decision nodes selection is researched. The analysis and simulation results show that the proposed algorithm can effectively reduce total energy consumption in cognitive sensor networks, improve energy efficiency.

**Key words:** cognitive wireless sensor networks; detection probability; energy consumption; cooperative spectrum sensing; detection threshold

### 1 引言

认知无线传感器网络技术可使认知用户根据感测环境自适应调整传输参数, 实现机会动态接入授权用户未占用的频段<sup>[1]</sup>。认知传感器网络能否实现无缝切换, 频谱感测算法起着至关重要的作用。然而, 由于阴影、衰落和其他削弱信号因素的存在, 导致单节点感测性能的恶化, 感测准确率下降。针对单节点感测缺陷, 多传感节点协作频谱感测算法

成了研究热点问题, 协作频谱感测算法将提高频谱感测性能<sup>[2,3]</sup>。文献[4]研究了感测用户激励机制协作频谱感测算法, 仅仅考虑了信道利用率和感测准确率, 忽略了传感节点能耗效率问题。还有很多文献研究了不同的检测频谱空洞的算法, 文献[5,6]给出了稳态高斯噪声信道下的最优匹配滤波器感测算法, 算法使接收信号信噪比最大化, 然而此算法需要预先知道授权用户信号先验信息, 即信号带宽、调制类型、调制阶数、调制脉冲类型等。因此,

收稿日期: 2013-10-23; 修回日期: 2014-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61362008, 61362022); 江西省自然科学基金资助项目(20142BAB207005); 江西省科技计划项目基金资助项目(20142BBE50016); 江西省教育厅科技基金资助项目(GJJ14139)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (61362008,61362022); The Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20142BAB207005); The Science and Technology Foundation of Jiangxi Province (20142BBE50016); The Technology Foundation of Department of Education in Jiangxi Province (GJJ14139)

匹配滤波器算法在认知传感器网络场景中不适用。文献[7]研究了能量感测算法,由于实现简单成为很多文献研究最多的算法。如果接收信号的能量超过门限值,则认为信道被授权用户占用,反之,存在频谱空洞。文献[8]研究了循环平稳特征感测算法,除了噪声不存在循环平稳特征之外,不同调制信号展现的循环谱特性不同,此算法能检测出不同调制方式的通信信号,缺点是实现复杂度高。文献[6]增加协作感测节点数量能降低感测器的感测灵敏度和感测时间,然而感测节点数量增加的同时将增加系统交换信息和数据处理的负荷。文献[9]指出,得到最优感测性能并不需要所有认知节点都参与频谱感测,只有功率超过授权用户最大信噪比的认知节点参与频谱感测。传感节点感测过程中另外一个重要问题是能量有限,每个传感节点参与频谱感测都将产生能耗。

大量文献和专家对能量效率进行了研究,算法普遍应用于认知无线电系统和传感器网络,其中“censoring”和“on/off”方案成为2种主要能耗效率技术<sup>[10]</sup>。“on/off”方案中,部分传感器按照一定的休眠间隔随机地进行“off”,其他传感器进行频谱感测。文献[11]给出了一定感测性能限定下能耗最小化方案,认为所有传感器的信噪比都相等的假设不符合实际情况,且只给出了感测节点数目计算方法,并未给出哪些节点参与频谱感测。根据传感器与授权用户之间的距离和小尺度衰落特性,本文假定传感器间的信噪比不同,这将增加算法复杂度,为了使能量最小化,选择参与频谱感测节点成为需要解决的问题,而不仅仅是只要确定参与感测的节点数目那么简单。文献[12]通过使虚警概率和漏警概率之和最小化来确定能量感测算法的最优门限,然而并未得出最佳门限值。文献[13]给出了总误码率最小化时的最优判决门限,集中分析推导了瑞利衰落信道和 Nakagami- $m$  衰落信道下的平均漏警概率的闭合表达式。文献[14]研究了漏警概率限定条件下虚警概率最小化问题,给出了基于启发式算法的次优方案,算法基于分配不同的判决门限与参与协作频谱感测节点。

由于授权用户通信信号先验知识的简单独立性,本文在授权用户感测节点采用能量感测方法。假定每个感测节点的信噪比和各节点与数据融合中心的距离已知,给出了在全局检测概率和虚警概率限定条件下,基于确定最优感测节点和感测门限

的能耗有效的协作频谱感测算法。本文的主要贡献体现在以下几点:

1) 假定传感节点间的  $SNR$  不同,且节点的瞬时  $SNR$  已知的情况下,最小化感测节点的能量消耗和找到最佳判决门限值;

2) 考虑得到瞬时  $SNR$  的困难,在分析传感节点的选择和判决门限设定过程中,用平均  $SNR$  代替,然后推导节点的平均检测概率,同时用 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 方案得到最优条件,为了探索感测节点的感测和最优门限值,采用迭代算法;

3) 在节省更多能量的情况下,研究协作频谱感测的判决节点选择,为进一步解决问题,引入判决节点标准方案,即感测节点的选择和检测门限值的设定。

## 2 系统模型

本文分析的系统考虑  $N$  个传感节点,1 个授权用户和 1 个数据融合中心,如图 1 所示。

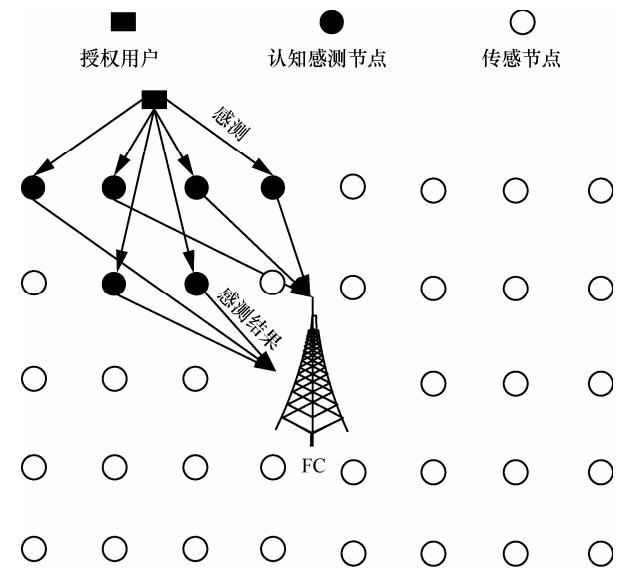


图1 协作频谱感测结构

设感测时间  $\tau$ , 抽样频率为  $f_s$ , 那么抽样数为  $\tau f_s$ , 且为整数。

那么二进制假设数学模型为

$$\begin{cases} H_1 : x_j(k) = h_j(k)s(k) + w_j(k), k = 1, 2, \tau f_s \\ H_0 : x_j(k) = w_j(k), j = 1, 2, N \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x_j(k)$  为第  $j$  个传感节点的第  $k$  个抽样值,  $s(k)$  为信号抽样值,  $h_j(k)$  为感测节点与授权用户之间的信道增益;  $w_j(k)$  为噪声抽样值, 服从零均值,  $\sigma_w^2$  方差的统计独立同分布的高斯噪声, 可以得

到能量检测方案的判决结果表达式

$$E_j = \sum_{k=1}^{\tau f_s} x_{jk}^2 \begin{cases} \geq \gamma & H_1 \\ \leq \gamma & H_0 \end{cases} : \begin{cases} D_j = 0, & \text{if } H_0 \\ D_j = 1, & \text{if } H_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\gamma$  为判决门限, 如果接收信号的能量大于  $\gamma$ , 则输出判决变量  $D_j = 1$ , 即信道被占用, 若接收信号能量小于  $\gamma$ , 则输出判决变量  $D_j = 0$ , 即信道空闲。

因此, 可以得到虚警概率和检测概率表达式<sup>[11,15]</sup>

$$\begin{cases} P_{f_j} = P(E_j > \gamma | H_0) = \frac{\Gamma(\tau f_s, \gamma/2)}{\Gamma(\tau f_s)} \\ P_{d_j} = P(E_j > \gamma | H_1) = Q_{\tau f_s}(\sqrt{2\alpha_j}, \sqrt{\gamma}) \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $\Gamma(\tau f_s, \gamma/2)$  为不完全伽马方程, 即  $\Gamma(a, b) = \int_b^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$ ,  $\Gamma(a)$  为伽马方程,  $Q_m(a, b)$  为通用马库斯  $Q$  方程, 且

$$Q_m(a, b) = \frac{1}{a^{m-1}} \int_b^{\infty} t^m e^{-\left(\frac{t^2+a^2}{2}\right)} I_{m-1}(at) dt \quad (4)$$

其中,  $I_{m-1}(\cdot)$  为第一类  $m-1$  阶修正贝塞尔函数。

多径衰落和阴影衰落将导致单节点频谱感测算法的感测性能下降, 协作频谱感测算法能很好地克服此现象<sup>[16]</sup>, 应用协作频谱感测“OR”算法得到如下虚警概率和检测概率表达式

$$\begin{cases} P_f = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_{f_j}) \\ P_d = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - P_{d_j}) \end{cases} \quad (5)$$

本文给出一种有效的协作频谱感测算法, 算法中选择部分传感节点参与频谱感测, 在限定全局检测概率和虚警概率一定的条件下设定最优检测门限值, 此时检测性能关系式可写成

$$\begin{cases} P_f = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \rho_j P_{f_j}) \\ P_d = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \rho_j P_{d_j}) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\rho_j$  为分配的编号索引, 取“0”或“1”, 当  $\rho_j = 0$  时表示第  $j$  个传感节点不参与频谱感测, 反之, 则表示第  $j$  个传感节点参与频谱感测。此时, 协作频谱感测的总能量<sup>[11]</sup>为

$$E_n = \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{s_j} + E_{t_j}) \quad (7)$$

其中,  $E_{s_j}$  用于信道感测、判决信道状态、信号调制与抽样等, 同时假设所有传感节点的  $E_{s_j}$  相同, 因

此可令  $E_{s_j} = E_s$ , 第二部分  $E_{t_j}$  为每个传感节点可靠传输 1 bit 至 FC 处消耗的能量。  $E_{t_j}$  源于无线电波的能量和功率, 且

$$E_{t_j}(d_j) = E_{t-elec} + e_{amp}(d_{f_j})^2 \quad (8)$$

其中,  $E_{t-elec}$  为发送电磁波的能量,  $e_{amp}$  为振幅,  $d_{f_j}$  为第  $j$  个传感节点到 FC 之间的距离。在 IEEE 802.15.4/ZigBee 通信制式中, 如果接收机的灵敏度满足  $-90$  dBm, 那么  $E_s = 190$  nJ,  $E_{t-elec} = 80$  nJ,  $e_{amp} = 40.4$  pJ/m<sup>2</sup><sup>[17,18]</sup>。

在推导全局检测概率和虚警概率时, 要求在限定全局检测概率和虚警概率一定的条件下设定最优检测门限值, 并给出一种有效的协作频谱感测算法。本文中假设给定限定条件为  $P_d \geq \beta$  和  $P_f \leq \alpha$ , 好的频谱感测算法的目标为  $P_d \rightarrow 1$  和  $P_f \rightarrow 0$ 。  $E_n$  的取值与  $P_d$  和  $P_f$  有关,  $P_d$  和  $P_f$  的取值与  $P_{f_j}$  和  $P_{d_j}$  有关,  $P_{f_j}$  和  $P_{d_j}$  的取值与判决门限  $\gamma$  有关, 判决门限  $\gamma$  也决定频谱感测过程中节点的选择, 因此在限定  $P_d$  和  $P_f$  的情况下, 可得到适当的门限值, 使传感节点能量消耗最优化, 即

$$\begin{aligned} \min_{\rho_{j,y}} E_n &= \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{s_j} + E_{t_j}) \\ \text{s.t. } & P_f \leq \alpha \\ & P_d \geq \beta \\ & \rho_j \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (9)$$

因  $P_f$  为独立于  $\alpha_j$  的  $\rho_j$  增函数, 则最大传感节点数由  $P_f = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \rho_j P_{f_j})$  和  $P_f \leq \alpha$  得到

$$n \leq \left\lfloor \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln(1-P_{f_j})} \right\rfloor = M \quad (10)$$

其中,  $M$  最大传感节点数,  $n = \sum_{j=1}^N \rho_j$  为参与频谱感测的节点数, 因此式(10)可以修正为

$$\begin{aligned} \min_{\rho_{j,y}} E_n &= \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{s_j} + E_{t_j}) \\ \text{s.t. } & \sum_{j=1}^N \rho_j \leq M \\ & P_d \geq \beta \\ & \rho_j \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (11)$$

下面分析限定全局检测概率和虚警概率条件下节点选择分析和检测门限设定方法。

### 3 瞬时信噪比环境下的感测节点选择分析和检测门限设定算法分析

由上面分析可知,  $P_d$  与  $P_f$  为  $\rho_j$  的增函数, 且为  $\gamma$  的减函数, 文献[19]假定  $\rho_j$  为取值“0”或“1”的离散量。为了简化分析, 本文假定  $\rho_j$  取值为连续量, 且满足  $\rho_j \in [0,1]$ , 因此式(11)可写为

$$\begin{aligned} \min_{\rho_j, \gamma} E_n &= \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{sj} + E_{tj}) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^N \rho_j &\leq M \quad (12a) \\ P_d &\geq \beta \quad (12b) \\ \rho_j &\in [0,1] \quad (12c) \end{aligned} \quad (12)$$

在目标方程中, 式(12a)和式(12c)为  $\rho_j$  的凸优化表达式, 虽然上式为非标准的凸优化问题, 但可以局部最优代替全局最优。应用拉格朗日算子和 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件, 传感节点具有优先感测功能。从这点入手, 考虑恰当的门限值, 在固定门限值  $\gamma$  下得到参数  $\rho_j$ , 因此拉格朗日算子如下<sup>[20,21]</sup>。

$$L(\rho_j, \lambda, \eta) = \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{sj} + E_{tj}) - \lambda(P_d - \beta) + \eta(\sum_{j=1}^N \rho_j - M) \quad (13)$$

其中,  $\lambda$  和  $\eta$  分别为(12)中条件(12a)和(12b)的乘数因子, 按照 KKT 条件, 可得<sup>[19,20]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \rho_j} &= (E_{sj} + E_{tj}) + \eta - \lambda P_{d_j} \prod_{k \neq j} (1 - \rho_k P_{d_k}) = 0 \\ \forall j &\in \{0,1,2, \dots, N\} \end{aligned} \quad (14)$$

为了确保每个传感节点的优先频谱感测权限, 本文引入以下代价函数<sup>[19]</sup>

$$\text{cost}(j) = E_{sj} + E_{tj} - \lambda P_{d_j} \quad (15)$$

给出了代价函数, 选择最小代价函数的节点作为频谱感测节点, 直到限制条件  $P_d \geq \beta$ , 由拉格朗日算子和代价函数, 得出下列条件不等式<sup>[20]</sup>

$$\begin{cases} \lambda(P_d - \beta) = 0 \rightarrow \begin{cases} \lambda = 0, & P_d > \beta \quad (16a) \\ \lambda \neq 0, & P_d = \beta \quad (16b) \end{cases} \\ \eta(\sum_{j=1}^N \rho_j - M) = 0 \rightarrow \begin{cases} \eta = 0, & \sum_{j=1}^N \rho_j < M \quad (16c) \\ \eta \neq 0, & \sum_{j=1}^N \rho_j = M \quad (16d) \end{cases} \end{cases}$$

上式表明, 传感节点的选择影响式(16c)和(16d)的结果, 如果所选择频谱感测的节点数目小于  $M$ , 则  $\eta = 0$ , 反之, 则  $\eta \neq 0$ 。可证明, 式(16b)为最优

条件, 因为  $P_d$ 、 $P_f$  和  $E_n$  为  $\rho_j$  的增函数, 因此需要减小  $\rho_j$  到一定的值, 使  $P_d = \beta$ , 且能得到更小的  $P_f$  和  $E_n$ , 因此满足  $\lambda \neq 0$ 。

文献[19]给出了一种新的算法, 即修正的能量有效传感节点选择算法(MEES), 此算法复杂度为线性的。在预先设定门限值时, 此算法不失为一种好的降低能耗的算法。为节省更多的能量, 本节将给出  $\lambda$  和  $\gamma$  联合最优算法。图2给出了检测门限与总能量消耗之间的关系图, 事实上, 需要研究寻找一些可行的点和集合, 在满足检测性能条件下能耗最小化<sup>[20]</sup>。本文分析中, 可行集合取决于变量  $\gamma$  和  $\rho_j$ , 同时可知, 门限在某些值处不存在可行点。由图3可知, 当传感节点数一定时, 随着判决门限值  $\gamma$  得增加, 全局检测性能下降。随着判决门限值的减小, 只需更少的传感节点就能维持相同的检测性能, 因此总的能耗也将降低。

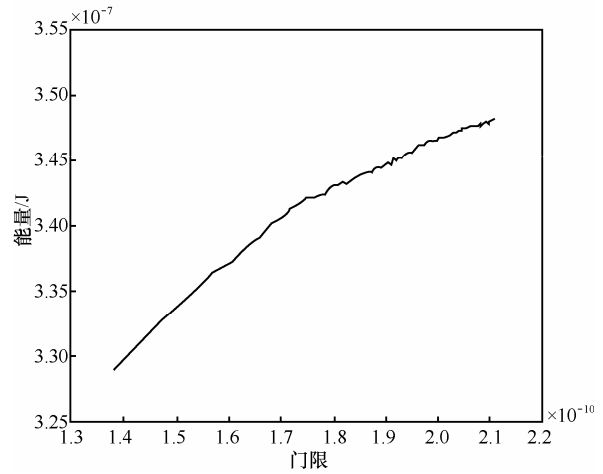


图2 能量与判决门限关系

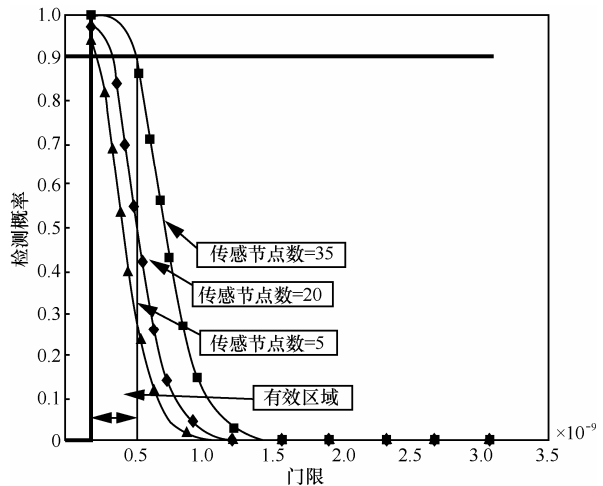


图3 判决门限变化时检测概率与节点数关系

综上所述，需要找到一个位于可行集合内的最小判决门限值，使检测概率值和虚警概率值满足限制条件。

为了得到最小的门限值  $\gamma$ ，首先需要找到  $\gamma$  的分布范围，即可行的非空集合。为了得到门限值的可行分布集合，采用最大检测概率算法 (MPDA)。采用此算法，计算所有传感节点的每个门限值所对应的检测概率并按照降序排列，然后根据感测节点的最大数目，可以确定最大检测概率的传感节点，这些传感节点选择为感测节点直到超出  $P_d \geq \beta$  条件。如果此集合为非空集，则问题得到解决。判决门限值  $\gamma$  的更新服从以下准则：如果全局检测概率达到了  $P_d \geq \beta$ ，那么判决门限值  $\gamma$  增大，这样可得到判决门限值的上界。接下来找门限值  $\gamma$  的下界，应用 MPDA 获取下界，不同之处在于，如果全局检测概率达到了  $P_d \geq \beta$ ，那么判决门限值  $\gamma$  减小，过程中采用伪随机码。

二分算法用于确定检测门限值的分布范围。

```

 $\lambda_{\min} = 0$ 
 $\lambda_{\max} = C$  (足够大的数)
 $\gamma_{\max} = a\sigma_w^2$  (噪声功率的倍数)、
 $\gamma_{\min} = 0$ 
 $\varepsilon$  (足够小的数)
 $i = 1$  (迭代次数)
while ( $|\gamma_{\max} - \lambda_{\min}| > \varepsilon$ )
     $\gamma = (\gamma_{\max} + \lambda_{\min}) / 2$ 
     $n = 0$  (传感节点数)
     $P_{f_j} = \frac{\Gamma(\tau f_s, \gamma(k, 1) / 2)}{\Gamma(\tau f_s)}$  (计算每个传感节点

```

的虚警概率)

$$\left\lfloor \frac{\ln(1-\alpha)}{\ln(1-P_{f_j})} \right\rfloor = M \quad (\text{计算})$$

$P_{d_j} = Q_{\tau f_s}(\sqrt{2\alpha_j}, \sqrt{\gamma})$  (计算每个传感节点的检测概率)

集合 ( $P_{d_j}$ , 'descend')

while (选择  $n$  个更高优先权的传感节点，且  $n < M$ )

$$\text{计算 } P_d = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \rho_j P_{d_j})$$

if  $P_d \geq \beta$ , then

break

```

end if
end while
if  $P_d \geq \beta$  then
     $\gamma_{\min} = \gamma$ 
else
     $\gamma_{\max} = \gamma$ 
end if
 $i = i + 1$ 
end while

```

采用同样的方法得到  $\gamma_{\min}$

```

if  $P_d \geq \beta$ 
     $\gamma_{\max} = \gamma$ 
else
     $\gamma_{\min} = \gamma$ 
end if

```

通过以上算法得到了判决门限值  $\gamma$  的分布区间，即  $\gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max}$ ，其中最小的判决门限值  $\gamma_{\min}$  选为最佳判决门限，既降低了能量消耗，又保证了检测性能。在此基础上，应用 MEESS 算法选择感测节点，这种算法本文中称为最优门限和感测节点选择的联合算法 (JOSTSN)。算法中， $\gamma$  和  $\rho_j$  同时对对应取值，算法复杂度为  $O(N)$ 。由式(13)和式(14)可得

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma} = -\lambda \left( \sum_{j=1}^N \left[ -\left( \sqrt{\frac{\gamma}{2\alpha_j}} \right)^{\tau f_s - 1} e^{-\left( \frac{\gamma + 2\alpha_j}{2} \right)} I_{\tau f_s - 1} \left( \sqrt{\gamma 2\alpha_j} \right) \right] \cdot \prod_{k \neq j} (1 - \rho_k P_{d_k}) \right) = 0 \quad (17)$$

与前面计算方法类似，得到代价方程和不等式类似于式(17)和式(18)，解决此类问题的流程如图 4 所示。

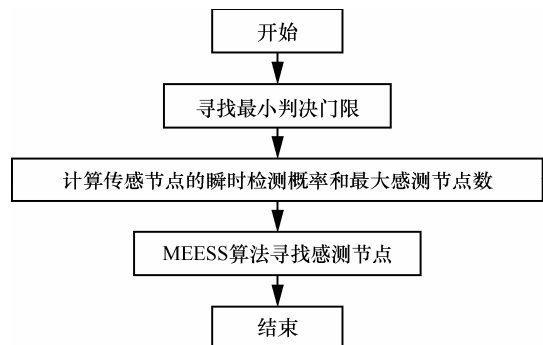


图 4 寻找感测节点和最优检测门限的 JOSTSN 算法

#### 4 平均信噪比环境下的感测节点选择和检测门限设定算法分析

在前面几节分析了瞬时信噪比环境下感测节点的选择和检测门限设定算法, 然而, 在实际场景中, 获得瞬时信噪比较困难, 因此, 通常采用平均信噪比代替瞬时信噪比。这样就得到衰落信道下的平均检测概率

$$\overline{P_{d_j}} = \int_{\alpha_j} P_{d_j} f_{\alpha_j}(\alpha_j) d\alpha_j, \forall j \in N \quad (18)$$

其中,  $f_{\alpha_j}(\alpha_j)$  为 SNR 在衰落信道下的概率密度函数, 如果为瑞丽衰落信道, 则  $f_{\alpha_j}(\alpha_j)$  服从指数分布

$$f_{\alpha_j}(\alpha_j) = \frac{1}{\alpha_j} e^{-\frac{\alpha_j}{\alpha_j}}, \forall j \in N, \alpha_j \geq 0 \quad (19)$$

其中,  $\overline{\alpha_j}$  为传感节点对应的平均信噪比, 服从如下关系式

$$\overline{\alpha_j} = \exp\left(\frac{E[n_j]10^2}{200}\right) \frac{P_t}{\sigma_u^2} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_{p_j}}\right)^2 E[g_j^2] \quad (20)$$

其中,  $E[\cdot]$  表示期望符号,  $g_j$  和  $n_j$  分别对应衰落和阴影的影响,  $P_t$  为授权用户发射功率,  $d_{p_j}$  为传感节点到授权用户之间的距离。因此, 可得到平均检测概率  $\overline{P_{d_j}}$  的闭合表达式

$$\overline{P_{d_j}} = e^{-\frac{\gamma}{2}} \sum_{k=0}^{\tau f_s - 2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\gamma}{2}\right)^k + \left(\frac{1 + \overline{\alpha_j}}{\overline{\alpha_j}}\right)^{\tau f_s - 1} \left( e^{\frac{-\gamma}{2(1 + \overline{\alpha_j})}} - e^{-\frac{\gamma}{2}} \sum_{k=0}^{\tau f_s - 2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\gamma \overline{\alpha_j}}{2(1 + \overline{\alpha_j})}\right)^k \right) \quad (21)$$

式(21)中, 平均检测概率  $\overline{P_{d_j}}$  取决于第  $j$  传感节点的平均信噪比  $\overline{\alpha_j}$ , 而虚警概率  $P_{f_j}$  与信噪比无关, 因为  $P_{f_j}$  是在无授权信号情况下的计算结果, 即  $P_{f_j} / H_0$ 。与前面分析类似, 所有传感节点的平均检测概率  $\overline{P_{d_j}}$  相同, 因此, 可得到全局平均检测概率和平均虚警概率

$$\begin{cases} \overline{P_f} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \rho_j \overline{P_{f_j}}(\tau)) \\ \overline{P_d} = 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \rho_j \overline{P_{d_j}}(\tau)) \end{cases} \quad (22)$$

因此, 传感节点能量消耗优化为

$$\begin{aligned} \min_{\rho_j, \gamma} E_n &= \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{s_j} + E_{t_j}) \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^N \rho_j &\leq M \quad (23a) \\ \overline{P_d} &\geq \beta \quad (23b) \\ \rho_j &\in [0, 1] \quad (23c) \end{aligned} \quad (23)$$

为了更好解析上述问题, 采用凸优化方法, 因此拉格朗日方程如下。

$$\begin{aligned} L(\rho_j, \lambda, \eta) &= \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{s_j} + E_{t_j}) - \\ &\lambda (\overline{P_d} - \beta) + \eta (\sum_{j=1}^N \rho_j - M) \end{aligned} \quad (24)$$

参照前面分析方法, 这样同样采取 JOTSN 算法, 获取感测节点和检测门限集, 不同之处在于, 用平均信噪比  $\overline{\alpha_j}$  代替瞬时信噪比  $\alpha_j$ 。因为在实际场景中, 瞬时信噪比的估计比较困难, 而平均信噪比也具有一定的普适性, 尤其估计的时间  $\tau$  取得足够短的话, 平均信噪比更接近瞬时值。

#### 5 能量效率优化的判决节点选择方法

在前面几节中, 分析了能耗最小算法, 即感测节点的选择和检测门限的设定。感测节点可以直接发送感测结果到融合中心, 也可以先将结果发送到判决节点, 判决节点先对感测结果进行判决, 然后由判决节点将结果发送至融合中心, 如图 5 所示。

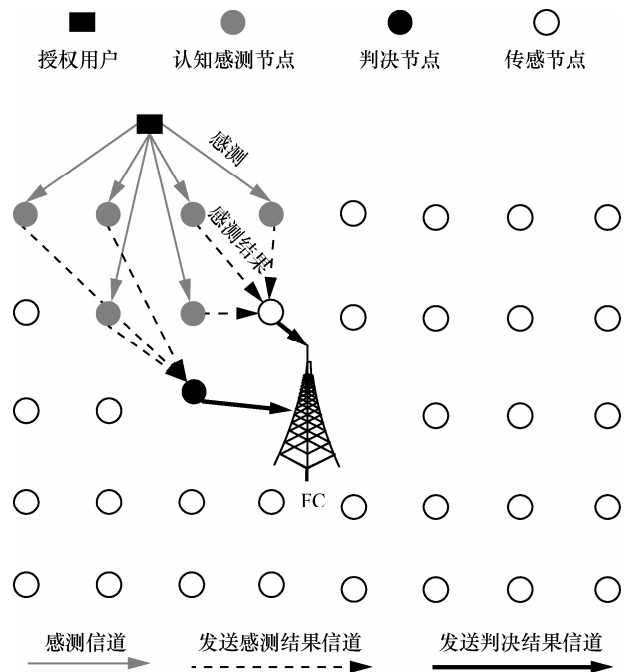


图 5 修正的协作频谱感测结构

图1所示为感测节点直接将感测结果发送到融合中心，当感测节点离融合中心较远时，将消耗更多的能量，而本文降低能耗也是一个研究点。如图5所示，适当减小了较远的感测节点与融合中心之间距离，这样将有效减小感测节点的能耗。因此，为了减小感测节点的能耗且满足检测性能，不仅涉及到感测节点的选择和判决门限的设定，还需要有效的选择判决节点。分析过程中，假定传感节点的平均信噪比 $\bar{\alpha}_j$ 相同，因此，总的能耗表达式如下。

$$E_n = \sum_{i=1}^N \rho_i \sum_{j=1}^N E_s + \pi_j \cdot \left( E_{t-elec} + e_{amp} \left( (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right) + (d_{f_j})^2 \right) \quad (25)$$

其中， $\pi_j$ 为判决节点的分配选择编号索引，满足 $\pi_j \in \{0,1\}$ ，1表示相应的传感节点被选择为判决节点，0表示相应的传感节点未被选择为判决节点； $x_i$ 和 $y_i$ 表示第 $i$ 个传感节点的位置信息； $d_{f_j}$ 表示节点 $j$ 到融合中心的距离。因此，新的条件表达式如下。

$$\begin{aligned} & \min_{\rho_i, \pi_j} E_n \\ & \text{s.t. } \sum_{i=1}^N \rho_i \leq M \\ & 1 - \prod_{j=1}^N (1 - \rho_j \bar{P}_{d_j}) \geq \beta \\ & \rho_j \in \{0,1\} \\ & \pi_j \in \{0,1\} \\ & \sum_{j=1}^N \pi_j = 1 \\ & \sum_{j=1}^N \rho_j \pi_j = 0 \end{aligned} \quad (26)$$

最后一个条件 $\sum_{j=1}^N \rho_j \pi_j = 0$ 意味着一个节点不可能同时被选择为感测节点和判决节点。

要得到式(26)的解，本文中采用穷举法，其中 $N$ 个传感节点可能被选为判决节点，并且每个节点存在一个可行判决门限集合，选择出判决节点以后，其他传感节点被选择为感测节点。这些感测节点在满足检测概率 $P_d \geq \beta$ 的条件下，可节省传输能量参与感测，此算法的算法复杂度为 $N^2 \sum_{j=1}^M \binom{N-1}{j}$ ，可知，此算法具有较高的复杂度，因此降低算法复杂度成为需要解决的问题。本文中考虑将 $\rho_j$ 和 $\pi_j$ 离散变量变成连续变量，因此条件值将映射为离散空间。对式(26)采用凸优化方法，得到拉格朗日方程

$$L = E_n + \eta \left( \sum_{j=1}^N \rho_j - M \right) - \lambda (P_D - \beta) + \omega \left( \sum_{j=1}^N \pi_j - 1 \right) - \nu \left( \sum_{j=1}^N \rho_j \pi_j - 0 \right) \quad (27)$$

如果不考虑式(26)最后一个限制条件 $\sum_{j=1}^N \rho_j \pi_j = 0$ ，但是一个传感节点不能同时选为感测节点和判决节点，利用KKT条件可得

$$\frac{\partial L}{\partial \rho_j} = \sum_{j=1}^N E_s + \pi_j (E_{t-elec} + e_{amp} ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2) + (d_{f_j})^2) - \lambda P_{d_j} \Pi_{k \neq j} (1 - \rho_k P_{d_k}) + \eta - \nu \pi_j = 0 \quad (28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \pi_j} = \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{t-elec} + e_{amp} ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2) + (d_{f_j})^2) + \omega - \nu \rho_j = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \gamma} = -\lambda \left( \sum_{j=1}^N \left[ - \left( \sqrt{\frac{\gamma}{2\alpha_j}} \right)^{\tau_{f_s}-1} e^{-\left\{ \frac{\gamma+2\alpha_j}{2} \right\}} I_{\tau_{f_s}-1} \left( \sqrt{\gamma 2\alpha_j} \right) \right] \Pi_{k \neq j} (1 - \rho_k P_{d_k}) \right) = 0 \quad (30)$$

其中，式(28)的结果与第3节类似，传感节点被优先选择为感测节点的代价函数如下。

$$\text{cost}(i, j) = E_s + E_{t-elec} + e_{amp} ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2) + (d_{f_j})^2 - \lambda P_{d_j} \quad (31)$$

此方程表示为当节点 $j$ 被选为判决节点时与节点 $i$ 的代价方程，传感节点被优先选择为判决节点时的代价方程表示为

$$\text{cost}_{DN}(j) = \sum_{j=1}^N \rho_j (E_{t-elec} + e_{amp} ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2) + (d_{f_j})^2) \quad (32)$$

给出了代价函数，选择最小代价函数的节点作为频谱感测节点，直到限制条件 $P_d \geq \beta$ ，由拉格朗日算子和代价函数，得出下列条件不等式

$$\lambda (P_D - \beta) = 0 \rightarrow \begin{cases} \lambda = 0, & P_d > \beta \\ \lambda \neq 0, & P_d = \beta \end{cases} \quad (33a)$$

$$\eta \left( \sum_{j=1}^N \rho_j - M \right) = 0 \rightarrow \begin{cases} \eta = 0, & \sum_{j=1}^N \rho_j < M \\ \eta \neq 0, & \sum_{j=1}^N \rho_j = M \end{cases} \quad (33b)$$

$$\omega \left( \sum_{j=1}^N \pi_j - 1 \right) = 0 \rightarrow \begin{cases} \omega = 0, & \sum_{j=1}^N \pi_j \neq 1 \\ \omega \neq 0, & \sum_{j=1}^N \pi_j = 1 \end{cases} \quad (33c)$$

$$\nu \left( \sum_{j=1}^N \rho_j \pi_j - 0 \right) = 0 \rightarrow \begin{cases} \nu = 0, & \rho_j \pi_j \neq 0 \\ \nu \neq 0, & \rho_j \pi_j = 0 \end{cases} \quad (33d)$$

从上式可以知道式(33a)和式(33b)与式(16)相同,式(33c)表明只有一个节点可以被选择为判决节点,因此 $\sum_{j=1}^N \pi_j = 1$ 满足条件,式(33d)表明一个节点不能同时选择为感测节点和判决节点,因此 $\rho_j \pi_j = 0$ 满足条件。

采用以上限定条件,利用 JOTSN 算法对式(26)进行求解。本算法的每次迭代采用最小判决门限值  $\gamma$ ,通过迭代,  $\lambda$  不断进行更新,计算代价方程(31),因此可以得到满足限制条件  $P_d \geq \beta$  时的最小感测节点数。然后,计算代价方程(32),选择最小值作为判决节点,直到迭代计算出结果。图 6 为采用 JOTSN 算法搜索判决节点的流程。

### 6 数值结果和仿真结果

仿真环境,无线传感器网络的传感节点从 5 到 50,均匀的分布在  $200 \times 200 \text{ m}^2$  的正方形场景,数据融合中心(FC)位于正中间,授权用户随机的位于场景任何位置。仿真参数  $\alpha = 0.1$  和  $\beta = 0.1$ ,传输路径为自由传输路径损耗模型,感测时间为  $6 \mu\text{s}$ ,抽样数为 6,进行 1000 次蒙特卡洛仿真。

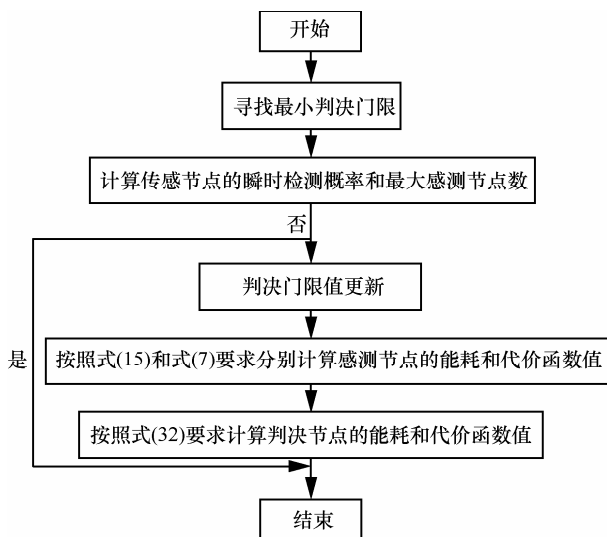


图 6 搜索最优判决节点的 JOTSN 算法流程

本文给出的算法结果分别与以下算法进行比较,判决门限值  $\gamma$  恒定且为噪声功率的倍数,其他经典算法如下。

1) MEESS: 在相关参考文献有介绍。

2) 最小能量算法(MEA, minimum energy algorithm): 此算法中,在满足检测概率  $P_d \geq \beta$  的条件下,传感节点按照它们到融合中心和其他节点之间

的距离升序排列,其中最小距离的信道选择为感测信道,且感测节点数小于  $M$ 。如果 MEA 算法能够满足  $P_d \geq \beta$  限定条件,那么因为被选节点到 FC 的距离最小使结果接近最佳。

3) 最大检测概率算法(MPDA, maximum probability of detection algorithm): 此算法中,传感节点按照他们之间的  $P_{d_j}$  大小降序排列。因此,最大的  $P_{d_j}$  传感节点被选为感测节点,且满足感测节点数小于  $M$  和  $P_d \geq \beta$ 。

4) 随机传感节点选择算法(RSSA, random sensor selection algorithm): 此算法中,传感节点被随机的选择为感测节点,同样满足感测节点数小于  $M$ ,此算法具有最小的复杂度。

#### 6.1 瞬时信噪比环境下的感测节点选择和检测门限设定算法仿真

本节中,假定每个传感节点的瞬时信噪比可以得到,图 7 给出了不同传感节点数目时可成功选择为感测节点的百分数。

从图 7 可知,由于自适应设置判决门限的原因, JOTSN 算法的成功搜索百分数最大,算法都是在满足检测概率限定条件  $P_d \geq \beta$  进行的。MEA 和 RSSA 算法的成功率最低,且随着传感节点数目的增加,成功率达到瓶颈极限,原因是因为传感节点数越多,那么节点分布越密集,离 FC 越近的节点数目就越多,因此,根据 MEA 算法原理,距离 FC 最小的节点被选为感测节点可能有小的检测概率。MEESS 算法与 MPDA 算法性能重叠。

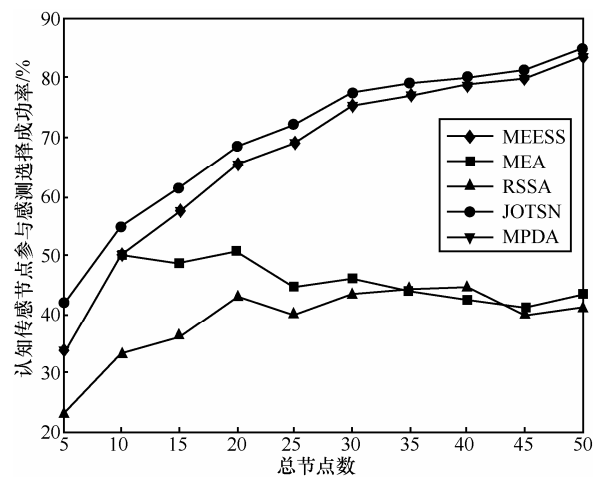


图 7 不同传感节点数几种算法的搜索成功率

图 8 给出了不同传感节点数算法的平均能耗,可以看出,在  $P_d \geq \beta$  限定条件下,设定检测门限值

有利于节约传感节点的能耗。相比 JOSTN 算法，MEESS 算法需更大能耗，因为 MEESS 算法的检测门限为恒定值。采用 MEA 算法搜索，传感节点的能耗最大，这是因为此算法选择感测节点的方式是根据节点到 FC 的距离为参数，因此，MEA 算法的感测节点的检测概率小，为了满足检测概率  $P_d \geq \beta$  限定条件，需要更多的节点参与频谱感测。

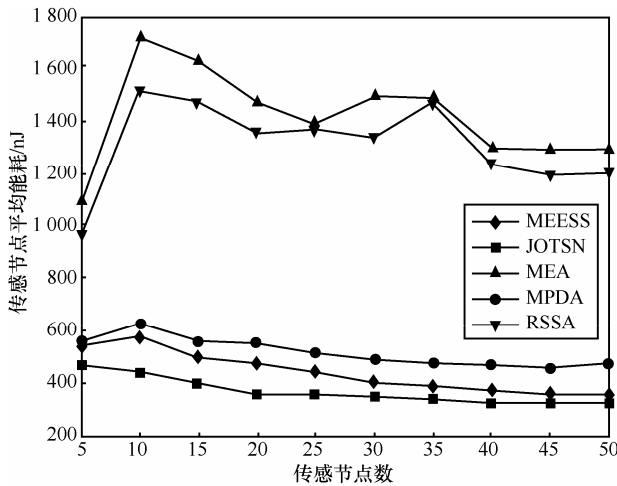


图 8 瞬时信噪比时不同传感节点数几种算法的能耗

图 9 为不同算法传感节点被选为感测节点的平均数与节点总数的关系，由图 9 可以看出，在达到检测概率限定条件  $P_d \geq \beta$  下，JOSTN 需要更少的感测节点参与频谱感测。MEA 和 RSSA 算法需要更多感测节点参与频谱感测，节点的总能耗更大。

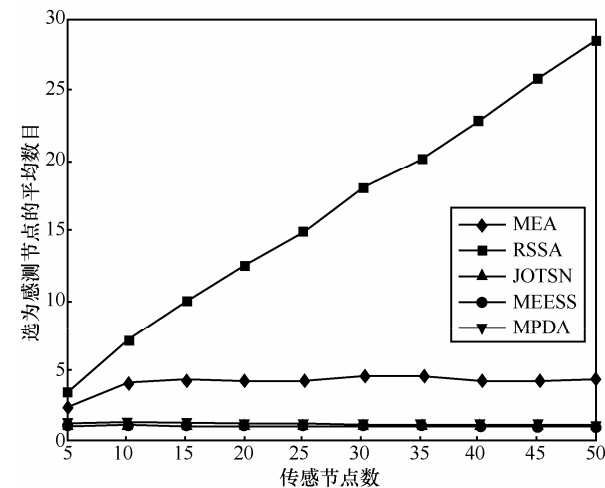


图 9 不同算法传感节点被选为感测节点的平均数与节点总数的关系

### 6.2 平均信噪比下的感测节点选择、检测门限设定、判决节点选择算法仿真

本节仿真与前面对应，采用平均信噪比和平均检

测概率。图 10 为不同算法成功搜索感测节点概率与节点总数关系，从图 10 可以看出，JOSTN 和 JOSTN&DN 算法具有最大的成功率，而 RSSA 的成功率最小。随着感测节点总数的增加，MEESS、MEESS&DN、MPDA 和 JOSTN&DN 算法的成功率很接近，同时，随着感测节点总数的增加，MEA 和 RSSA 算法的性能下降或变化缓慢趋势。与图 7 相比，图 10 的成功搜索概率增加，原因是不知节点的瞬时信噪比，更多的节点满足平均全局检测概率条件被选为感测节点，因此与瞬时信噪比条件相比，此时导致更大的能耗。

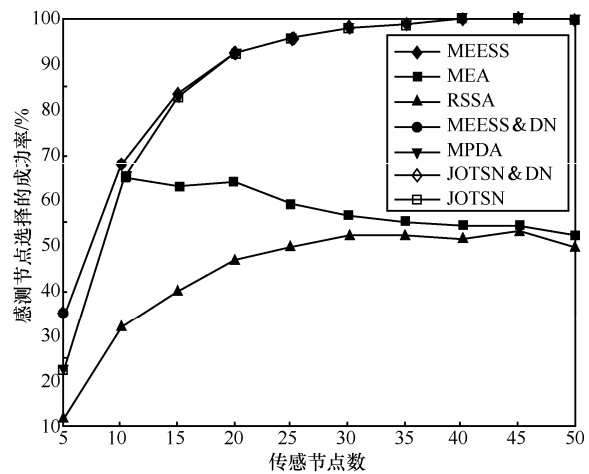


图 10 不同算法成功搜索感测节点概率与节点总数关系

图 11 给出了不同传感节点数算法的平均能耗，从图 11 可知，判决节点的选择有助于节约传感节点的能耗。与 JOSTN 相比，JOSTN&DN 算法的能耗更低；为保证一定的检测概率，MEA 算法的能耗更大；与 JOSTN 和 JOSTN&DN 算法相比，MEESS 和 MEESS&DN 需要更大的能耗。因此，本文提出的算法有效的降低了能耗，效果明显。

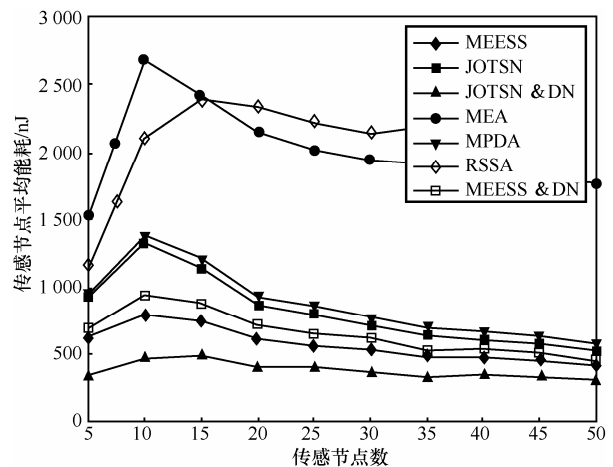


图 11 平均信噪比时不同算法的能耗

图 12 为不同算法传感节点被选为感测节点的平均数与节点总数的关系。由图 12 可以看出, 本文提出的算法参与感测的节点数更少、更节约能耗、解决问题方法更优。与图 9 相比, 为了满足一定的检测概率, 平均信噪比下不同算法传感节点被选为感测节点的平均数更大, 这是由于缺少瞬时信噪比的缘故。

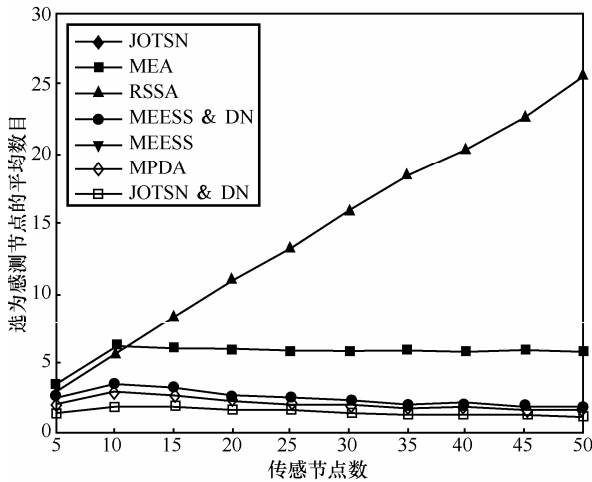


图 12 不同算法传感节点被选为感测节点的平均数与节点总数的关系

## 7 结束语

协作频谱感测算法可有效消除阴影和衰落影响, 有利于提高信号感测性能, 此算法是认知无线传感器网络中非常重要的算法之一。在实际频谱感测过程中, 并不需要所有的节点都对信道进行感测, 因为如果所有传感节点都进行频谱感测, 那么每个节点的能耗与检测性能的改善并不成比例。

本文中给出了一种能量有效的协作频谱感测算法, 算法依据检测性能限定条件选择参与感测的节点和设定感测门限值。为了减小节点的能耗, 推导了算法在衰落信道下的数学模型, 根据凸优化理论给出了算法的闭合表达式, 同时研究了判决节点选择、感测节点选择和判决门限设定的凸优化问题。仿真结果表明, 在保证一定检测性能的情况下, 算法降低了节点的能耗, 此算法不依赖于检测概率的分布和中心融合算法, 因此可用于任何分布和任何融合算法场景。

## 参考文献:

[1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communica-

tions[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 2005,23(2):201-220.

- [2] MISHRA S M, SAHAI A, BRODERSEN R W. Cooperative sensing among cognitive radios[A]. Proc IEEE Int Conf Commun[C]. 2006. 1658-1663.
- [3] MAHARJAN S, YUEN C, CHEW Y H, ZHANG Y, GJESSING S. Distributed spectrum sensing for cognitive radio networks with heterogeneous users: a game theoretical framework[A]. IEEE CogART[C]. Rome, Italy, 2010. 1-5.
- [4] SAAD W, HAN Z, BASAR T, DEBBAH M, HJORUNGNES A. Coalition formation games for collaborative spectrum sensing[J]. IEEE Trans on Veh Technology, 2011,60(1):276-297.
- [5] AKYILDIZ I F, LEE W, VURAN M C, MOHANTY S. A survey on spectrum management in cognitive radio networks[J]. IEEE Commun Mag, 2008,46(4):40-48.
- [6] GHASEMI A, SOUSA S. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs[J]. IEEE Commun Mag, 2008,46(4):32-39.
- [7] SAHAI A, HOVEN N, TANDRA R. Some fundamental limits on cognitive radio[A]. Proc Allerton Conf Commun Control Comp[C]. Monticello, IL, 2004. 1662-1671.
- [8] CABRIC D, MISHRA S M, BRODERSEN R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios[A]. Proc of Asilomar Conf on Signals, Systems and Computers[C]. Pacific Grove, CA, USA, 2004. 772-776.
- [9] PEH E, LIANG Y C. Optimization for cooperative sensing in cognitive radio networks[A]. Proc IEEE WCNC[C]. Hong Kong, China, 2007. 27-32.
- [10] YAMASAKI K, OHTSUKI T. Design of energy-efficient wireless sensor networks with censoring, on-off, and censoring and on-Off sensors based on information[A]. IEEE Vehicular Technology Conf[C]. 2005.1312-1316.
- [11] MALEKI S, PANDHARIPANDE A, LEUS G. Energy-efficient distributed spectrum sensing for cognitive sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(3): 565-573.
- [12] ZHANG W, MALLIK R K, LETAIEF K B. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks[J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2009, 8 (12): 5761-5766.
- [13] ATAPATTU S, TELLAMBURA C, JIANG H. Spectrum sensing via energy detector in low SNR[A]. IEEE International Conf on Communications (ICC)[C].2011.1-5.
- [14] LAI J. Cooperative sensing with detection threshold optimization in cognitive radio networks[A]. IEEE Int Symp on Communication and Information Technologies (ISCIT)[C].2012.781-786.
- [15] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection

of unknown signals over fading channels[J]. IEEE Trans on Commun, 2007,55(1):21-24.

- [16] LIANG Y C, ZENG Y, PEH E C, HOANG A T. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks[J]. IEEE Trans on Wireless Commun, 2008,7(4):1326-1337.
- [17] MALEKI S, PANDHARIPANDE A, LEUS G. Energy-efficient distributed spectrum sensing for cognitive sensor networks[A]. Proc 35th Annu Conf IEEE Ind Electron[C]. 2009.2642-2646.
- [18] MALEKI S, PANDHARIPANDE A, LEUS G. Energy efficient distributed spectrum sensing with convex optimization[A]. Proc 3rd Int Workshop Comput, Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing[C]. 2009.396-399.
- [19] NAJIMI M, EBRAHIMZADEH A, HOSSENI S M, FALLAHI A A. A novel sensing nodes and decision node selection method for energy efficiency of cooperative spectrum sensing in cognitive sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2013,13(5):1610-1621.
- [20] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ Press, 2004.
- [21] YU W, LUI R. Dual methods for nonconvex spectrum optimization of multicarrier systems[J]. IEEE Trans on Commun, 2006,54(7): 1310-1322.

#### 作者简介:



虞贵财 (1977-), 男, 江西崇仁人, 南昌大学讲师, 主要研究方向为无线传感器网络、认知无线电技术等。



龙承志 (1975-), 男, 江西吉安人, 南昌大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、无线传感器网络等。



向满天 (1977-), 男, 湖北恩施人, 南昌大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线通信、无线传感器网络等。