

6-4-2020

## Modeling of Spectrum Sensing Energy Consumption in Cognitive Radio Networks

Ziru Cui

*Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;*

Peng Yi

*Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Modeling of Spectrum Sensing Energy Consumption in Cognitive Radio Networks

## Abstract

**Abstract:** In cognitive radio networks, the energy consumption in the process of spectrum sensing is the hot spot of research. *A unified framework for modeling based on Poisson process was developed which could be used even under interference limited to count the energy consumption, thereby obtaining a spectrum sensing energy consumption. Spectrum sensing energy as the function of the number of secondary users in cognitive radio networks, their spatial density and the number of hops, could be modelled as a truncated gamma distribution.* This model is used to statistically analyze cognitive users' energy consumption in the process of spectrum sensing under the circumstance of temporal perception, spatial perception and temporal - spatial joint perception. Simulation and analysis results show that the model is of scientific rationality.

## Keywords

gamma distribution, radio spectrum, sensing energy, statistical modeling

## Recommended Citation

Cui Ziru, Peng Yi. Modeling of Spectrum Sensing Energy Consumption in Cognitive Radio Networks[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(10): 2330-2335.

# 认知无线网络中频谱感知能耗的建模研究

崔自如, 彭艺

(昆明理工大学信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 在认知无线网络中, 频谱感知过程的能量消耗是研究热点。提出一种基于泊松过程可用于统计干扰受限下的能量消耗进行建模, 获得频谱感知能量消耗。频谱感知能量作为认知无线网络的次要用户数量、空间密度和跳数的函数, 可以建模为伽玛截断分布。将该模型用于时域感知、空域感知以及时域-空域联合感知在频谱感知过程中认知用户的能量消耗统计分析, 仿真及分析结果表明了该模型的科学合理性。

**关键词:** 伽玛分布; 无线电频谱; 感知能量; 统计建模

中图分类号: TP393.17 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 10-2330-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201710014

## Modeling of Spectrum Sensing Energy Consumption in Cognitive Radio Networks

Cui Ziru, Peng Yi

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In cognitive radio networks, the energy consumption in the process of spectrum sensing is the hot spot of research. A unified framework for modeling based on Poisson process was developed which could be used even under interference limited to count the energy consumption, thereby obtaining a spectrum sensing energy consumption. Spectrum sensing energy as the function of the number of secondary users in cognitive radio networks, their spatial density and the number of hops, could be modelled as a truncated gamma distribution. This model is used to statistically analyze cognitive users' energy consumption in the process of spectrum sensing under the circumstance of temporal perception, spatial perception and temporal - spatial joint perception. Simulation and analysis results show that the model is of scientific rationality.

**Keywords:** gamma distribution; radio spectrum; sensing energy; statistical modeling

## 引言

认知无线电(CR)技术可以动态地改变频谱分配来减轻无线资源短缺的问题, 因此已被引入到通信网络中。频谱感知是通过特定频段的监视和检测来确定可被认知用户使用信道的过程<sup>[1]</sup>。在认知

无线网络(CRNS)中频谱感知扮演着基础性的角色, 它作为认知无线电的关键技术, 一直是国内外研究的热点。

目前, 大量文献对认知无线电中的频谱感知技术进行了研究, 而频谱感知过程中的能耗也成为研究的热点。文献[1]研究了认知无线网络中二级用户的能量消耗, 但没有对提出的模型进行仿真分析, 文献[2]研究了认知无线网络中决策融合的能量消耗, 而一个高效节能的 CRN 应为: (1)高频谱利用率; (2)一级通信干扰最小化; (3)二级通信



收稿日期: 2015-10-08 修回日期: 2015-12-22;  
基金项目: 云南省科技厅基金(KKS0201403016), 云南省食品安全研究院项目(KKSTJ201303008);  
作者简介: 崔自如(1992-), 女, 满族, 河北, 硕士生, 研究方向为无线网络通信; 彭艺(1975-), 女, 云南, 博士, 副教授, 研究方向为无线网络通信。

<http://www.china-simulation.com>

• 2330 •

能耗最小化<sup>[3]</sup>。因此, 研究认知无线电中频谱感知过程的能耗问题很有意义。

泊松过程在认知无线网络中因其均匀随机性可以用于进行干扰受限下的能耗统计。因此, 本文提出基于这种均匀随机过程来开发一个统一的框架进行建模, 从而获得认知无线网络中频谱感知的能耗。本文首先得到一个信道感知能耗模型, 然后对感知过程中消耗的能量进行统计建模, 再利用这一建模方法比较现有的时域感知、空域感知以及时域-空域联合感知三种频谱分配算法的在频谱感知过程中认知用户的能耗。

## 1 能量模型及其统计建模

考虑在一个 CRN 的发射端只有一个主发射机。假设二级用户(SUs)根据一个泊松过程均匀分散在空间区域  $R$  中 ( $R \subset \mathbb{R}^2$ )。N 个二级用户 SUs 位于  $R$  里面的概率取决于总面积  $A_R$  :

$$p\{|S|=N\} = \frac{(\lambda A_R)^N}{N!} e^{-\lambda A_R}, N=0,1,2,\dots \quad (1)$$

式中:  $S$  是区域  $R$  中的一组 SU;  $\lambda$  是网络空间密度(即每单位面积的用户);  $A_R = \pi R^2$ ,  $R$  是该区域的半径。

为了支持从源 CR 到目的 CR 的端到端传输, 假设 CRN 是由  $N_c$  个集群组成, 每个集群具有  $N_{sj} + 1$  个感知节点 ( $j=1, \dots, N_c$ ), 其中, 假定簇头(CH)的作用覆盖范围为  $R_{CH_j}$ 。每个 SU 感知周围环境, 并向相关的簇头 CH 发送感知信息; CHs, 反之, 将收集到的决定发送到中央接收器。在给定接收器信噪比的距离为  $d$  的源端和目的端之间传输  $l(L)$  比特的能耗的建模可以表示为:

$$E(d, l) = (E_{Tx-e} + E_a \cdot d^\alpha + E_{Rx-e}) \cdot l \quad (2)$$

式中:  $E_{Tx-e}$  为发射电子设备和数字化处理的开销;  $E_{Rx-e}$  为接收电子设备的开销;  $E_a \cdot d^\alpha$  为在距离  $d$  内传输一比特的所必须的辐射能量;  $\alpha$  是路径损耗的指数。下面假设  $E_{Tx-e} = E_{Rx-e} = E_e$ 。

单跳网络架构如图 1 所示: 假设存在一个二级用户  $SU_i$  ( $i=1, 2, \dots, N_{s1}$ ) 并假设从  $CH_1$  到目的端的

单跳距离。每个 SU 的能耗包括: 睡眠模式下的能耗  $E_p$ ; 感测信道占用时的能耗  $E_s$ ; 计算可用信道和做出决策时的能耗  $E_c$ ; 向传输结果的能耗  $E_T$ 。因为  $E_p < E_c \ll E_T$ , 忽略  $E_p$  和  $E_c$ 。根据式(2), 在感知阶段能量  $E_s$  的消耗是 SU 收发器电路感知基带信号所需的能量, 而能量  $E_T$ , 向传输结果的能耗, 是每一个 SU 在传输距离为  $r_{i1}$  时传输一比特所需的能量。因此,  $SU_i$  的能耗为:

$$E_{SU_i}(r_{i1}) = E_{s, SU_i} + E_{T, SU_i} = E_e \cdot b_s \cdot T_s + (E_e + E_a r_{i1}^\alpha) b_{SU_i} \Delta T_{s1} \quad (3)$$

式中:  $T_s$  代表感知间隔, 即感知操作持续时间为  $\Delta T_{s1}$ ;  $b_s$  为在感知间隔内每秒的采样点数;  $\Delta T_{s1}$  是 SU 向  $CH_1$  报告信息的通信时间;  $b_{SU_i}$  为每一个  $SU_i$  向  $CH_1$  报告信息的信息速率。为了限制 SU 和 CH 之间的通信链路的能耗, 应该使  $\Delta T_{s1} \ll T_s$ <sup>[4]</sup>。

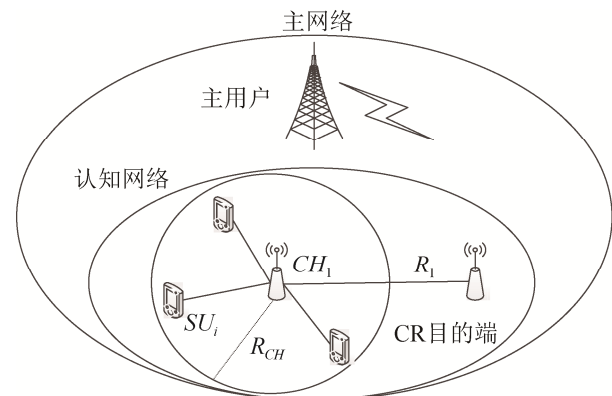


图 1 认知无线网络中的簇  
Fig. 1 Clusters in cognitive radio networks

$CH_1$  的能耗  $E_{CH_1}$  包括: 在休眠模式下的能源消耗  $E_{p, CH}$ ; 在收集决定时的能耗  $E_{R, CH}$ ; 在做出决定簇时的能耗  $E_{c, CH}$ ; 在将集群结果发送到中央接收器时的能耗  $E_{T, CH}$ 。因为  $E_{p, CH} < E_{c, CH} \ll E_{T, CH}$ , 可以忽略  $E_{p, CH}$  和  $E_{c, CH}$ 。根据公式(2),  $CH_1$  的能耗  $E_{CH_1}$  是由  $CH_1$  收发器电路在从  $N_{s1}$  接收感知信息和在传输距离为  $R_1$  时  $CH_1$  所需要的能量。因此,  $CH_1$  消耗的能量是:

$$E_{CH_1}(R_1) = E_e N_{s1} \cdot b_{SU_1} \cdot \Delta T_{s1} + (E_e + E_a r_{i1}^\alpha) \cdot b_{CH_1} T_{CH_1} \quad (4)$$

式中： $b_{SU_j}$  表示在集群中的每一个 SU 向  $CH_i$  报告信息时的数据传输速率， $b_{CH_i}$  表示  $CH_i$  的数据传输速率， $T_{CH_i}$  表示  $CH_i$  向 CR 目的地报告消息的传输时间。为了限制在这一通信链路中的能耗，应为  $T_{CH_i} \ll T_s$ 。

本节中将 SUs 和 CHs 的能量模型衍生到单跳网络中。首先，假设 SUs 和 CHs 是考虑到第  $i$  个 SU 和第  $j$  个 CH 之间的距离  $r_{ij}$  并根据一个 PPP 在空间上分布的，可以证明  $r_{ij}^2$  这是一个服从形状参数 2、尺度参数  $2\lambda$  的伽玛分布的随机变量(R.V.)，记作  $r_{ij}^2 \sim \Gamma(2, 2\lambda)$ ；关于参数  $k$  和  $\theta$  的伽玛分布的随机变量(R.V.)的概率密度函数(PDF)是

$$\Gamma(x, k, \theta) = \frac{e^{-\frac{x}{\theta}} x^{k-1}}{(\theta)^k \Gamma(k)}, x \geq 0, k, \theta > 0 \quad (5)$$

其中  $\Gamma(n) = \int_0^\infty e^{-u} u^{n-1} du$  是标准的伽玛函数。考虑到在  $R()$  中的 PPP 的空间分布的 SUs，两个一维变量  $X, Y \subset \mathbb{R}$  是关于密度  $\lambda$  的泊松过程。在  $X$  或  $Y$  中连续的泊松过程发生的时间间隔是一个关于  $\lambda$  的指数分布，可以记为  $X, Y \sim \text{Exp}(\lambda)$ ，

因此

$$X^2, Y^2 \sim \text{Weibull}\left(\frac{1}{2}, \lambda\right) \quad (6)$$

$$\text{Weibull}\left(\frac{1}{2}, \lambda\right) = \text{Exp}(2\lambda) \quad (7)$$

$$X^2, Y^2 \sim \text{Exp}(2\lambda) \quad (8)$$

$$X^2 + Y^2 \sim \Gamma(2, 2\lambda) \quad (9)$$

使用  $r_{ij}^2$  和  $R_j^2$  的 Gamma 分布得到单跳网络中的 SUs 和 CHs 的能量模型，假设一个同构网络，即假定 SUs 的覆盖范围和的平均数量对于所有集群和它们本身是相同的，分别等于  $R_{CH}$  和  $N_s$ 。此外，假定对于所有的集群来说，在一个集群中的每个 SU 向 CH 报告信息的数据速率和各 CH 的数据速率是相同的，分别等于  $b_{SU}$  和  $b_{CH}$ 。

根据公式(3)的每个 SU 的能量的概率密度函数(PDF)是：

$$f_{E_{SU_i}}(r_{i1}) = E_e b_s T_s + E_e b_{SU} \Delta T_{s1} + E_a \cdot b_{SU} \Delta T_{s1} \cdot f_R(r_{i1}^\alpha) \quad (10)$$

式中： $f_R(r_{i1}^\alpha)$  是  $r_{i1}^\alpha$  的 PDF。可以证明每个 SU 的能量是关于参数 2 和  $2\lambda c$  的伽玛分布的随机变量 R.V.，即：

$$E_{SU_i}(r_{i1}, \lambda) \sim c_1 + \Gamma(2, 2\lambda c) \quad (11)$$

式中： $c = E_a \cdot b_{SU} \Delta T_{s1}$ ， $c_1 = E_e (b_s T_s + b_{SU} \Delta T_{s1})$ 。实际上，由于  $r_{i1}^2$  是伽玛分布，根据公式(10)中伽玛分布的比例属性，假定  $\alpha = 2$ ，它的能量是关于形状参数 2 和尺度参数  $2\lambda c$  的伽玛分布。

一个集群中的 SUs 的能量中的  $N_s$ ，SUs 已从如下公式给出  $E_{SU}^{cluster}(N_s) = \sum_{i=1}^{N_s} E_{SU_i}$ 。因此，它的能量是关于参数  $2N_s$  和  $2\lambda c$  的伽玛分布的随机变量，即：

$$E_{SU}^{cluster}(R_{CH}, \lambda) \sim c_1 N_s + \Gamma(2N_s, 2\lambda c) \quad (12)$$

对于一个 PPP，其中  $N_s$  是  $R_{CH}$  中节点的平均数目，等于  $\lambda \pi R_{CH}^2$ 。根据公式(4)所述，一个 CH 的能量的 PDF 是：

$$f_{E_{CH1}}(R_1) = E_e (N_s b_{SU} \Delta T_{s1} + b_{CH} T_{CH1}) + E_a \cdot b_{CH} T_{CH1} \cdot f_R(R_1^\alpha) \quad (13)$$

式中： $f_R(R_1^\alpha)$  是  $R_1^\alpha$  的 PDF。一个 CH 的能耗是关于 2 和  $2\lambda c_2$  的伽玛分布的随机变量，即：

$$E_{CH1}(R_1, \lambda) \sim c_3 + \Gamma(2, 2\lambda c_2) \quad (14)$$

式中  $c_2 = E_a \cdot b_{CH} T_{CH1}$ ， $c_3 = E_e (N_s b_{SU} \Delta T_{s1} + b_{CH} T_{CH1})$ 。因此，通过相加 SUs 和 CHs 的能量，假设  $\Delta T_{S_j} = \Delta T_s \forall j$ ，得出单跳网络的总能量：

$$E_{TOT}^{network}(R_{CH}, R_1, \lambda) \sim c_1 N_s + \Gamma(2N_s, 2\lambda c) + c_3 + \Gamma(2, 2\lambda c_2) \quad (15)$$

多跳网络的总能量可以近似用以下变量表示：

$$E_{TOT}^{network} = E_{CH}^{network} + E_{SU}^{network} \sim c_1 N_s N_{hop} + \Gamma(2N_s N_{hop}, 2\lambda c) + c_3 + c_2 \sum_{j=0}^{N_{hop}} \delta_j \Gamma(2N_{hop} + j, 2\lambda c_{21}) \quad (16)$$

对于一个均匀的多跳网络：

$$E_{CH}^{network} \sim c_3 + \Gamma(2N_{hop}, 2\lambda c_2) \quad (17)$$

$$E_{TOT}^{network} \sim c_1 N_s N_{hop} + \Gamma(2N_s N_{hop}, 2\lambda E_a b_{SU} \Delta T_s) + c_3 + \Gamma(2N_{hop}, 2\lambda E_a b_{CH} T_{CH}) \quad (18)$$

## 2 不同频谱分配算法的能耗

不同频谱分配算法在频谱分配过程中的能耗是不同的, 本文主要讨论时域感知、空域感知以及时域-空域联合感知三种频谱分配算法的能耗。时域感知主要检测某一时间内主用户是否出现在待检测频段上, 做法是通过本地认知用户对主用户发射机发出的信号进行检测, 以确定主用户的信号有没有出现在某一确定的频段内。空域感知主要对主用户的位置进行定位以及估测发射功率信息, 然后估算出认知用户的最大抗干扰发射功率。时域感知能够对主用户的存在与否做出判决, 但不能估计主用户的位置以及主用户的发射功率。空域感知能够估算出主用户的位置信息及认知用户的最大抗干扰传输功率, 但不能检测主用户的存在。时域-空域联合感知通过结合两者的特点实现检测性能的优化。其基本思路: 一组认知用户执行空域感知, 通过协作检测确定主用户的位置, 同时认知用户运用空域感知获得的主用户的位置以及发射功率来执行时域感知。

在时域感知频谱感知算法下, 认知用户对主用户发射机发出的信号进行检测, 若主用户的信号没有出现在某一频段内, 则证明主用户没有使用该频段, 即该频段空闲, 可以被认知用户使用, 随即向簇头传输结果, 此过程所消耗的能量如公式(3), 即包括睡眠模式下的能耗  $E_p$ ; 感测信道占用时的能耗  $E_s$ ; 计算可用信道和做出决策时的能耗  $E_c$ ; 向  $CH_1$  传输结果的能耗  $E_T$ 。因为  $E_p < E_c \ll E_T$ , 忽略  $E_p$  和  $E_c$ 。根据公式(2), 在感知阶段能量  $E_s$  的消耗是 SU 收发器电路感知基带信号所需的能量, 而能量  $E_T$ , 向  $CH_1$  传输结果的能耗, 是每一个 SU 在传输距离为  $r_{i1}$  时传输一比特所需的能量。因此, 认知用户  $SU_i$  的能耗为:

$$E_{SU_i}(r_{i1}) = E_{s,SU_i} + E_{T,SU_i} = E_e \cdot b_s \cdot T_s + (E_e + E_a r_{i1}^\alpha) b_{SU1} \Delta T_{S1} \quad (19)$$

空域感知主要对主用户的位置进行定位以及估测发射功率信息, 然后估算出认知用户的最大抗

干扰发射功率。此过程所消耗的能量为包括睡眠模式下的能耗  $E_p$ ; 对主用户的位置进行定位并估测发射功率信息时的能耗  $E_l$ ; 向  $CH_1$  传输结果的能耗  $E_T$ 。因为  $E_p \ll E_T$ , 所以忽略  $E_p$ 。能量  $E_T$ , 即向  $CH_1$  传输结果的能耗, 是每一个 SU 在传输距离为  $r_{i1}$  时传输一比特所需的能量。因此, 认知用户 SU 的能耗为:

$$E_{SU} = E_l + E_T = E_l + (E_e + E_a r_{i1}^\alpha) b_{SU1} \Delta T_{S1} \quad (20)$$

时域-空域联合感知通过结合两者的特点实现检测性能的优化。一组认知用户执行空域感知, 通过协作检测确定主用户的位置, 同时认知用户运用空域感知获得的主用户的位置以及发射功率来执行时域感知。所以, 可以预测, 时域-空域联合感知在感知信道阶段所消耗的能量  $E$  如下:

$$E = \begin{cases} E_l \cdot \frac{T_s}{t_0}, T_s < t_0 \\ E_l + E_T + E_e \cdot b_s (T_s - t_0) + (E_e + E_a r_{i1}^\alpha) b_{SU1} \Delta T_{S1}, T_s > t_0 \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $t_0$  表示进行空域频谱监测的时间。

## 3 仿真分析

使用 Matlab 对算法进行仿真。参数值都参照 802.11 标准。假设:  $b_s=1$  比特/秒,  $b=10$  比特/秒,  $b_{SU}=50$  比特/秒,  $E_e=50$  NJ/比特,  $E_a=10$  PJ/比特/平方米,  $\lambda=0.01$  用户/平方米,  $\alpha=2$ ,  $T_s=0.1$  s,  $\Delta T_s=0.01$  s,  $T_{CH}=0.01$  s。

图 2 表明了 CHs 从仿真得到的感知能量的概率密度函数与使用截断伽玛分布得到的概率密度函数, 仿真结果表明, 伽玛截断分布是在均匀认知网络(CRNs)中 CHs 感知能量精确的统计学的模型。

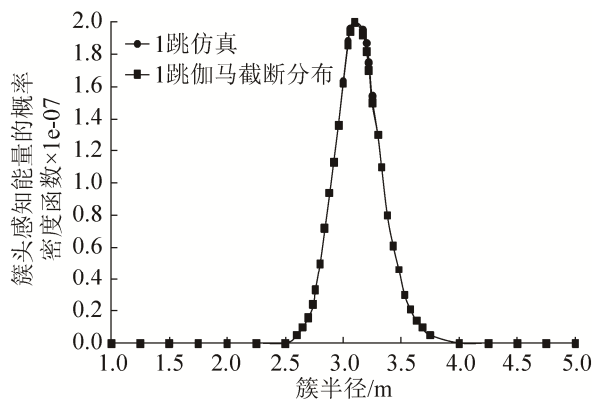


图2 感知能量仿真与伽马分布的概率密度函数  
Fig. 2 Probability density function of perception energy simulation and gamma distribution

图3 示出了簇半径变化下网络跳数变化的网络平均能耗,随着簇半径的增大,网络平均能耗增多,当簇半径相等时,随着网络跳数的增多,网络平均能耗增多。

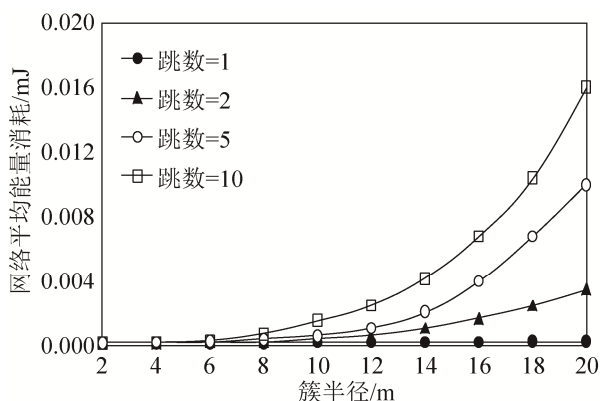


图3 簇半径与网络跳数变化下的网络平均能耗  
Fig. 3 Average energy consumption of network under the variation of cluster radius and network hops

图4 表明了随着感知时间的增加,时域频谱感知与时域-空域联合感知在频谱感知过程中感知能耗不断增加。当感知时间到达9 s时,时域-空域联合感知中的空域感知部分结束,时域感知开始进行频谱感知,此时二者都开始进行时域感知,时域感知能耗相同。对比时域频谱感知,时域-空域联合感知能耗较少。

图5 表明了随着感知时间的增加,空域频谱感知与时域-空域联合感知在频谱感知过程中感知能耗不断增加。当感知时间到达9 s时,时域-空域联

合感知中的空域感知部分结束,时域感知开始进行频谱感知。对比空域频谱感知和时域-空域联合感知,二者都进行空域感知时能耗相同,时域-空域联合感知能耗较多。

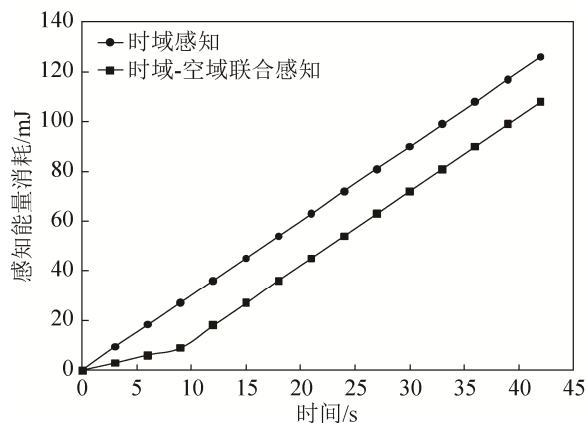


图4 时域感知与时域-空域联合感知的感知能耗比较  
Fig. 4 Comparison of sensing energy consumption between time domain sensing and temporal spatial joint sensing

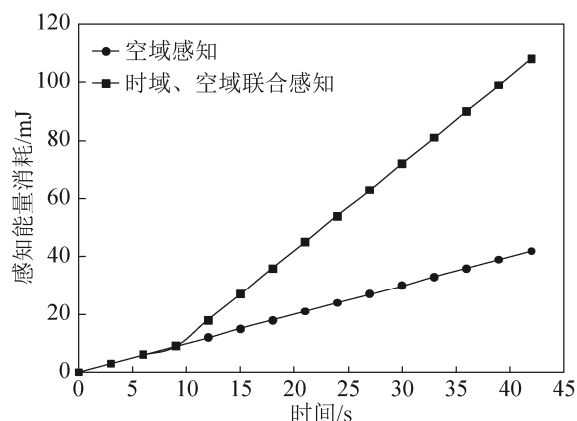


图5 空域感知与时域-空域联合感知的感知能耗比较  
Fig. 5 Comparison of sensing energy consumption between spatial sensing and temporal spatial joint sensing

## 4 结论

在认知无线网络中,对频谱感知过程中的能耗提出了一种建模方法进行统计研究,并分析比较了3种不同的频谱感知算法的能耗。通过仿真结果表明,认知无线电中频谱感知的能耗可以建模为一个伽马截断分布,并且时域-空域联合感知在感知过程中消耗的能量介于时域感知与空域感知之间。

下一步工作将对频谱感知算法在感知过程中的能耗与检测性能之间的平衡做出研究。

### 参考文献:

- [1] Efe F Orumwense, Thomas J Afullo, Viranjay M Srivastava. Secondary User Energy Consumption in Cognitive Radio Networks [J]. *Africon* (S2153-0033), 2015, 23(4): 1-5.
- [2] Saud Althunibat, Sandeep Narayanan, Marco Di Renzo, et al. On the Energy Consumption of the Decision-Fusion Rules in Cognitive Radio Networks [J]. *Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2012, 9(17): 125-129.
- [3] P Sungsoo. Cognitive Radio Network with Energy Harvesting [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications* (S1536-1276), 2013, 12(3): 1386-1397.
- [4] W Y Lee, I F Akyildiz. Spectrum-aware mobility management in cognitive radio cellular networks [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing* (S1536-1233), 2012, 11(4): 529-542.
- [5] S Sengupta, K P Subbalakshmi. Open research issues in multi-hop cognitive radio networks [J]. *IEEE Communications Magazine* (S0163-6804), 2013, 51(4): 168-176.
- [6] 杨明极, 吴琼, 石佳庆, 等. 信噪比较的协作频谱感知算法 [J]. *哈尔滨理工大学学报* (S1007-2683), 2013, 18(2): 105-108. (Yang M J, Wu Q, Shi J Q. A cooperative spectrum sensing algorithm of SNR comparison [J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology* (S1007-2683), 2013, 18(2): 105-108.)
- [7] 张阳. 基于频谱感知的自适应跳频抗干扰通信系统的仿真研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 1-6. (Zhang Y. Simulation research on adaptive frequency hopping anti-jamming communications system based on spectrum sensing [D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.)
- [8] 马恒. 认知无线电中频谱检测技术研究 [J]. *无线电工程*, 2014, 44(3): 77-80. (Ma H. Research on spectrum detection technology in Cognitive radio [J]. *Radio Engineering*, 2014, 44(3): 77-80.)
- [9] R W Heath, M Kountouris, T Bai. Modeling heterogeneous network interference using poisson point processes [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing* (S1053-587X), 2013, 61(16): 4114-4126.
- [10] M S Ali, N B Mehta. Modeling time-varying aggregate interference in cognitive radio systems, and application to primary exclusive zone design [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communication* (S1536-1276), 2014, 13(1): 429-439.
- [11] Y Kondareddy, P Agrawal. Enforcing Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [J]. *Global Telecommunications Conference* (S1930-529X), 2011, 10(11): 1-6.
- [12] 李映雪. 认知无线电中的频谱感知技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2013: 1-7. (Li Y X. Research on spectrum sensing technology in cognitive radio [D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013: 1-7.)
- [13] Huang Xinlin, Wang Gang, Hu Fei, et al. Multitask Spectrum Sensing in Cognitive Radio Network via Spatiotemporal Data Mining [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (S0018-9545), 2013, 62(3): 809-823.