

doi:10.13756/j.gtxyj.2018.05.015

无线通信技术

基于反拍卖的中继协作频谱感知算法

田赛赛^{1,2}, 赵 凤^{2,3}, 朱 琦^{1,3}

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 南京 210003; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 南京 210096;
3. 南京邮电大学 江苏省无线通信重点实验室, 南京 210003)

摘要:针对认知无线网络中次用户(SU)参与频谱感知的积极性低以及 SU 到融合中心(FC)的信道条件差,造成发送到 FC 的数据不可信的问题,提出一种基于反拍卖技术(RAT)的中继协作频谱感知算法。该算法将 SU 分为普通次用户和中继次用户,在这两种 SU 之间采用 RAT 的方式激励 SU 参与到频谱感知当中,以解决 SU 的积极性低的问题,通过中继的方式可以解决信道条件差的问题。仿真结果表明,所提方法的感知性能明显好于非中继方法,并且提高了用户的积极性。

关键词: 认知无线电; 协作频谱感知; 反拍卖; 中继

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2018)05-0074-05

Relay Cooperative Spectrum Sensing Algorithm based on RAT

TIAN Sai-sai^{1,2}, ZHAO Su^{2,3}, ZHU Qi^{1,3}

(1. College of Telecommunications & Information Engineering, NUPT, Nanjing 210003, China;
2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China;
3. Jiangsu Key Lab of Wireless Communications, NUPT, Nanjing 210003, China)

Abstract: In cognitive radio networks, the enthusiasm of Secondary Users' (SU) participation in spectrum sensing is low and the untrusted data is sent from SU to the Fusion Center (FC) due to the poor channel condition. Considering these problems, a cooperative spectrum sensing algorithm based on Reverse Auction Technology(RAT)-Reverse Auction is proposed in this paper. This article refers to the incentive mechanism of RAT. The user is divided into ordinary secondary users and relay secondary users. The use of RAT between these two secondary users encourages the secondary users to participate in the spectrum perception to solve the problem of the lower initiative of SU, and the problem of channel condition difference can be solved by means of relay. The simulation results show that the sensitivity of the proposed method is better than the non-relay method, and the user's enthusiasm is improved.

Key words: cognitive radio; cooperative spectrum sensing; RAT; relay

0 引 言

频谱感知技术作为认知无线电的核心技术,其目的就是感知主用户(Primary User, PU)频段的使用情况,根据该感知结果实现主次用户频段的共享。在认知无线网络(Cognitive Radio Network, CRN)中,次用户(Secondary User, SU)完成频谱感知的任务。

一般频谱感知算法中都假设 SU 全部参与感知,该场景有缺陷,因为每个 SU 在参与感知的同时其自身都会有一定的损失, SU 必须获得一定的报酬来弥补其在感知过程中的损失才愿意参与到感知当中,所以激励 SU 参与到感知当中也是一个非常重要的问题。而在一般的群智感知算法当中,只涉及到了算法内容,并没有涉及到具体的应用场景。

针对上述问题,本文将频谱感知与群智感知相

结合,提出一种基于反拍卖技术(Reverse Auction Technology, RAT)的中继协作频谱感知 SU 激励算法,该算法考虑到 SU 到融合中心(Fusion Center, FC)的信道衰落问题,引入中继技术为信道条件不好的 SU 选择一个信道条件好的 SU 作为中继传输感知数据,并提出一种基于 RAT 的选择激励机制,每个 SU 通过效用函数计算收益,如果收益为正则参与此中继协作频谱感知,否则不参与。考虑信道条件对数据传输的影响,将误码率以及 RAT 报价加入到效用函数中,共同作用于 SU 效用。然后数据被 FC 接收,经表决融合的方式将数据融合。仿真结果表明,本激励算法有效提高了频谱感知性能,且提高了 SU 的积极性。

1 系统模型

本文考虑的中继协作频谱感知模型如图 1 所

收稿日期:2018-06-06

基金项目:东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金资助项目(2015D10)

作者简介:田赛赛(1995—),男,山东巨野人。硕士,主要研究方向为无线通信。

通信作者:赵凤,副教授。E-mail:zhaos@njupt.edu.cn

示,主要包括 3 个阶段:(1)一个 PU 的信号被一个区域内的 SU 所检测,每个 SU 采用能量检测法独立地检测 PU 的信号;(2)根据 SU 到 FC 的信道条件将 SU 分为普通次用户和中继次用户,普通次用户的检测数据要先传输给中继次用户,然后中继次用户将接收到的数据以及本地检测数据一起传输给 FC;(3)FC 将接收的数据经过表决融合的方式进行融合,最终判决 PU 是否存在。

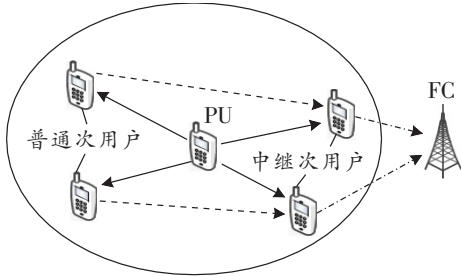


图 1 中继协作频谱感知系统模型

在中继协作频谱感知系统模型中,假设有 M 个 SU,采用能量检测法检测 PU 是否存在。设第 m 个 SU 从检测的信号中提取 N_m 个样本,则第 m 个 SU 所检测到的平均信号能量为

$$S_m = \frac{1}{N_m} \sum_{t=1}^{N_m} |r_m(t)|^2. \quad (1)$$

设第 m 个 SU 感知时间为 T_m , f_s 为感知频率,则 $N_m = T_m f_s$ 。 $r_m(t)$ 是第 m 个 SU 在时刻 t 时接收到的 PU 信号,表示为

$$r_m(t) = \begin{cases} h_m(t) * f_m(t) + n_m(t) & H_1 \\ n_m(t) & H_0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $f_m(t)$ 为在时间 t 时第 m 个 SU 接收到的 PU 的瞬时信号; $h_m(t)$ 为第 m 个 SU 的信道增益; $n_m(t)$ 为第 m 个 SU 的加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN); H_1 和 H_0 分别为假设 PU 存在和不存在。

设 SU 基于能量检测判断 PU 是否存在的阈值为 λ ,若 $S_m < \lambda$,SU 就认为 H_0 为真,否则认为 H_1 为真。假设第 m 个 SU 的信噪比为 γ_m ,则第 m 个 SU 的检测概率为^[1]

$$P_m = Q\left(\frac{Q^{-1}(p_f) - \gamma_m \sqrt{N_m}}{\sqrt{2\gamma_m + 1}}\right), \quad (3)$$

式中: $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-y^2/2} dy$; p_f 为 SU 的虚警概率,在本文中假设它固定。

FC 通过表决融合的方式将接收到的 SU 数据

进行融合,在有 M 个 SU 的协作感知网络中,设定表决门限为 k ,当有 k 个或 k 个以上 SU 支持某一假设时,则此假设成立。

表决融合系统的检测概率 P_D 和虚警概率 P_F 分别为^[2]

$$P_D = \sum_{j=k}^M \sum_{u_m=j} \prod_m P_{d_m}^{u_m} (1 - P_{d_m})^{1-u_m}, \quad (4)$$

$$P_F = \sum_{j=k}^M \sum_{u_m=j} \prod_m P_{f_m}^{u_m} (1 - P_{f_m})^{1-u_m}, \quad (5)$$

式中: P_{d_m} 和 P_{f_m} 分别为第 m 个 SU 的检测概率和虚警概率; u_m 的取值为 0 和 1;当假设所有 SU 的虚警概率 P_{f_m} 都为 P_f 时,FC 的虚警概率可以表述为

$$P_F = \sum_{j=k}^M C_M^j (p_f)^j (1 - p_f)^{M-j}. \quad (6)$$

从公式(4)、(5)和(6)中可以看出,选择的 k 值比较小时能够提高检测概率,但也会增大虚警概率,而选择的 k 值较大时则相反。

2 基于 RAT 的中继协作频谱感知算法

拍卖理论对于激励机制的设计是一个很好的理论工具,RAT 是一种逐级向下竞价,以最低的价格成交的拍卖方式。中继次用户为普通次用户提供中继服务,则普通次用户给中继次用户一定的报酬,形成一个中继次用户出价普通次用户选择的过程。

2.1 基于 RAT 的中继激励模型

在实际的无线传输中,由于无线信道受到干扰和噪声的影响,数据的传输往往会有差错。之前的协作频谱感知算法中都不考虑 SU 到 FC 的信道条件,然而实际情况下,数据传输肯定有误码的存在,频谱感知性能也受其影响。本文将数据传输的误码率考虑在内,提出了一种基于 RAT 的中继激励算法。

设定一个信噪比阈值 γ_T ,可以算出第 m 个 SU 到 FC 的信噪比 γ_m ,若 $\gamma_m < \gamma_T$,则将 SU 设定为普通次用户,普通次用户传输的数据可靠性不高,FC 不予接受;反之,将 SU 设定为中继次用户,FC 接受中继次用户传输的数据。普通次用户则只能借助于中继次用户来传输数据,即普通次用户将数据发送到中继次用户,由中继次用户转发给 FC,最后,FC 经表决融合的方式将接收到的数据进行融合。

信道传输的数据会受到干扰衰落等影响,导致接收端的误判。在本文中,任意两个节点间的错误传输概率为

$$e_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\sqrt{\gamma}), \quad (7)$$

式中, γ 为接收端的接收信噪比。

假设普通用户到 FC 的错误传输概率为 e_1 ; 普通用户到中继用户、中继用户到 FC 的错误传输概率分别为 e_2 、 e_3 。

中继用户可以直接将检测数据传到 FC, 但普通用户必须要先选择一个中继, 再经过中继将检测数据传给 FC, 为了激励普通用户加入频谱感知, 提出了一种 RAT 激励机制。

设普通用户的个数为 X , 中继用户个数为 Y , 则总 SU 人数为 $X+Y=M$ 。中继用户可以将传输数据直接传输到 FC, 其效用函数为

$$u_y = \frac{p_d^y(1-e_3^y)}{p_{\text{sum}}}R - C_yN_y + kb_y, \quad (8)$$

式中: p_d^y 为中继用户 y 的检测概率; $p_d^y(1-e_3^y)$ 是传输到 FC 的检测概率; e_3^y 为中继用户 y 到 FC 的错误传输概率; C_y 为单位时间的代价; N_y 为感知时间; k 为在整个 RAT 过程当中中继用户 y 被选择为中继的次数; b_y 为中继用户 y 参与到 RAT 当中的报价; p_{sum} 为所有 SU 检测概率的和, 在本文中它是一个经验值。

普通用户的效用函数为

$$u_x = \frac{p_d^x(1-e_2^{xy})(1-e_3^y)}{p_{\text{sum}}}R - C_xN_x - b_y, \quad (9)$$

式中: p_d^x 为普通用户 x 的检测概率; $p_d^x(1-e_2^{xy}) \cdot (1-e_3^y)$ 是传输到 FC 的检测概率; e_2^{xy} 为普通用户 x 到中继用户 y 的错误传输概率; C_x 为单位时间的代价; N_x 为感知时间; b_y 为普通用户 x 所要付给中继用户 y 的报酬。

中继用户 y 将自己的报价 b_y 以及到 FC 的错误传输概率 e_3^y 发布, 那么每个普通用户 x 便可以通过 (b_y, e_3^y) 选择一个中继用户 y 使得自己效用为正且最大, 当每个普通用户都选择了一个中继或者直接退出检测时, RAT 过程结束。在此过程当中, 中继用户 y 可以被多次选择, 并且每被选择一次, 其效用便会增加 b_y 。

每个 SU 通过自己的效用是否为正来判断是否参与检测, 最终数据被 FC 所接收, 通过表决融合的方式进行数据融合。

2.2 算法步骤

基于 RAT 的中继协作频谱感知算法流程如图 2 所示。具体步骤如下:

步骤 1: 设置感知频段 f_i , 平台广播参与人数 M 及预算 R ;

步骤 2: 设置一个 FC 信噪比阈值 γ_T , 算出第 m

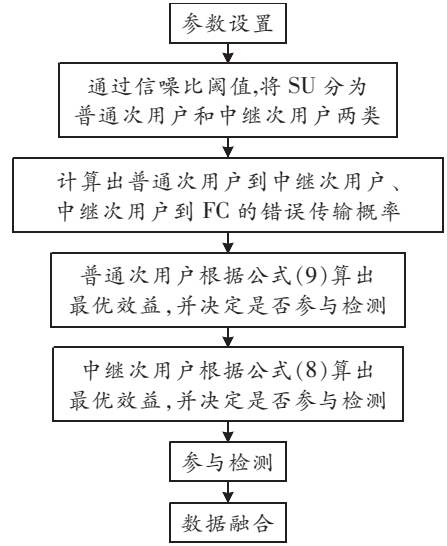


图 2 算法流程图

个 SU 到 FC 的信噪比 γ_m , 若 $\gamma_m < \gamma_T$, 则将 SU 加入到普通用户集 X , 反之, 将 SU 加入到中继用户集 Y ;

步骤 3: 由公式(7)计算出普通用户到中继用户、中继用户到 FC 的错误传输概率, 分别设为 e_2 、 e_3 ;

步骤 4: 普通用户根据中继用户的 (b_y, e_3^y) 及公式(9) 选出最优的中继用户并计算出最优的效益 $u_x^{\max}$, 根据效益是否为正来判断是否参与到检测当中;

步骤 5: 中继用户通过公式(8)计算出自己的效益 $u_y^{\max}$, 根据效益是否为正来判断是否参与到检测当中;

步骤 6: 所有参与检测的 SU 将数据送入 FC, FC 以表决融合的形式对接收到的数据进行融合。

3 仿真与性能分析

本文将非中继作为对比算法。在非中继算法中, 通过信噪比阈值把 SU 分为数据可靠 SU 以及数据不可靠 SU, FC 只接收数据可靠 SU 的检测数据并给予报酬, 由于不可靠 SU 不选择中继进行传输, 那么在两种 SU 之间也就不需要采用 RAT 的激励机制。只在 FC 以及可靠 SU 之间存在交互买卖关系。如果可靠 SU 效益为正则参与检测, 否则不参与。融合部分与本文算法一致。

本文的仿真参数设置如下: SU 总数 $N=20$, 采样频率 $f_s=900$ MHz, SU 可选的感知点数为 $T=[50 \ 100 \ 150]$, 在采样频率已知的情况下, 感知点数和感知时间是一一对应的关系。虚警概率 $p_f=$

0.1, 由文献[1]得知, $k = N/2$ 时, 性能最佳, 故表融合融合的 k 取为参与人数的一半, 当参与人数为奇数时, k 向上取整。

图 3 描述了预算与检测概率的关系, 即融合后检测概率随平台预算的变化。图中, 预算从 160 变化到 280, 在 PU 发射功率不变的情况下, 可以看出检测概率随着预算的增加而增大。这是由于预算增加时, 每个 SU 参与感知获得的效益便会增加, 从而激励着 SU 更愿意去参与感知。参与感知的人数增多, 融合的数据便增多, 由公式(4)可知融合检测概率必然提高, 因此对 PU 是否存在能够做出更精准判断。所以, 平台想要获得准确的感知信息, 就必然要提高预算。

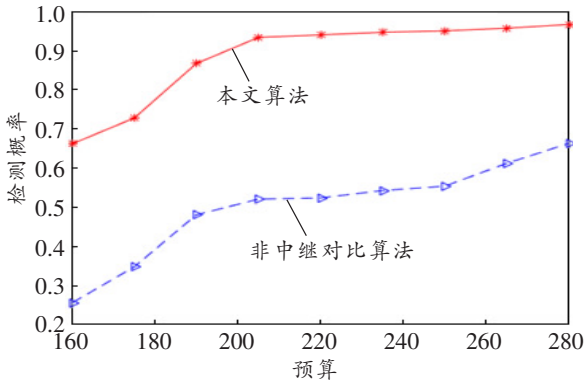


图 3 检测概率随预算的变化

本文仿真了错误概率随平台预算的变化情况。在认知无线电中, 错误概率包括漏检概率和虚警概率两个部分, 错误概率可表示为^[3]

$$P_{\epsilon} = \alpha_1 P_M + \alpha_2 P_F, \quad (10)$$

式中: P_M 为全局漏检概率, 且 $P_M = 1 - P_D$; α_1 和 α_2 均为加权值, 且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, 本文设 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 。

图 4 所示为错误概率随预算变化的曲线。从图中可以看出, 随着预算的增加, 错误概率明显降低, 这是由于预算的增加会激励更多的 SU 参与感知, 提高了协作感知性能; 本文算法比非中继对比算法性能好, 可见, 当 SU 到 FC 的信道条件不好时, 采取中继的形式可以大大提高协作感知的性能, 平台要获得准确的感知信息就要采用中继的方式并且提高预算, 从而提高感知性能。

在图 5 和图 6 所示分别为检测概率、错误概率随 PU 发射功率变化的曲线, 平台预算 $R = 400$, PU 发射功率为 $-3 \sim 3$ dBm。

由图 5 可知, 检测概率随 PU 发射功率的增加而增大, 这是由于当噪声能量一定时, 信号的能量越强就越容易被检测到; 本文算法好于非中继对比算

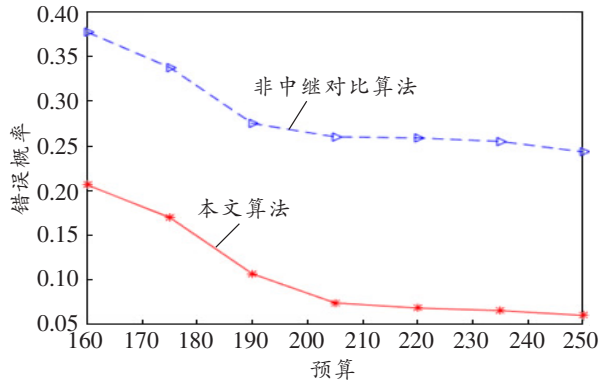


图 4 错误概率随预算变化的曲线

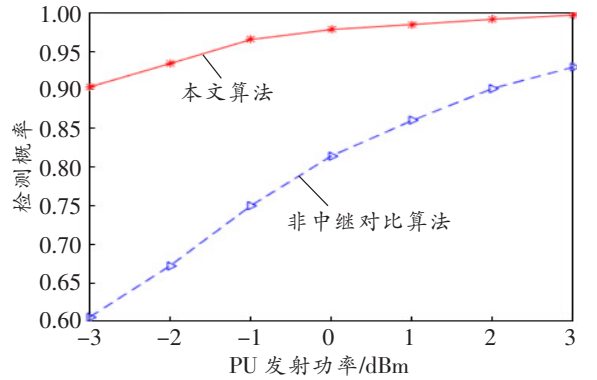


图 5 检测概率随 PU 发射功率变化的曲线

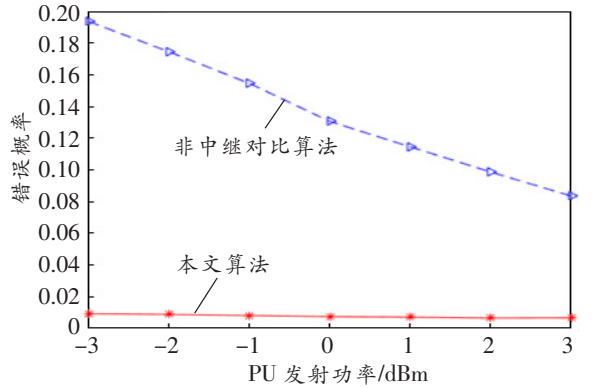


图 6 错误概率随 PU 发射功率变化的曲线

法, 这是由于中继可以使普通用户发送到 FC 的检测概率的错误传输率大大降低, 从而提高了感知性能。可见, 可以通过提高 PU 的发射功率来提高感知性能来获得准确的感知信息。

由图 6 可知, 随着 PU 发射功率变大, 错误概率变小, 这是因为当噪声能量不变时, PU 发射功率变大, 信噪比也会相应变大, 在信道条件不好的情况下也能检测到 PU 的存在, 所以 SU 的漏检概率和虚警概率都会下降, 从而提高了检测性能。从图中还可以看出, 本文算法好于非中继对比算法, 当 SU 到 FC 的数据传输信道条件不好时, 采用中继技术可有

效地提高感知性能。可见,平台想要获得理想的感知性能,在提高 PU 发射功率的同时还应采用中继技术。

图 7 所示为检测概率随 SU 人数变化的曲线。仿真中设置 $R=400$,PU 发射功率固定。由于 SU 太少时融合性能不佳,又因为本文预算固定为 $R=400$,从而在本文中让 SU 人数在 $6\sim30$ 范围内变化。可以看出,随着 SU 人数的增加,检测概率逐渐变大。人少时其检测概率非常低;当人数增加时,参与感知的人数也会增加,融合后其检测概率便会增大,提高了感知性能;同时能看出,本文算法好于非中继对比算法,因为人数一多,普通次用户可选的中继用户可能会增多,从而参与感知的人数便会增加,

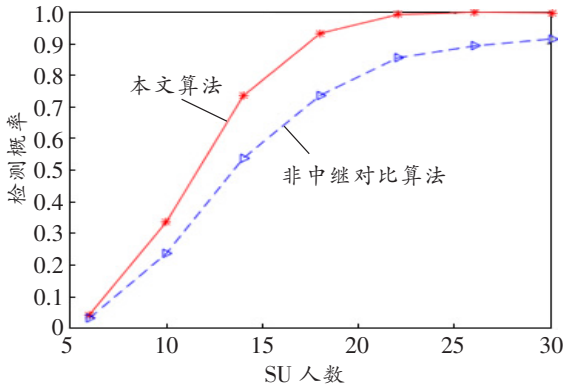


图 7 检测概率随 SU 人数变化的曲线

继而提高了感知性能。所以平台想要获得好的感知性能就必须激励更多的 SU 参与感知。

4 结束语

针对 SU 参与频谱感知的积极性低以及 SU 传输数据的信道条件可能会很差,造成数据不可信等问题,本文提出了一种基于 RAT 的 SU 中继协作频谱感知算法。首先引用 RAT 算法激励 SU 加入到频谱感知当中;然后加入中继协作的方法,使得那些信道条件不好但检测的数据很好的 SU 愿意参与感知,SU 通过计算效用函数确定是否参与;最后 FC 将接收到的数据进行表决融合。仿真结果表明,本文所提算法能够激励 SU 完成感知,在提高用户参与积极性的同时还提高了感知性能。

参考文献:

[1] 卞荔. 认知无线电系统中基于数据融合的协作频谱感知算法的研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2010.

[2] 杨露菁, 余华. 多源信息融合理论与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.

[3] Lei Chen, Jun Wang, Shaoqian Li. Cooperative Spectrum Sensing with Multi-bits Local Sensing Decisions in Cognitive Radio Context[C]// IEEE Wireless Communication and Networking Conference. Las Vegas, NV, USA:IEEE ,2008:570—575.

(上接第 58 页)

参考文献:

[1] Harris J, Lu P, Larocque H, et al. In-Fiber Mach-Zehnder Interferometric Refractive Index Sensors with Guided and Leaky Modes[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2015,206:246—251.

[2] Deng M, Sun X, Wei H, et al. Photonic Crystal Fiber-based Modal Interferometer for Refractive Index Sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26 (6):531—534.

[3] Zhang S, Zhang W, Geng P, et al. Fiber Mach-Zehnder Interferometer based on Concatenated Down- and Up-Tapers for Refractive Index Sensing Applications [J]. Optics Communications, 2013, 288:47—51.

[4] Li X G, Zhao Y, Cai L, et al. Simultaneous Measurement of RI and Temperature based on a Composite Interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(17):1839—1842.

[5] Kim Y H, Park S J, Jeon S W, et al. Thermo-Optic Coefficient Measurement of Liquids based on Simulta-

neous Temperature and Refractive Index Sensing Capability of a Two-Mode Fiber Interferometric Probe[J]. Optics Express, 2012, 20(21):23744—23754.

[6] Wang J, Wu S, Ren W. Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Using an Epoxy Resin-based Interferometer [J]. Appl Opt, 2014, 53(33):7825—7830.

[7] Hsu J M, Horng J S, Hsu C L, et al. Fiber - Optic Michelson Interferometer with High Sensitivity based on a Liquid-Filled Photonic Crystal Fiber[J]. Optics Communications, 2014,331:348—352.

[8] Tong Z, Su J, Cao Y, et al. Simultaneous Measurement based on Composite Interference Structure[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2014,26(13):1310—1313.

[9] 李恩邦, 郑丹莹, 张晨亮, 等. 基于空心光纤多模干涉的折射率传感器研究[J]. 光电子·激光,2010,(10): 1439—1444.

[10] 秦铂洋. 基于空心光纤的 Fabry-Perot 干涉仪及其传感应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2016.