

衰落环境下信道增益和时延的联合估计算法

王鑫,戴丽

(沈阳建筑大学信息与控制工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究衰落环境中认知用户与授权用户之间存在未知时延情况下的频谱感知问题,提出一种信道增益和时延的联合估计算法. 方法 建立一种新的动态状态空间模型,用以描述授权用户状态、时变衰落信道状态和感知时延之间的关系;通过最大后验概率准则估计出信道状态,用以表述信道状态随时间变化的情况;最后基于粒子滤波方法得到授权用户状态估计以及感知时延估计;通过仿真实验,分别从信道增益和感知时延两个角度与现有方法的正确检测概率进行对比与分析. 结果 笔者所提出的信道增益和时延的联合估计算法(SFH)在信道增益角度正确检测概率相比信道增益估计算法(SFC)和能量检测算法(ED)分别提升2%、2.6%,在感知时延角度上提升3.4%、8.7%. 结论 笔者所提算法提高了接收信号统计特性,在保证实时检测的同时,显著提升了存在未知时延的衰落信道环境下的频谱感知性能.

关键词 频谱感知;认知网络;感知时延;衰落信道;联合估计

中图分类号 TN92;TN911

文献标志码 A

Joint Estimation Algorithm of Channel Gain and Delay in Fading Environment

WANG Xin, DAI Li

(School of Information & Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Aiming at the problem of spectrum sensing under unknown delay between secondary users and primary users in fading environment, a joint estimation algorithm of channel gain and perceptual delay is proposed. First, a new dynamic state space model is established to describe the relationship between primary users' state, time-varying fading channel state and perceived delay; then, the channel state is estimated by the maximum posterior probability criterion to express the channel state changes with time. Finally, we can get the estimation results of primary user state and perceived delay based on particle filtering method. The simulation experiment compares and analyzes the correct detection probability of the existing method from two perspectives of channel gain and perceived delay. Compared with the channel gain estimation algorithm(SFC) and energy

收稿日期:2019-10-16

基金项目:国家自然科学基金项目(61903357);辽宁省博士启动基金项目(20170520444);辽宁省自然科学基金项目(20170540752);沈阳建筑大学一般科研项目(2017034)

作者简介:王鑫(1979—),男,副教授,博士,主要从事认知无线网络方面研究.

detection algorithm(ED), the proposed joint estimation algorithm(SFH) has a 2% and 2.6% increase in the probability of correct detection in terms of channel gain perspective, and has a 3.4% and 8.7% improvement in the perceptual delay perspective. The algorithm improves the statistical characteristics of the received signal. On the premise of ensuring real-time detection, the spectrum sensing performance under fading channel environment with unknown delay is significantly improved.

Key words: spectrum sensing; cognitive network; perceptual delay; fading channel; joint estimation

随着无线通信技术飞速发展,人们对数据传输的需求与日俱增,然而,认知用户可利用的频谱资源十分有限,需求量的剧增与频谱资源有限的矛盾日趋尖锐^[1-3],由此推动下,认知无线电技术(Cognitive Radio, CR)逐步发展. 频谱资源被固定分配给授权用户^[4](Primary User, PU),从而在一定程度上限制了认知用户^[5-8](Secondary User, SU)对频谱资源的利用,为提高频谱利用率,允许认知用户在不影响授权用户使用的前提下动态地接入频谱^[9-10]. 频谱感知技术始终是认知无线电技术发展的焦点^[11-13].

由于大多现有的频谱感知方法都存在信息不确定性^[14],在实际检测中很难获得理想的感知性能,为了使接收信号的统计特性更为准确,研究者提出了利用频谱或信道各方面状态信息的联合感知方法:李斌等^[15]在时间上联合估计PU状态和信道衰落增益,描述了授权用户状态和衰落信道状态随时间迁移的特性;E. SIMON等^[16]提出一种基于扩展卡尔曼滤波的载波频偏和信道衰落信息联合估计方法;董众等^[17]在文献[16]的基础上引入了信道时延参数,在一定程度上提高了统计特性的准确性,但没有给出有效的时延参数估计方法;杜昌瀚等^[18]提出了异步系统中多普勒、时延及信道增益参数估计方法,该方法分别对L条路径进行联合估计,在随时间迁移的特性上缺乏动态适应性.

针对上述问题,笔者提出一种衰落环境下信道增益和时延的联合估计算法,该算法在动态信道环境下,应用一种新的动态状态空间模型,用以描述授权用户状态、时变衰落

信道状态和感知时延之间的关系,并将接收信号的累积能量作为该模型的观测信号;在此基础上,通过信道增益估计结果对PU不同状态下的似然函数进行估计,利用该似然估计更新PU工作概率即可判断接收信号中授权用户占用情况. 研究表明:该算法降低了信道对能量检性能的影响,提高了估计过程中接收信号统计特性的准确性,实现了新模型下对授权用户状态的有效估计.

1 系统模型

1.1 授权用户工作状态

授权用户存在空闲和工作两种状态,令 $x_n = 0$ 表示授权用户的空闲状态,记为 H_0 ; $x_n = 1$ 表示授权用户的工作状态,记为 H_1 . 授权用户工作状态转移概率可用一阶两状态马尔可夫链^[19]进行定义:

$$\Pi_{ij} = p(x_n = j | x_{n-1} = i), i, j \in \{0, 1\}. \quad (1)$$

为方便计算后续授权用户工作概率的预测,定义PU在n时刻、n+1时刻都工作的概率为幸存概率,用 p_s 表示;PU在n时刻空闲,但n+1时刻工作的概率为出生概率,用 p_b 表示,则授权用户工作状态转移矩阵表示为

$$P_x = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-p_b) & p_b \\ (1-p_s) & p_s \end{bmatrix}. \quad (2)$$

1.2 时变衰落信道

在无线通信信道环境中,通常考虑信道服从瑞利衰落特性^[20],即信道增益的概率 $p(a)$ 分布服从瑞利分布:

$$p(a) = \frac{a}{\sigma_R^2} \exp\left(-\frac{a^2}{2\sigma_R^2}\right), a \in [0, \infty). \quad (3)$$

式中: a 为信道衰落因子; σ_R^2 为瑞利分布方差.将信道增益范围划分为 K 个相互不重叠的小区域,记为 $A = \{A_0, A_1, \dots, A_{k-1}\}$,其中每个小区域记为 $A_k \in [v_k, v_{k+1})$,相应的信道增益表示为

$$A_k = \frac{\int_{v_k}^{v_{k+1}} af(a) da}{\int_{v_k}^{v_{k+1}} f(a) da}, k = 0, 1, \dots, k-1. \quad (4)$$

信道状态由 $n-1$ 时刻的 A_k 状态到 n 时刻的 A_{k+} 状态的转移概率表示为

$$p_{A_k \rightarrow A_{k+}} \triangleq p(a_n = A_{k+} | a_{n-1} = A_k) = \frac{\int_{v_k^+}^{v_{k+1}^+} \int_{v_k}^{v_{k+1}} f(a_{n-1}, a_n) da_{n-1} da_n}{\int_{v_k}^{v_{k+1}} f(a) da}. \quad (5)$$

式中: $f(a_{n-1}, a_n)$ 为瑞利信道概率密度函数.

1.3 授权用户和认知用户感知时延

信号在无线信道传播过程中会受到衰落与时延的影响,从而导致认知用户接收信号不完整,统计特性不准确,因此频谱感知性能下降.

假设感知周期内采样 M 次, n 时刻存在感知时延 $t_n, t_n \in [0, M]$.因此在一个感知周期内,前 t_n 个采样仅包含噪声信号,后 $M-t_n$ 个采样同时包含授权用户信号和噪声信号.由于信道时延是随机的,笔者采用马尔可夫随机游走模型^[21]对 n 时刻感知时延状态进行建模:

$$t_n = (1-s)t_{n-1}P_t + st_{n-1}I. \quad (6)$$

式中: s 为状态自转移概率; P_t 为状态转移矩阵; I 为单位矩阵.

1.4 动态状态空间模型

根据以上描述,笔者提出一种动态状态空间模型用以描述授权用户工作状态、衰落信道状态和感知时延之间的关系,如式(7)所示:

$$\begin{cases} x_n = F(x_{n-1}), \\ a_n = H(a_{n-1}), \\ t_n = T(t_{n-1}), \\ y_n = G(x_n, a_n, t_n, z_n). \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_n 为 n 时刻授权用户工作状态; a_n 为 n 时刻信道增益状态; t_n 为 n 时刻授权用户发射机和认知用户接收机感知时延状态.根据上一时刻历史状态信息,并分别按照本节描述的状态转移函数进行各自状态的转移, y_n 为系统观测值,定义为一个感知周期内采样信号的能量之和,即

$$y_n = \begin{cases} \sum_{m=1}^M z_{n,m}^2, & H_0; \\ \sum_{m=1}^{t_n} z_{n,m}^2 + \sum_{m=t_n+1}^M (a_n x_n + z_{n,m})^2, & H_1. \end{cases} \quad (8)$$

式中: $M = T_s f_s$; f_s 为采样频率; m 为第 m 次采样, $m \in [0, M]$;信道噪声 z 服从均值为0,方差为 σ^2 的加性高斯白噪声.

2 联合估计算法

由于硬件条件的限制,频谱感知往往存在不可忽视的感知时延,对频谱感知准确率和频谱资源利用率造成很大影响.因此笔者在频谱感知的过程中同时考虑了信道增益和感知时延两个方面的信息,以获得接收信号中更多的有用信息,从而提高笔者所提算法的正确检测概率.

笔者提出的联合估计算法(SFH)中,首先对信道增益状态进行了估计,然后结合增益估计结果和时延粒子预测分别对授权用户工作和空闲两种状态下的似然函数进行估计,最后通过得到似然函数对授权用户的工作概率进行更新和估计.可以通过授权用户的工作概率对接收信号的感知结果进行判断.

2.1 信道增益估计

2.1.1 接收信号分类

首先将信号进行预估计,假设接收信号是由信道增益集合 A 中的最小值产生的,根据采样信号能量值与衰落信道最小增益设定一个门限,如果观测值大于该门限,则预估计该频段为工作状态,记为 $x_n^* = 1$;如果观测值

小于该门限,则预估计该频段为空闲状态,记为 $x_n^+ = 0$.

根据频谱感知模型,相干时间内存在多个持续时间相同的感知-传输时隙,将其区分为首时隙和非首时隙,认知用户在每个时隙中进行一次频谱感知.由于信道的慢衰落特性,相干时间内信道增益保持不变,因此信道状态只在信道首时隙时才可能发生跳变,首/非首时隙可由求余公式进行区分.

2.1.2 不同情况下的信道状态分析

根据上述分类描述可将信号分为4种情况,由最大后验概率准则来分析衰落信道增益的估计值.

(1) $x_n^+ = 0$, 首时隙信号: 由于信道增益只可能在首时隙发生跳变,利用信道状态转移概率计算当前时刻信道状态,即

$$\hat{a}_n = \arg \max_{a_n \in A} p(a_n | \hat{a}_{n-1}). \quad (9)$$

(2) $x_n^+ = 0$, 非首时隙信号: 当前时刻信道增益不会发生跳变,前一时刻的估计状态为当前时刻的估计状态,即

$$\hat{a}_n = \hat{a}_{n-1}. \quad (10)$$

(3) $x_n^+ = 1$, 首时隙信号: 由于信道状态转移方式只与马尔可夫链有关,根据贝叶斯公式该时刻的信道估计可表示为

$$\hat{a}_n = \arg \max_{a_n \in A} p(a_n | \hat{a}_{0:n-1}, \hat{x}_{0:n-1}, x_n^+ = 1, y_{0:n}) \propto \arg \max_{a_n \in A} [p(y_n | \hat{a}_{0:n-1}, a_n, \hat{x}_{0:n-1}, x_n^+ = 1, y_{0:n-1}) \times p(a_n | \hat{a}_{0:n-1}, \hat{x}_{0:n-1}, x_n^+ = 1, y_{0:n-1})]. \quad (11)$$

式中: $p(y_n | \cdot)$ 为似然函数,在 $x_n^+ = 1$ 的条件下服从正态分布.

(4) $x_n^+ = 1$, 非首时隙信号: 当前时刻信道增益幅值可根据周期内累积信息来估计,周期内累积观测值用 Y_n 表示, $x_n^+ = 1$ 的累积次数用 C_n 表示,设首时隙 $Y_n = y_n, C_n = 0$,利用以下公式 Y_n 对 C_n 进行更新.

$$Y_n = Y_{n-1} + y_n. \quad (12)$$

$$C_n = C_{n-1} + 1. \quad (13)$$

利用累积信息估计信道状态,可表示为 $\hat{a}_n \propto \arg \max_{a_n \in A} [p(Y_n | x_n^+ = 1, a_n) p(a_n | \hat{a}_{n-1})] = \arg \max_{a_n \in A} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi C_n \sigma}} \exp \left[-\frac{(Y_n - C_n \mu)^2}{2 C_n \sigma^2} \right] \right\} \times p(a_n | \hat{a}_{n-1})$. (14)

2.2 感知时延及授权用户状态预测

首先,生成一组离散粒子用以表示感知时延,假设 n 时刻第 i 个粒子的状态值表示为 $t_{n|n}^{(i)}$, 相应的粒子权值表示为 $\varepsilon_{n|n}^{(i)}$. 离散粒子中包括幸存粒子和出生粒子,其权重预测表达式分别为

$$\varepsilon_{n|n-1}^{(i)} = \frac{p_s q_{n-1|n-1}}{q_{n|n-1}} \varepsilon_{n-1}^{(i)}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

$$\varepsilon_{n|n-1}^{(i)} = \frac{p_b (1 - q_{n-1|n-1})}{q_{n|n-1}} \frac{1}{B}, i = 1, 2, \dots, N+B. \quad (16)$$

式中: N 为幸存粒子的个数; B 为出生粒子的个数; q_n 为 n 时刻授权用户工作概率,即 $n-1$ 时刻 PU 工作概率乘以幸存概率与 $n-1$ 时刻 PU 空闲概率乘出生概率之和.

$$q_{n|n-1} = p_b (1 - q_{n-1|n-1} + p_s q_{n-1|n-1}). \quad (17)$$

2.3 似然函数估计

根据中心极限定理,当采样点数较大时可近似地认为似然函数服从正态分布,当授权用户为空闲状态时,似然函数的均值和方差表示为

$$\mu_0 = M\sigma^2. \quad (18)$$

$$\sigma_0^2 = 2M\sigma^4. \quad (19)$$

当授权用户为工作状态时,似然函数的均值和方差表示为

$$\mu_1 = M\sigma^2 + (M - t_{n|n-1}^{(i)}) \hat{a}_n^2. \quad (20)$$

$$\sigma_1^2 = 2M\sigma^4 + 4(M - t_{n|n-1}^{(i)}) \hat{a}_n^2 \sigma^2. \quad (21)$$

将2.1小节中得到的信道增益估计结果带入上式,然后将式(18)~(21)代入正态分布基础公式可分别得到两种状态下的似然函数 $p(y_n | x_n = 0)$ 和 $p(y_n | x_n = 1)$,最后根据感知时延粒子权重计算似然概率为

$$I_n = \sum_{i=1}^{N+B} \frac{p(y_n | x_n = 0)}{p(y_n | x_n = 1)} \varepsilon_{n|n-1}^{(i)}. \quad (22)$$

似然概率表示当前时刻状态与真实状态的相似程度,可用来修正前一刻授权用户工作概率,笔者在似然估计的过程中结合了当前时刻增益和时延的信息,用以修正该时刻下的授权用户工作状态具有较好的效果.

2.4 授权用户状态估计

利用式(22)似然概率对 n 时刻授权用户工作概率进行更新.

$$q_{n|n} = \frac{I_n q_{n|n-1}}{1 - q_{n|n-1} + I_n q_{n|n-1}} \quad (23)$$

将授权用户工作概率 $q_{n|n}$ 与判决门限 λ 进行比较,若 $q_{n|n} < \lambda$,则判断授权用户空闲;若 $q_{n|n} \geq \lambda$,则判断授权用户工作,文中可设 $\lambda = 0.5$,表达式如下:

$$\hat{x}_n = \begin{cases} 0, & q_{n|n} < \lambda; \\ 1, & q_{n|n} \geq \lambda. \end{cases} \quad (24)$$

当 $\hat{x}_n = 0$ 时,观测值中只有噪声信号,可以用前一刻估计值作为当前时刻的估计值;当 $\hat{x}_n = 1$ 时,利用重采样后得到的粒子状态和相应的权值来估计感知时延的大小.

根据以上描述,笔者所提算法流程如图1所示.

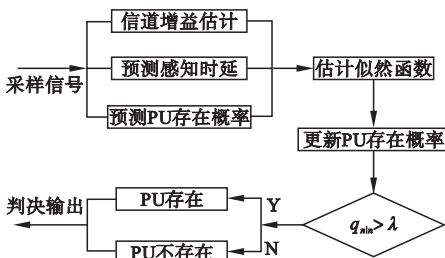


图1 SFH算法流程图

Fig.1 SFH algorithm flow chart

3 仿真分析

判断频谱感知性能要综合考虑算法的正确检测概率、虚警概率和漏检概率.正确检测概率表示为授权用户工作且感知结果正确的概率,虚警概率表示在授权用户空闲但感知结果为授权用户工作的概率,漏检概率表示在授权用户工作的条件下检

测出授权用户空闲的概率.笔者采用算法的正确检测概率作为判断感知性能的度量标准.

由于笔者提出的 SFH 算法同时考虑了信道增益和感知时延两个方面的信息,因此在仿真实验的过程中主要从这两个方向分别进行算法检测性能的对比与分析.仿真实验均在 MATLAB R2016a 平台上实现.

3.1 不同信道状态下性能对比分析

首先从信道角度验证 SFH 算法的性能.假设 $p(H_0) = p(H_1) = 0.5$,感知周期内采样点数 $M = 100$,令最大多普勒频移 f_D 分别为 0.02、0.05 和 0.1,那么在不同的最大多普勒频移下,算法检测性能如图2所示.

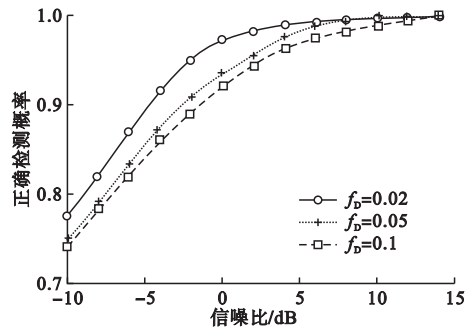


图2 不同最大多普勒频移下检测性能

Fig.2 Detection performance under different maximum Doppler shift

由图2可知,笔者所提 SFH 算法的正确检测概率随信噪比增大而增大,随着最大多普勒频移增大而减小.当信噪比为 0 时,最大多普勒频移分别取 0.02、0.05 和 0.1 所得到的正确检测概率分别为 0.974、0.935、0.922.随着最大多普勒频移增加,信道变化速度加快,认知用户捕捉信息难度增加,获取有用信息量减少,相应的检测性能也随之降低.

当最大多普勒频移取 0.02 时,笔者提出的 SFH 算法与信道增益估计算法 SFC 和传统能量检测方法性能对比如图3所示.

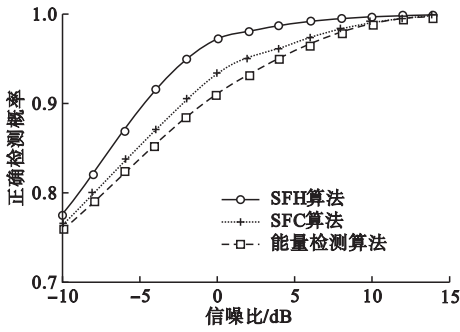


图3 SFH算法与其他算法性能对比

Fig.3 Performance comparison between SFH algorithm and other methods

由图3可知,SFH算法与其他两种算法相比正确检测概率具有较为明显的提高,当 $f_D = 0.02$ 且要求正确检测概率 $p_d = 0.95$ 时,传统的能量检测方法需要信噪比为4 dB,SFC算法需要信噪比为2 dB,而采用笔者所提SFH方法仅需要信噪比约-2 dB,分别提升约6 dB、4 dB.当信噪比为6 dB时,算法的正确检测概率分别为0.992、0.972和0.966.笔者所提出的SFH算法相比于其他两种对比算法分别提高了2%、2.6%;相比于传统的能量检测方法,SFH算法由于获取了信道相关的信息,在估计和检测过程中能够参考更多的有用信息,因此笔者所提算法具有更好的正确检测概率.

图4为SFH算法与只考虑信道状态的SFC算法和不考虑信道状态的传统能量检测方法的ROC曲线对比,同样假设 $p(H_0) = p(H_1) = 0.5$,采样点数 $M = 100$,设定最大多普勒频移为 $f_D = 0.05$.

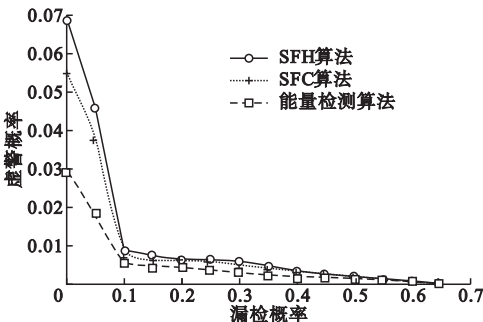


图4 SFH算法与其他方法的ROC曲线对比

Fig.4 Comparison of ROC curves between SFH algorithm and other methods

仿真结果表明,在虚警概率一定的情况下,检测概率越高,算法性能越好.由曲线的数值可知,虚警概率一定的情况下,SFH算法的检测概率高于SFC算法,高于传统的能量检测方法.SFH算法和SFC算法都考虑了信道状态信息,由于SFH算法更新了观测信号的似然函数,即观测信号的均值和方差,提高了接收信号的统计特性,从而能够在一定程度上优于SFC算法,更优于不考虑信道状态信息的能量检测方法.

3.2 不同感知时延下性能对比分析

笔者从感知时延角度验证SFH算法的检测性能,首先研究感知时延范围对频谱感知性能的影响,假设 $p(H_0) = p(H_1) = 0.5$,设采样点数 $M = 100$,总时刻 N 设为2000个时隙,感知时延的范围 R_t 分别设为20、50、80.图5为不同感知时延范围内的检测性能.

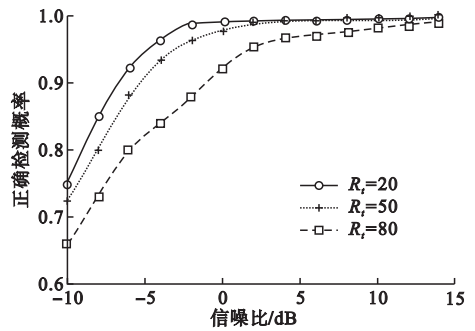


图5 不同感知时延范围下的检测性能

Fig.5 Detection performance under different sensing delay ranges

由图5可知,正确检测概率随着感知时延范围增大而减小,若给定信噪比为-4 dB,当感知时延范围为 $[0, 20]$ 时,检测概率为0.963;当感知时延范围为 $[0, 50]$ 时,检测概率为0.935;当感知时延范围为 $[0, 80]$ 时,检测概率为0.840.由于接收信号中同时包含了噪声信号和有用信号,感知时延范围越小,接收到信号中有效信号的信息量越大,因此感知时延的范围越小,获取有用信息越多,算法性能就越好.

图6为不同感知时延估计的相对误差结果. 相对误差估计结果的绝对误差与约定真值之比乘以100%, 一般来说, 相对误差更能反映估计结果的可信程度. 由图6可知, 当信噪比低于2 dB时, 感知时延的范围越小, 所估计结果越接近真实值, 得到的相对误差越小; 当信噪比增大, 信号中的噪声减少, 感知时延的相对误差随之减小, 当信噪比增大到14 dB时, 相对误差可达到0.014.

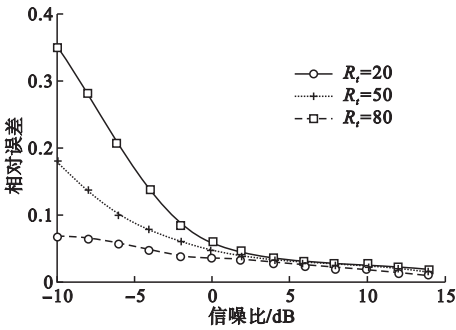


图6 不同感知时延范围下的相对误差

Fig. 6 Relative error under different perceptual delay ranges

在考虑不同感知时延范围对检测结果影响的同时, 分别采用笔者提出 SFH 算法和传统能量检测方法针对感知时延对检测性能的影响进行了仿真实验, 结果如图7所示. 考虑感知时延信息能够降低接收信号中噪声的影响, 而传统的能量检测方法是考虑感知时延信息的. 因此, 笔者在仿真中增设了一种使用感知时延均值的方法作为参比实验, 充分考虑了感知时延对算法性能的影响. 假设

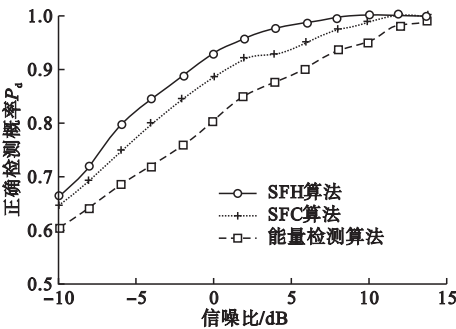


图7 SFH 算法与其他算法性能对比

Fig. 7 Performance comparison between SFH algorithm and other algorithms

$p(H_0) = p(H_1) = 0.5$, 设感知周期内采样点数 $M = 100$, 总时刻 N 设为 2000 个时隙, 授权用户出生概率 $p_b = 0.1$, 幸存概率 $p_s = 0.9$.

由图7可知, 当信噪比为6 dB时, 传统的能量检测方法的正确检测概率为89.8%, 用均值替代时延的方法正确检测概率为95.1%, 笔者提出的 SFH 算法正确检测概率为98.5%, 相比其他两种方法分别提高了3.4%和8.7%. 正确检测概率要求为0.95时, 传统的能量检测方法需要信噪比为10 dB, 用均值替代时延的方法所需信噪比为8.7 dB, 相比不考虑时延的方法提高了1.3 dB, 而笔者所提方法达到0.95的正确检测概率仅需要1.5 dB, 相比不考虑时延的方法提高了8.5 dB. 因此, 考虑感知时延的 SFH 算法优于用均值替代时延的算法和传统的能量检测方法.

4 结 论

(1) 笔者分别从信道增益和感知时延两个角度进行了仿真对比与分析, 实验结果证明了笔者所提 SFH 算法较其对比算法具有明显的优势, 能够提高不确定环境下的检测性能.

(2) 笔者提出的 SFH 算法提高了观测信号的统计特性, 在保证实时检测的同时, 通过感知时延的估计有效降低了接收信号中噪声的影响, 显著提高了算法的频谱感知性能.

参考文献

[1] ZHANG Zhenjiang, ZHANG Wenyu, ZHADALLY S, et al. Cognitive radio spectrum sensing framework based on multi-agent architecture for 5G networks [J]. IEEE wireless communications, 2015, 22 (6): 34 - 39.

[2] AMJAD M, REHMANI M, MAO S. Wireless multimedia cognitive radio networks: A comprehensive survey [J]. IEEE communications surveys and tutorials, 2018, 20 (2): 1056 - 1103.

[3] CHEN Yanjiao, XIONG Yuxuan, WANG Qiang. Ensuring minimum spectrum requirement in matching-based spectrum

- allocation [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2018, 17(9):2028-2040.
- [4] BUDARAJU S, BHAGYAVENI M. A novel energy detection scheme based on channel state estimation for cooperative spectrum sensing [J]. Computers and electrical engineering, 2017, 57:176-185.
- [5] 李颜良. 认知用户的动态频谱接入方法性能研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
(LI Yanliang. Research on performance of cognitive user dynamic spectrum access method [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.)
- [6] GHASEMI A, SOUSA E. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]//First IEEE international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access networks. [S. l.]: IEEE, 2005:8-11.
- [7] SCHRAGO C, AGUIAR B, MELLO B. Comparative evaluation of maximum parsimony and Bayesian phylogenetic reconstruction using empirical morphological data [J]. Journal of evolutionary biology, 31(10):1477-1484.
- [8] 斯奇, 王宇, 邓云凯. 一种基于最大后验框架的聚类分析多基线干涉 SAR 高度重建算法 [J]. 雷达学报, 2017, 6(6):640-652.
(SI Qi, WANG Yu, DENG Yunkai. A novel cluster-analysis algorithm based on MAP framework for multi-baseline in SAR height reconstruction [J]. Journal of radars, 2017, 6(6):640-652.)
- [9] AGAPIOU S, BURGER M, DASHTI M, et al. Sparsity-promoting and edge-preserving maximum a posteriori estimators in non-parametric Bayesian inverse problems [J]. Inverse problems, 2018, 34(4):045002.
- [10] HUANG He, YUAN Chaowei. Cooperative spectrum sensing over generalized fading channels based on energy detection [J]. China communications, 2018, 15(5):128-137.
- [11] 刘玉磊, 梁俊, 肖楠. 基于信道历史状态感知信息的频谱感知方法 [J]. 通信学报, 2017, 38(8):118-130.
(LIU Yulei, LIANG Jun, XIAO Nan. Spectrum sensing method based on past channel sensing information [J]. Journal on communications, 2017, 38(8):118-130.)
- [12] YIN Shen, ZHU Xiangping. Intelligent particle filter and its application to fault detection of nonlinear system [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2015, 62(6):3852-3861.
- [13] 杜先君, 刘洲. 遗传优化粒子滤波在动态谐波检测中的应用 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(8):108-114.
(DU Xianjun, LIU Zhou. Application of genetic optimized particle filter in dynamic harmonic detection [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(8):108-114.)
- [14] OSTOVAR A, ZHENG Chang. Optimization of cooperative spectrum sensing via optimal power allocation in cognitive radio networks [J]. LET communications, 2017, 11(13):2116-2124.
- [15] LI Bin, ZHAO Chenglin, SUN Mengwei. Spectrum sensing for cognitive radios in time-variant flat-fading channels: a joint estimation approach [J]. IEEE transactions on communications, 2014, 62(8):2665-2680.
- [16] SIMON E, HIJAZI H, ROS L, et al. Joint estimation of carrier frequency offset and channel complex gains for OFDM systems in fast time-varying vehicular environments [C]//IEEE international conference on communications; Workshop on vehicular connectivity. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010:1234-1239.
- [17] 董众, 徐卓异, 张善从. 基于粒子滤波的 OFDM 载波频偏和信道联合估计 [J]. 现代电子技术, 2014, 37(22):48-51.
(DONG Zhong, XU Zhuoyi, ZHANG Shancong. Carrier frequency offset and channel joint estimating algorithm for OFDM system base on PF [J]. Modern electronics technique, 2014, 37(22):48-51.)
- [18] 杜昌瀚, 韩航程, 安建平. DS-CDMA 系统多普勒、时延及信道的联合估计方法 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(7):726-732.
(DU Changhao, HAN Hangcheng, AN Jianping. Jointly estimation for delay, Doppler and channel parameters in the DS-CDMA systems [J]. Transactions of Beijing institute of technology, 2018, 38(7):726-732.)
- [19] 刘鹤飞, 王坤, 蒋成飞. 隐状态个数未知的隐马尔可夫多元正态分布的贝叶斯推断 [J]. 统计研究, 2017, 34(12):119-125.
(LIU Hefei, WANG Kun, JIANG Chengfei. Bayesian inference of hidden markov multivariate normal distribution with unknown hidden state [J]. Statistical research, 2017, 34(12):119-125.)
- [20] GUPTA S, MEHTA C. Performance analysis of OFDM system using non-conventional transform and non-conventional mapping schemes over rayleigh channel [J]. Journal of communication engineering and systems, 2019, 2(1):13-20.
- [21] 王新恒, 王倩云, 王佳杰. 基于随机游走的自适应矩阵填充算法 [J]. 通信学报, 2017, 38(9):95-105.
(WANG Xinheng, WANG Qianyun, WANG Jiajie. Self-adaptive random walk based matrix completion algorithm [J]. Journal on communications, 2017, 38(9):95-105.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)