



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103973382 B

(45) 授权公告日 2016. 04. 27

(21) 申请号 201410211335. 8

(22) 申请日 2014. 05. 19

(73) 专利权人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市太白南路 2 号

(72) 发明人 周福辉 李赞 杨鼎 刘向丽

杜军朝 刘惠 高锐 黄海燕

关磊 熊天意 胡伟龙

(74) 专利代理机构 陕西电子工业专利中心

61205

代理人 王品华 黎汉华

CN 103220052 A, 2013. 07. 24,

CN 102547742 A, 2012. 07. 04,

CN 102412918 A, 2012. 04. 11,

CN 102118199 A, 2011. 07. 06,

CN 101359930 A, 2009. 02. 04,

杨丰瑞等. 二维空间谱的频谱感知技术研究. 《广东通信技术》. 2009, (第 04 期), 58-61.

王磊等. 基于随机矩阵理论的协作频谱感知. 《电子与信息学报》. 2009, (第 08 期), 1925-1929.

审查员 廖小丽

(51) Int. Cl.

H04B 17/382(2015. 01)

(56) 对比文件

CN 102118201 A, 2011. 07. 06,

CN 103795481 A, 2014. 05. 14,

CN 102946288 A, 2013. 02. 27,

CN 103532649 A, 2014. 01. 22,

CN 103391143 A, 2013. 11. 13,

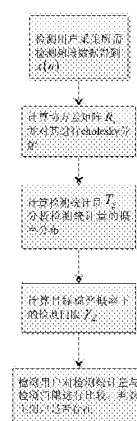
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

基于有限随机矩阵的频谱检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于有限随机矩阵的频谱检测方法,主要解决现有基于特征值频谱检测方法获取检测门限困难和能量频谱检测方法受噪声不确定度影响大的问题。其实现步骤是:(1)检测用户根据所要检测的频段,采集该频段的数据 $x(n)$;(2)检测用户根据采集的数据构建协方差矩阵 R_x ,并对该矩阵进行 Cholesky 分解;(3)计算检测统计量 T_ξ ;(4)分析检测统计量 T_ξ 的概率分布,根据 T_ξ 的概率分布计算目标虚警概率下的检测门限 γ_ξ ;(5)检测用户对检测统计量与检测门限进行比较,判决主用户是否存在。本发明具抗噪声不确定度、检测门限精准、检测性能高的优点,可用于无线通信。



1.一种基于有限随机矩阵的频谱检测方法,包括如下步骤:

(1)将占用当前频段的用户信号定义为主用户,将检测当前频段上主用户存在与否以试图占用该频段的用户信号定义为检测用户,检测用户只配备单根天线,检测用户根据所要观察的频段,采集该频段的数据 $x(n)$,其中 $n=1, \dots, N$, N 为采样的点数;

(2)检测用户根据采集的数据,构建检测统计量 T_ξ :

(2.1)检测用户根据采集到的数据,构建数据矩阵 X 和协方差矩阵 R_x ,其中数据矩阵 X 为:

$$X = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(N_s) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(N_s+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(M) & x(M+1) & \cdots & x(M+N_s-1) \end{bmatrix}$$

协方差矩阵为:

$$R_x = \frac{1}{N_s} X X^H,$$

其中 N_s 为每段数据的点数, M 为数据段数, $(\cdot)^H$ 为Heimitian转置;

(2.2)检测用户对协方差矩阵进行Cholesky分解,得到分解后的上三角矩阵,即:

$$R_x = L^T L,$$

其中, L 为上三角矩阵,其表示为:

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1M} \\ 0 & l_{22} & \cdots & l_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & l_{MM} \end{bmatrix},$$

其中, l_{ij} 为上三角矩阵 L 的第 i 行 j 列元素, $i=1, \dots, M, j=1, \dots, M$;

(2.3)检测用户根据分解后的上三角矩阵 L ,构建检测统计量 T_ξ :

$$T_\xi = \frac{l_{11}^2}{l_{MM}^2},$$

其中 l_{11} 为上三角矩阵 L 的主对角线的第一个元素, l_{MM} 为上三角矩阵 L 的主对角线的第 M 个元素;

(3)检测用户根据检测统计量 T_ξ 的概率分布,计算检测门限 γ_ξ :

$$\gamma_\xi = \frac{m}{n} P_F^{-1}(1 - P_{fa}, m, n),$$

其中, $P_F^{-1}(\cdot)$ 为F分布 $F(m, n)$ 的累积量分布函数 $P_F(p, m, n)$ 的逆函数, $m=N_s, n=N_s-M+1$, P_{fa} 为虚警概率,取值为 $(0, 1)$, p 为 $P_F(p, m, n)$ 的自变量,取值为 $(0, 1)$;

(4)将步骤(2.3)中得到的检测统计量 T_ξ 与步骤(3)中得到的检测门限 γ_ξ 进行比较,当 $T_\xi \geq \gamma_\xi$ 时,判决为主用户存在,即当前频段频谱已被某用户占用,否则,判决为主用户不存在,即当前频段频谱为空闲状态,允许检测用户利用。

2. 根据权利要求1所述的基于有限随机矩阵的频谱检测方法, 其特征在于步骤(2.2)所述的检测用户对协方差矩阵进行Cholesky分解, 按如下公式进行:

$$\begin{cases} l_{ii} = \left(R_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} l_{ik}^2 \right)^{1/2} & i=j \\ l_{ij} = \frac{R_{ij} - \sum_{k=1}^{j-1} l_{ik} l_{jk}}{l_{jj}} & j>i \end{cases},$$

其中 R_{ij} 为协方差矩阵 R_x 的第 i 行 j 列元素, $i=1, \dots, M, j=1, \dots, M, l_{ij}$ 为上三角矩阵 L 的第 i 行 j 列元素, $i=1, \dots, M, j=1, \dots, M$ 。

3. 根据权利要求1所述的基于有限随机矩阵的频谱检测方法, 其特征在于步骤(3)所述的累积量分布函数 $P_F(p, m, n)$, 表示如下:

$$P_F(p, m, n) = \int_p^{+\infty} F_{m,n}(x) dx,$$

其中, $F_{m,n}(x)$ 表示服从分子自由度为 m , 分母自由度为 n 的F分布函数。

基于有限随机矩阵的频谱检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于无线通信技术领域,涉及一种频谱检测方法,可用于认知无线电系统中的频谱检测。

背景技术

[0002] 随着无线和移动通信的迅速发展,日益增长的无线频谱需求与有限的频谱资源之间的矛盾已经成为当前无线通信行业的突出矛盾,然而与此同时,又存在着大量授权的频谱被闲置或者利用率极低的现象。为了改善频谱利用率低下的现状,J.Mitola等人提出了认知无线电的概念,其主要思想是在已授权的频段内寻找空闲频段,在不影响授权用户正常通信的前提下,允许认知用户能够检测并接入到当前空闲的频段,从而大幅提高频谱利用率。为了达到充分利用频谱并且尽量保护授权用户的目的,认知用户必须准确地检测其周围的频谱占用情况,检测出当前频段内有无主用户信号存在,以尽量减小对授权用户正常通信的干扰,因此认知无线电中的频谱检测研究受到了国内外学者的广泛关注。

[0003] 频谱检测是实现认知无线电的先决条件,使得频谱检测得到广泛研究。现有的频谱检测方法,主要有三种:

[0004] 1)能量检测。通过计算接收到信号的能量,根据信号的能量大小检测主用户是否存在。该方法实现简单,容易确定门限。然而,在低信噪比情况下,由于信号受到深度衰落和多径衰落等因素的影响,该方法不能有效的正常工作。而且,能量检测方法受噪声不确定度的影响,在实际应用中受限。

[0005] 2)基于循环平稳的检测。利用信号在循环频率处所表现的峰值特性与噪声在循环频率处没有峰值特性来检测主用户是否存在。该方法抗噪性能好但需要主用户的先验信息且复杂度高。在认知无线电中会降低其系统效率,使实际应用受限。

[0006] 3)基于特征值分解的检测。利用主用户信号的相关性,通过对协方差矩阵进行特征值分解,构造检测统计量。该方法能够抵抗噪声不确定度问题,且性能优于能量检测。然而,该方法只能采用无限采样点以确定近似的检测门限,其检测性能随之降低。

[0007] 吉首大学提出的专利“一种基于协方差矩阵分解的盲频谱感知方法”(申请号CN201010618520申请公布号CN 102118201A)中公开了一种基于协方差矩阵分解的盲频谱感知方法。该方法假设检测用户有多根接收天线,利用多天线接收到信号之间的相关性,通过构造协方差矩阵,构造检测统计量,达到检测频谱空洞是否存在的目的。然而,A.Nosratinia,A.Hedayat,和T.E.Hunter等人在其发表的论文“Cooperative Communication in Wireless Networks”(IEEE Comm.Magazine,vol.42,no.10,pp.74-80,Oct.2004)中提出在一些情况下,例如体积受限或者能量供应受限,无线终端不能配备多根天线,该检测方法不能使用。而且,该方法利用协方差矩阵分解后得到的矩阵的非对角元素平方之和与对角元素平方之和之比作为检测统计量,计算该方法的检测统计量时需要计算所有的元素平方之和,计算复杂度较高。在能量有限系统中,特别是移动终端情况下,因该方法需要消耗较多的能量,使得该方法使用受限。本发明解决了专利申请“一种基于协方差

矩阵分解的盲频谱感知方法”中提出的感知算法不能适用于体积受限,只配备单根天线的应用场景的缺点,实现在感知单元体积受限场景下达到感知信号是否存在的目的。

发明内容

[0008] 本发明的目的在于针对上述现有频谱检测方法存在的不足,提出一种基于有限随机矩阵的频谱检测方法,以提高抗噪声不确定性的能力,降低检测复杂度,精确确定判决门限,实现对主用户信号的检测。

[0009] 为实现上述目的,本发明的技术方法包括如下步骤:

[0010] (1)将占用当前频段的用户信号定义为主用户,将检测当前频段上主用户存在与否以试图占用该频段的用户信号定义为检测用户,检测用户只配备单根天线。检测用户根据所要观察的频段,采集该频段的频谱数据 $x(n)$,其中 $n=1, \dots, N$, N 为采样的点数;

[0011] (2)检测用户根据采集的数据,构建检测统计量 T_ξ :

[0012] (2.1)检测用户根据采集到的数据,构建数据矩阵 X 和协方差矩阵 R_x ,其中数据矩阵 X 为:

$$[0013] \quad X = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(N_s) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(N_s+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x(M) & x(M+1) & \cdots & x(M+N_s-1) \end{bmatrix}$$

[0014] 协方差矩阵为:

$$[0015] \quad R_x = \frac{1}{N_s} X X^H,$$

[0016] 其中 N_s 为每段数据的点数, M 为数据段数, $(\cdot)^H$ 为Heimitian转置;

[0017] (2.2)检测用户对协方差矩阵进行Cholesky分解,得到分解后的上三角矩阵,即:

$$[0018] \quad R_x = L^T L,$$

[0019] 其中, L 为上三角矩阵,其表示为:

$$[0020] \quad L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1M} \\ 0 & l_{22} & \cdots & l_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & l_{MM} \end{bmatrix},$$

[0021] 其中, l_{ij} 为上三角矩阵 L 的第 i 行 j 列元素, $i=1, \dots, M$, $j=1, \dots, M$;

[0022] (2.3)检测用户根据分解后的上三角矩阵 L ,构建检测统计量 T_ξ :

$$[0023] \quad T_\xi = \frac{l_{11}^2}{l_{MM}^2},$$

[0024] 其中 l_{11} 为上三角矩阵 L 的主对角线的第一个元素, l_{MM} 为上三角矩阵 L 的主对角线的第 M 个元素;

[0025] (3)检测用户根据检测统计量 T_ξ 的概率分布,计算检测门限 γ_ξ :

$$[0026] \quad \gamma_{\xi} = \frac{m}{n} P_F^{-1}(1 - P_{fa}, m, n),$$

[0027] 其中, $P_F^{-1}(\cdot)$ 为F分布F(m,n)的累积量分布函数 $P_F(p, m, n)$ 的逆函数, $m = N_s$, $n = N_s - M + 1$, P_{fa} 为虚警概率, 取值为(0, 1), p 为 $P_F(p, m, n)$ 的自变量, 取值为(0, 1);

[0028] (4)将步骤(2.3)中得到的检测统计量 T_{ξ} 与步骤(3)中得到的检测门限 γ_{ξ} 进行比较, 当 $T_{\xi} \geq \gamma_{\xi}$ 时, 判决为主用户存在, 即当前频段频谱已被某用户占用, 否则, 判决为主用户不存在, 即当前频段频谱为空闲状态, 允许检测用户利用。

[0029] 本发明具有以下优点:

[0030] 1、本发明利用主用户信号的相关性进行检测, 不需要检测用户配备多根天线, 系统开销小, 所需成本低。而且检测性能优于基于最大最小特征值的检测方法。

[0031] 2、本发明是一种全盲检测方法, 不需要任何有关主用户, 信道和噪声的先验信息。

[0032] 3、本发明基于有限随机矩阵的Cholesky分解, 根据随机矩阵理论, 得到检测门限和虚警概率的闭式表达式, 能在任意的采样点数下获得与目的虚警概率对应的精确的检测门限。

[0033] 4、本发明能快速确定检测门限, 而且只需要使用Cholesky分解后得到的上三角矩阵对角元素的第一个元素和最后一个元素, 降低了频谱检测复杂度, 可以在实际中广泛应用。

附图说明

[0034] 图1是本发明的实现流程图;

[0035] 图2是本发明和基于最大最小特征值的检测方法的判决门限准确性对比图;

[0036] 图3是本发明和基于最大最小特征值检测方法的“信噪比——检测概率”对比图;

[0037] 图4是本发明和基于最大最小特征值的检测方法的ROC曲线对比图。

具体实施方式

[0038] 参照图1, 本发明的实现步骤如下:

[0039] 步骤1, 检测用户根据所要观察的频段, 采集该频段的数据。

[0040] 检测用户根据所要观察的频段, 利用单天线采集并用相应的滤波器滤出该频段的信号, 然后, 在满足采样定理的前提条件下, 对该频段的数据进行采集, 得到采集后的数据 $x(n)$, 其中 $n = 1, \dots, N$ 。

[0041] 步骤2, 检测用户根据采集到的数据 $x(n)$, 构建数据矩阵 X , 计算协方差矩阵 R_x 。

[0042] 2a) 检测用户根据采集到的数据 $x(n)$, 构建 M 行 N_s 列的数据矩阵 X :

$$[0043] \quad X = \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(N_s) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(N_s + 1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(M) & x(M + 1) & \cdots & x(M + N_s - 1) \end{bmatrix},$$

[0044] 其中, N_s 为每段数据的点数, M 为数据段数;

[0045] 2b) 检测用户根据构建的数据矩阵 X , 计算协方差矩阵 R_x :

[0046]
$$R_x = \frac{1}{N_s} X X^H,$$

[0047] 其中 $(\cdot)^H$ 为Heimitian转置。

[0048] 步骤3,检测用户对计算所得的协方差矩阵 R_x ,按如下公式进行Cholesky分解:

[0049]
$$R_x = L^T L,$$

[0050] 其中,L为上三角矩阵,表示为:

[0051]
$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \cdots & l_{1M} \\ 0 & l_{22} & \cdots & l_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & l_{MM} \end{bmatrix},$$

[0052] 其中, l_{ij} 为上三角矩阵L的第i行j列元素, $i=1, \cdots, M, j=1, \cdots, M$ 。

[0053] 步骤4,检测用户根据上三角矩阵L计算检测统计量 T_ξ 。

[0054] 检测用户按如下公式计算检测统计量:

[0055]
$$T_\xi = \frac{l_{11}^2}{l_{MM}^2},$$

[0056] 其中 l_{11} 为上三角矩阵L的主对角线上的第一个元素, l_{MM} 为上三角矩阵L的主对角线上的第M个元素。

[0057] 步骤5,检测用户根据主用户信号不存在的情况下的检测统计量 T_ξ 的概率分布,计算目标虚警概率下的检测门限 γ_ξ 。

[0058] (5a)检测统计量 T_ξ 的概率分布分析

[0059] 由于在信号不存在的情况下,协方差矩阵为有限的Wishart矩阵,故此时步骤3中得到的上三角矩阵L的主对角线元素 l_{ii} 相互独立,且 l_{ii}^2 服从分布 $\chi_{N_s-i+1}^2$,其中 $i=1, \cdots, M$,

$\chi_{N_s-i+1}^2$ 表示自由度为 N_s-i+1 的卡方分布,

[0060] 根据以上分析,结合F分布的定义,可得检测统计量 T_ξ 乘上对应的自由度比例因子C后的结果 $C \cdot T_\xi$ 将服从F分布 $F(m, n)$,其中, $C = N_s / (N_s - M + 1)$,分子自由度 $m = N_s$,分母自由度 $n = N_s - M + 1$;

[0061] (5b)计算目标虚警概率下的检测门限 γ_ξ

[0062] 记F分布 $F(m, n)$ 的分布函数为 $F_{m,n}(x)$,则 $F_{m,n}(x)$ 的累积量分布函数 $P_F(p, m, n)$ 可用公式表示为:

[0063]
$$P_F(p, m, n) = \int_p^{+\infty} F_{m,n}(x) dx,$$

[0064] 其中,m表示F分布的分子自由度,n表示F分布的分母自由度,p取值为 $(-\infty, +\infty)$;

[0065] 根据(5a)分析的 T_ξ 的概率分布,可得在给定虚警概率 P_{fa} 下,检测门限 γ_ξ 的计算式:

[0066]
$$\gamma_\xi = \frac{m}{n} P_F^{-1}(1 - P_{fa}, m, n),$$

[0067] 其中, $P_F^{-1}(\cdot)$ 为函数 $P_F(p, m, n)$ 关于自变量 p 的逆函数, P_{fa} 取值为 $(0, 1)$, $m = N_s$, $n = N_s - M + 1$ 。

[0068] 步骤6, 根据检测统计量与检测门限, 判决主用户信号是否存在。

[0069] 检测用户将检测统计量与检测门限进行比较, 对主用户信号是否存在做出判决: 当 $T_\xi \geq \gamma_\xi$ 时, 判决为主用户信号存在, 反之, 判决为主用户信号不存在。

[0070] 本发明的频谱检测效果可以通过以下仿真进一步说明:

[0071] A、仿真条件

[0072] 主用户信号为BPSK信号, 采用的噪声为均值为0, 方差为1的高斯白噪声。数据矩阵 X 的行和列长分别设置为10和40。仿真方法为10000000次的蒙特卡洛仿真。仿真1的信噪比设置为-5dB。仿真2的信噪比设置为-6dB到6dB, 虚警概率设置为0.1。仿真3的信噪比设置为0dB。

[0073] B、仿真内容

[0074] 仿真1: 对本发明和基于最大最小特征值的检测方法的判决门限偏差进行对比, 其中, 判决门限偏差指的是在给定虚警概率下, 理论计算得到的判决门限和实际的判决门限之间的偏差, 结果如图2所示。其中, “提出算法经验门限” 表示本方法进行蒙特卡洛仿真得到的实际判决门限, “提出算法理论门限” 表示本方法的理论计算得到的判决门限, “最大最小特征值经验门限” 表示基于最大最小特征值频谱检测方法的实际判决门限, “最大最小特征值近似门限” 表示基于最大最小特征值频谱检测方法的理论计算得到的判决门限。

[0075] 仿真2: 将本发明和基于最大最小特征值频谱检测方法的检测性能进行对比, 结果如图3所示。其中, “最大最小特征值算法” 表示基于最大最小特征值频谱检测方法的检测性能曲线, “提出新型算法” 表示本发明的检测性能曲线。

[0076] 仿真3: 将本发明与基于最大最小特征值频谱检测方法的ROC曲线进行对比, 得结果如图4所示。其中, “最大最小特征值算法” 表示基于最大最小特征值频谱检测方法的ROC曲线, “提出新型算法” 表示本发明的ROC曲线。

[0077] C、仿真结果

[0078] 由图2可得, 现有的基于最大最小特征值频谱检测方法的理论判决门限与实际判决门限偏差很大, 而本发明中的理论判决门限与实际判决门限基本吻合。这说明, 本发明可以根据给定的虚警概率, 直接利用理论推导得到的检测门限进行实际应用, 在该判决门限下, 实际的检测虚警概率将与给定的虚警概率大小基本一致。

[0079] 由图3可得, 当信噪比在-6dB到6dB间时, 本发明的检测性能要优于现有的基于最大最小特征值频谱检测方法。

[0080] 由图4可得, 在信噪比为0dB时, 本发明在不同虚警概率条件下获得的检测概率要大于现有的基于最大最小特征值检测方法的检测概率, 说明本发明的检测性能要优于基于最大最小特征值的频谱检测方法。

[0081] 综合上述仿真结果和分析, 本发明所提出的基于有限随机矩阵频谱检测方法, 其检测门限偏差比基于最大最小特征值频谱检测方法小, 抗噪声不确定性能能力和检测性能均比基于最大最小特征值频谱检测方法好, 而且本发明只需要检查用户配备一根天线, 系统成本低, 复杂度低, 这使得该发明在实际中能更好的得到应用。

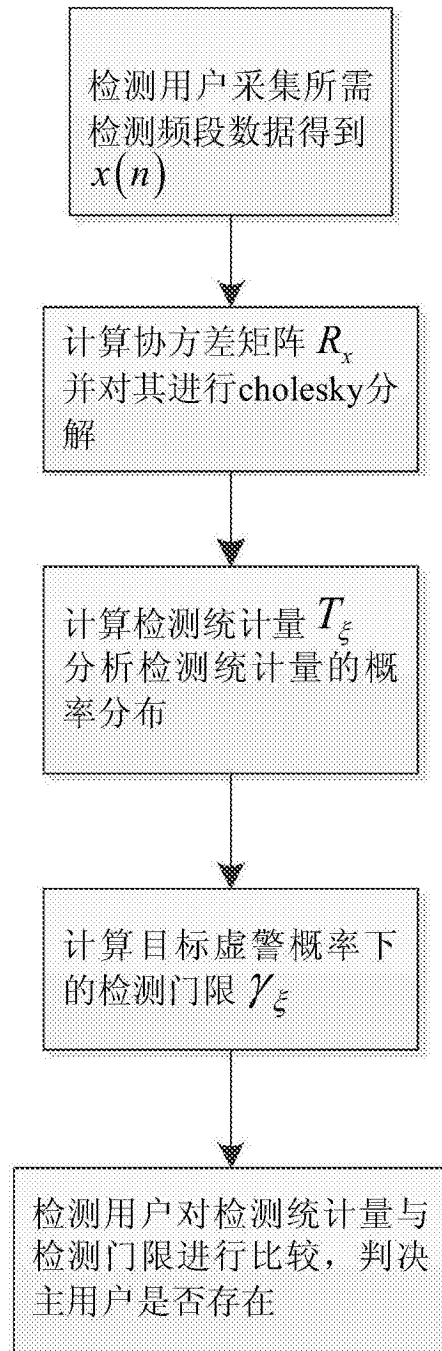


图1

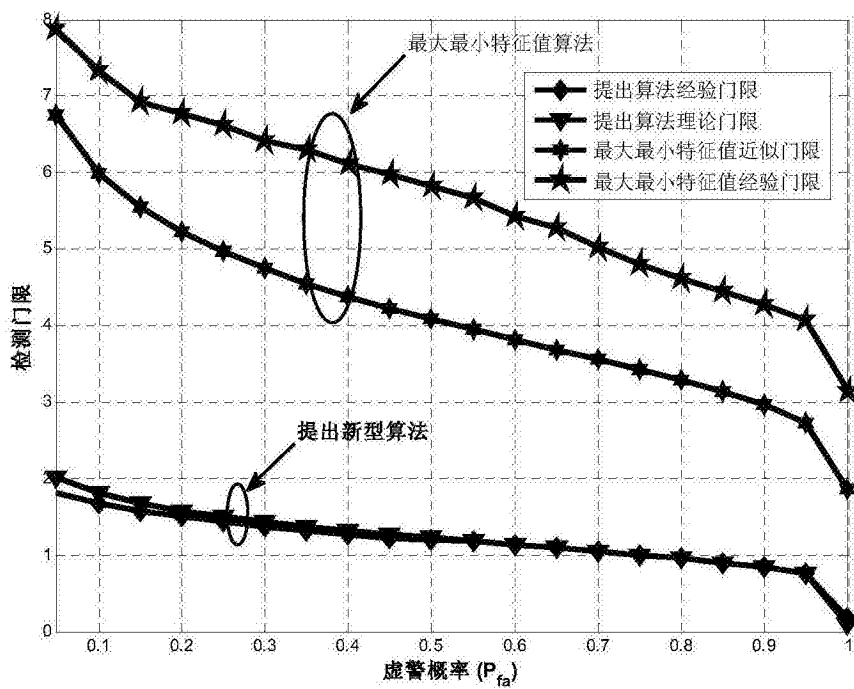


图2

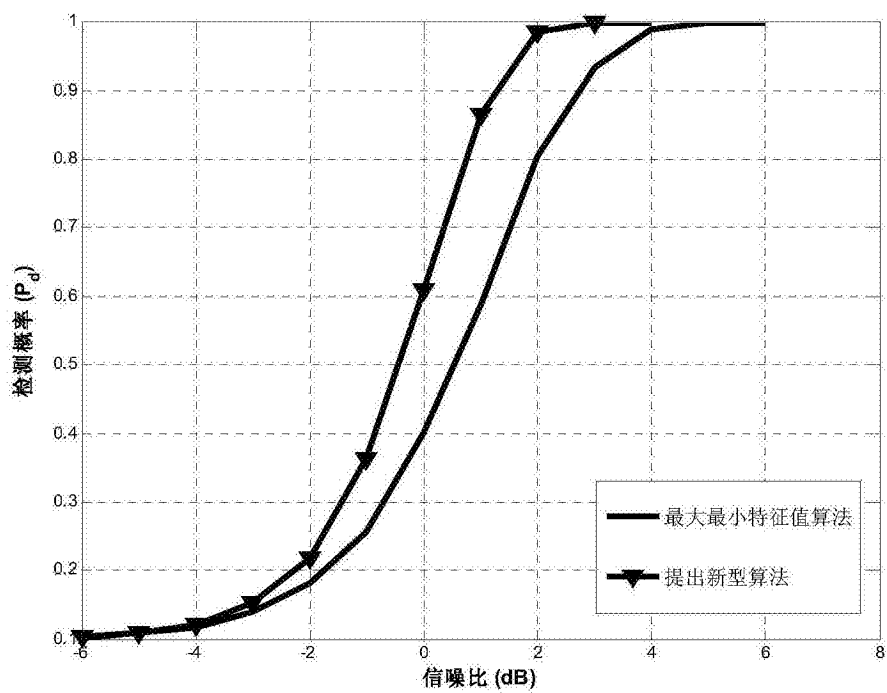


图3

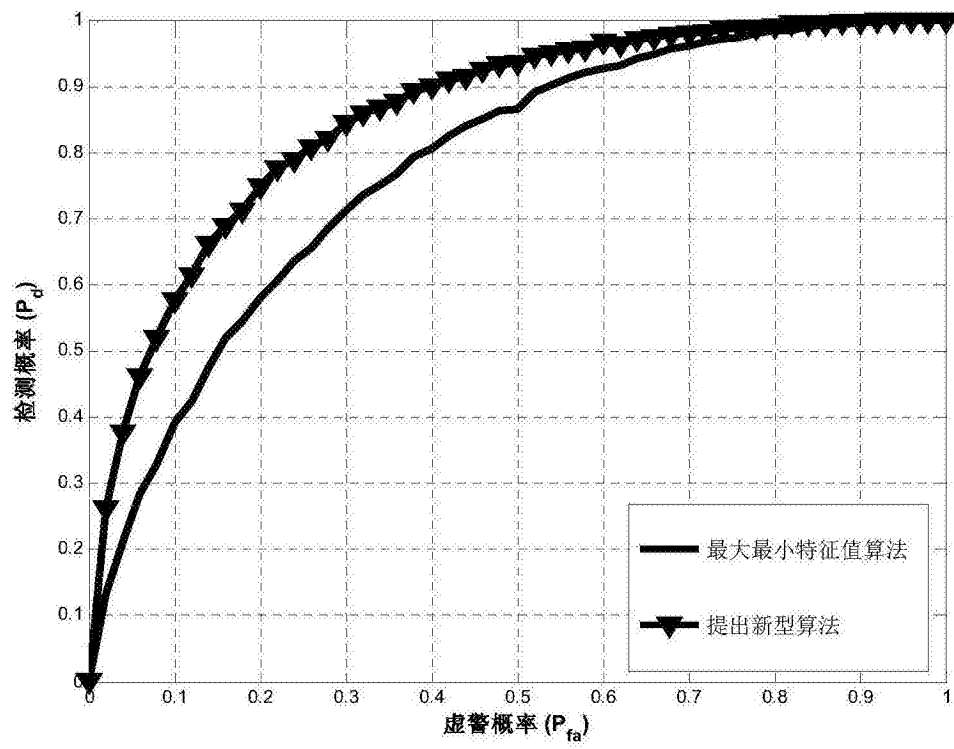


图4