

文章编号:1000-582X(2011)02-058-6

认知无线电中基于 Kriging 方法的干扰温度空域分布估计

冯文江, 李俊

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要:为了解决传统干扰温度估计方法空域特性不突出, 获取准确的干扰温度空域分布估计较困难, 频谱资源利用不够充分的问题, 本文提出一种利用空间分布的若干传感器获得的干扰温度样本值, 结合 Kriging 估计法对整个空域的干扰温度进行估计的方法。该方法结合地质统计学中的 Kriging 插值法, 对具有空域性质的干扰温度数据进行处理, 可以得到区域内干扰温度的三维分布。Kriging 插值法是以变异函数理论和结构分析为基础, 在有限区域内对变量进行最优估计的一种方法。本文在研究中与传统的 MTM-SVD 方法在空域特性上进行比较。仿真分析表明, 该方法能够较准确的估计出考察区域内干扰温度的空域分布, 基于空域的频谱资源利用率也得到相应的提高。

关键词: 认知无线电, 干扰温度, 频谱感知, Kriging 方法

中图分类号: TN929.52

文献标志码: A

The spatial distribution estimation of Interference temperature based on kriging method in cognitive radio

FENG Wen-jiang, LI Jun

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In order to resolve the problems of the traditional interference temperature estimation methods, such as unclear spatial characteristics, inaccurate estimation of spatial distribution, and the insufficient use of spectrum resources, this paper proposes an estimation method which utilizes the interference temperature sample values obtained by wireless sensors distribute in space to estimate the interference temperature in the total area. This method makes use of the geo-statistical interpolation method of Kriging to calculate the interference temperature data and obtain the 3-dimensional distribution of the interference temperature in the area. Kriging interpolation method is based on the variogram and structure analysis theory, makes optimal estimation of the variables in area. Simulation results demonstrate that the proposed method can estimate the spatial distribution of interference temperature in the interested area more accurately and the spatial spectrum utilization is improved.

Key words: cognitive radio; interference temperature; spectrum sensing; Kriging method

Mitola 在 1999 年首次提出认知无线电 (cognitive radio, CR) 的概念^[1-2]。CR 是一种基于软件无

线电的智能通信技术, 具有感知、学习、自适应等能力, 能够对周围无线通信环境进行感知, 并根据感知

收稿日期: 2010-06-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872038); 国家 863 计划资助项目(2008AA01Z202)

作者简介: 冯文江(1963-), 重庆大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事宽带无线接入技术、认知无线电、通信信号处理等方向研究, (Tel)13983987501; (E-mail)fwj@ccee.cqu.edu.cn。

结果,自适应调整系统工作参数,动态利用频谱空洞,达到提高频谱利用率、缓解频谱资源紧张的目的。认知无线电的感知能力,是指通过对频谱的感知,检验出空洞以供非授权用户利用。非授权用户不允许对授权用户造成干扰,故频谱感知必须以授权用户接收端为中心,提供可靠的干扰温度估计,在干扰温度门限约束下,授权用户与非授权用户共享频谱资源。在认知无线电中,干扰温度估计往往和空域联系在一起。由于在整个空间区域,接收端所处地理位置不同和干扰源的随机分布,干扰温度在空间的分布也不同,为了更有效的利用资源,需要掌握各种资源(包括干扰温度)的空间分布。

传统干扰温度估计方法的空域特性采用量化描述,以 Kriging 方法为基础,针对干扰温度估计方法空域特性存在细化不足,利用空间分布的若干传感器获得的干扰温度样本值,对干扰温度空间分布进行估计。

1 干扰温度的概念

干扰温度机制是美国联邦通信委员会(FCC)为应用 CR 技术以提高频谱利用率而提出的一种方法^[3],利用授权用户的信噪比富裕量,使非授权用户同时同地共享授权用户的频谱资源。

CR 系统占用授权用户频谱时,必须首先确保授权用户的正常工作。干扰温度用于量化和管理无线环境中的干扰源,这里的干扰源可以是进行无线通信所在区域的原授权用户(对非授权用户),也可以是伺机接入空洞频谱的非授权用户(对授权用户),还可以是其它可能影响认知无线电频谱空洞可用性的信号源。干扰温度限规定了在某频带和特定地理位置满足接收者需求的最差无线传输环境特征。

在干扰温度机制中,干扰温度用来表征非授权用户在共享频段内对授权用户接收机产生的干扰功率和授权用户接收机噪声功率之和,用等效干扰温度描述: $P_n = K \times T \times B$,这里 P_n 为干扰功率, B 为 RF 带宽, K 为波尔兹曼常数, T 为干扰温度。干扰温度是干扰功率的另一种表示形式。设定 1 个保证授权用户系统正常运行的“干扰温度门限” T_n ,该门限由授权用户系统能够正常工作的最坏信噪比决定。非授权用户作为授权用户的干扰,一旦累积干扰超过了干扰温度门限,授权用户系统就无法正常工作;反之,可以保证授权用户与非授权用户同时正常工作。干扰温度机制的目的是更好地量化和管理

干扰,并在确定的频段上增加更多的非授权操作。

2 干扰温度的估计

干扰温度模型以接收端为中心,Simon Haykin 考虑了 2 个方面的因素^[4]:一是使用大量传感器(如接收天线)组成传感器网络,遍布在目标探测区域,用来探测不同空间位置的空间差异性;二是使用多抽头(multitaper)估计方法对干扰温度进行功率谱估计。以此为依据,提出了多窗谱估计(multitaper spectral estimation)结合奇异值分解(singular-value decomposition)方法,即 MTM-SVD。

2.1 MTM-SVD 多窗谱估计

由于无线环境的空间差异性,需要大量分布在不同空间位置的传感器,获取当地的无线环境信息,并将各个传感器获得的数据作为一组信号输入。MTM-SVD 方法将整个待测空间划分为若干个区域,如图 2 所示,然后将某个区域内每个传感器的信号进行 MTM 变换^[5],并将得到的特征谱排列成矩阵,进行奇异值分解,得到的最大特征值即为干扰温度的估计。

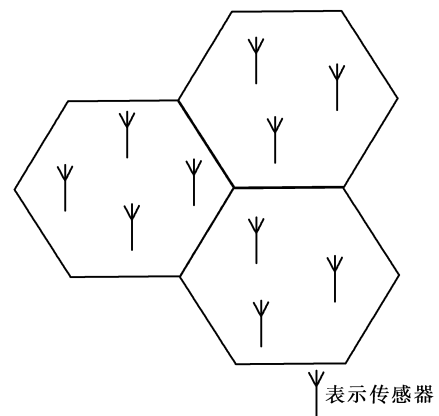


图 1 传感器分布

假设时间序列为 $\{x(t)\}_{t=1}^N$, $\{\omega_i^{(k)}\}_{i=1}^N$ 是 K 阶 Slepian 窗的正交序列。Slepian 序列的显著特性是在有限样本数下,其傅里叶变换的能量集中在带宽 $(f-B, f+B)$ 内。相应的特征谱对应于下列傅里叶变换

$$Y_k(f) = \sum_{t=1}^N \omega_t^{(k)} x(t) e^{-j2\pi ft}, k = 0, 1, \dots, K-1, \quad (1)$$

基于最小旁瓣泄露特征谱的谱估计表达式为

$$\hat{S}(f) = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} \lambda_k(f) |Y_k(f)|^2}{\sum_{k=0}^{K-1} \lambda_k(f)}, k = 0, 1, \dots, K-1, \quad (2)$$

其中 λ_k 表示第 k 个特征谱对应的特征值。

令 $Y_k^{(m)}$ 表示第 m 个传感器得到的第 k 个特征谱,在估计区域内共有 M 个传感器,将 M 个传感器得到的特征谱排列成矩阵形式

$$\mathbf{A}(f) = \begin{bmatrix} \omega_1 Y_1^{(1)}(f) & \omega_1 Y_2^{(1)}(f) & \cdots & \omega_1 Y_k^{(1)}(f) \\ \omega_2 Y_1^{(2)}(f) & \omega_2 Y_2^{(2)}(f) & \cdots & \omega_2 Y_k^{(2)}(f) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \omega_M Y_1^{(M)}(f) & \omega_M Y_2^{(M)}(f) & \cdots & \omega_M Y_k^{(M)}(f) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $\omega_i (i=1, 2, \dots, M)$ 表示与传感器地理位置有关的权值,理想情况下 $\omega_i = 1$ 。矩阵 $\mathbf{A}(f)$ 中的元素与输入射频激励和内部加性噪声有关。通过奇异值分解可去除噪声,仅保留感兴趣的射频激励,即干扰温度部分。将矩阵分解成如下形式

$$\mathbf{A}(f) = \sum_{k=0}^{K-1} \sigma_k(f) \mathbf{u}_k(f) \mathbf{v}_k^*(f), \quad (4)$$

其中 $\mathbf{v}_k^*(f)$ 为共轭转置矩阵, $\sigma_k(f)$ 为 $\mathbf{A}(f)$ 的第 k 个奇异值。将矩阵的 k 个奇异值按顺序排列, $|\sigma_0(f)| \geq |\sigma_1(f)| \geq |\sigma_2(f)| \geq \dots \geq |\sigma_{k-1}(f)|$, 其中最大特征值 $|\sigma_0^2(f)|$ 即为估计的干扰温度。也可以用较大的几个特征值的线性组合计算干扰温度估计以提高估计的准确度。

由于传感器具有不同的空间分布,MTM-SVD 估计法也具有一定的空域特性。上面所得到的干扰温度估计是针对估计区域内的传感器进行计算,所得到的结果是整个区域的统一值,不同区域的传感器信号不同,得到的干扰温度估计也不同,能在一定程度上反映空域上的干扰温度分布。但这种方法不能细致地反映干扰程度,同一区域在测量频段上的干扰温度只用一个值表示,忽略了在这个区域内的干扰温度的分布特性,相当于将干扰温度在空域内进行了离散化,使其在空域的精密度变差,这样将会导致该考察区域内的某些子区域的可用资源漏掉。如果设置一个干扰温度门限,只能对某一个划分区域进行定性判断,无法对每个划分区域内的不同特性进行评估。

3 Kriging 插值法

Kriging 插值方法是法国地理数学家 Georges

Matheron 和南非采矿工程师 Krige 发明的一种用于地质统计学中金矿品味的优化插值方法。Kriging 插值法是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对变量进行最优估计的一种方法。基于该方法的空间统计分析不仅可以研究空间分布数据的结构性、随机性、相关性、依赖性,还可以进行最优无偏内插。已在地质、生态、气象、水资源和土壤分析等领域得到应用。通过该方法对具有空域性质的干扰温度数据进行处理,可以得到区域内干扰温度的三维分布。

3.1 空间变量随机模型

Kriging 方法的基本思想是根据样品空间位置不同、样品间相关程度的不同,对每个样品品位赋予不同的权,进行滑动加权平均,以估计中心块段的平均品位^[8]。

在三维空间中,数据场可表示为分布于空间的单值函数,即 $Z=f(x, y, z)$ 。运用统计学来分析数据场,将 f 看成随机函数,并将依赖的空间自变量称为空间随机变量(如基于空域分布的干扰温度)。空间随机变量不仅包括每一点的随机性,而且具有一定的结构性,即存在某种空间相关性,不同点之间的变量值可用函数表示,即

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \alpha_i Z(x_i), \quad (5)$$

其中 $\hat{Z}(x_0)$ 表示待估测位置 x_0 的空间变量值; $Z(x_i)$ 为已知位置 x_i 处的空间变量 Z 的观测值; α_i 表示各个已知点的权重。求取 α_i 便是所要解决的核心。

3.2 Kriging 方法

当空间变量 Z 满足二阶平稳假设,并且采用线性估计,便可应用 Kriging 方法,讨论的空域干扰温度分布问题满足该条件。

进一步假定空间变量 $Z(x)$ 有 $E[Z(x)] = m$, m 为常数但未知。2 个随机变量 $Z(x_i)$ 和 $Z(x_j)$ 的协方差函数为 $C(x_i, x_j)$, 变异函数定义为

$$2\gamma(x_i, x_j) = E[(Z(x_i) - Z(x_j))^2], \quad (6)$$

由二阶平稳特性,有

$$\gamma(x_i, x_j) = C(0) - C(x_i, x_j) = C(0) - C(h), \quad (7)$$

$h = x_i - x_j$ 为 x_i 与 x_j 之间的距离差。

为了导出加权系数 α_i , 设 $\hat{Z}(x_0)$ 是 $Z(x_0)$ 的线性最小方差估计,用 Lagrange 乘数法对估计方差 $E[(Z(x_0) - \hat{Z}(x_0))^2]$ 进行最小值求解,并结合变异函数,在 $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ 的约束下得到表达式

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma(x_i, x_j) + \mu = \gamma(x_j, x_0), j = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

其中 μ 为对应的 Lagrange 乘数。Kriging 方差为

$$\sigma_{ok}^2 = E[(Z(x_0) - \hat{Z}(x_0))^2] = \mu + \sum_{i=1}^n \alpha_i \gamma(x_i, x_0) - \gamma(x_0, x_0). \quad (9)$$

3.3 变异函数的理论模型

由前面分析可知, Kriging 方法的关键是获取变异函数 $\gamma(h)$, 这涉及到变异函数理论模型的选取和模型参数的估计。讨论的实例是对干扰温度的估计, 即对接收功率的估计。基于自由空间传播模型, 功率衰减与距离的平方成正比, 当距离无限大时, 功率为零, 当距离近似为零时, 功率为发射功率, 即该模型有基台性和无纯块金效应^[8], 同时因为自由空间传播模型功率衰减并不十分快速, 且空间连续性更好, 故选取指数模型。理论变异函数定义为

$$\gamma(h) = 1 - \exp(-\frac{h}{a}), \quad (10)$$

以自由空间传播模型为参考, 在理论变异函数的确定上, 不考虑套合, 且只考虑空间各向同性。在实际情况下, 由于信号传播模型的不确定性, 需要在方向角上以一定角度为分辨率, 在各个不同的方向上进行变异函数的确定。理论模型确定后, 需要结合实验变异函数进行拟合, 确定理论模型参数, 而实验变异函数是由观测数据求取。先求取各个方向上的基本实验变异函数, 然后再把它们合称为平均实验变异函数。如果存在着相距为 h 的 N_n 对观测数据点, 则实验变异函数可由下式表示

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N_n} \sum_{i=1}^{N_n} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2, \quad (11)$$

在对实验变异函数进行拟合时, 一般采用最小二乘拟合和极大似然估计等优化方法^[8], 采用最小二乘拟合运算。其原理如下。

由实验变异函数得到的各个 $\hat{\gamma}(h)$ 与理论变异函数的 $\gamma(h)$ 的差值进行平方求和, 优化目标函数为平方和的最小值。如下式

$$\min \sum_{h=h_0}^H (\gamma(h) - \hat{\gamma}(h))^2. \quad (12)$$

根据最优化解法, 对参数 a 求导, 并令其等于 0, 即可求出 a , 得到理论变异函数中的参数值。

由于本方法对空间随机变量的估计是对权值 α_i 的求取, 即为求取方程的解, 计算复杂度为 $O(n)$, 其中 n 为样本数。

4 基于 Kriging 法的干扰温度估计

基于 Kriging 方法的干扰温度估计需要在待考察区域内安装大量传感器, 由于每个传感器所处位置不同, 获得的干扰温度也会根据空间位置的变化而改变, 但是由于干扰源发送信号的相关性, 每个传感器所处位置的干扰温度也存在一定的空间相关性。每个传感器获得的干扰温度值, 即为空间变量模型的观测值, 根据观测值, 使用 Kriging 方法可以估计出考察区域内的干扰温度空间分布。

与 MTM-SVD 方法一样, 对每个传感器的接收信号 $x_i(t)$ 进行如下处理

$$T_i(f, \Delta f) = \Delta f \cdot S_i(f) = \Delta f \cdot \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_{ik} |Y_{ik}(f)|^2}{\sum_{k=1}^K \lambda_{ik}}, \quad (13)$$

$T_i(f, \Delta f)$ 为第 i 个传感器在指定频率 f , 带宽 Δf 上的干扰温度, K 为 MTM 算法中 Slepian 窗的正交序列的阶数, λ_{ik} 表示第 i 个传感器第 k 个特征谱对应的特征值, $Y_{ik}(f)$ 为特征谱函数。

由此, 可以得出每个传感器在指定频率上的干扰温度值。现假设在 $2.4 \text{ km} \times 2.4 \text{ km}$ 的考察区域内, 将大量传感器分别以间距为 200 m 呈网格状放置, 设考察区域内有 3 个干扰源, 坐标分别为 $P_1(450, 450)$, $P_2(-450, 450)$, $P_3(50, -650)$, 考察频段中心频率为 400 MHz, 功率分别为 1.2、2.5、0.5 W, 接收端噪声忽略不计。在空间内某点的干扰功率与信号传播模型有关。为了验证方便, 只考虑由于距离所引起的传播损耗。假设在自由空间传播模型中, 各个传感器所探测到的干扰温度为

$$T_m(f, \Delta f) = \sum P_i^{(f, \Delta f)} \cdot \frac{c^2}{(4\pi f)^2 \cdot [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2]} g, \quad (14)$$

其中天线增益 $g=1$, (x, y) 为传感器位置坐标, (x_i, y_i) 为第 i 个干扰源位置坐标。使用 MTM-SVD 方法进行干扰温度估计时, 根据自由空间传播模型以及上述干扰源和传感器分布, 噪声忽略不计, 分区域得到干扰温度空域分布, 并设置 1 个合理的干扰温度门限, 得到的考察区域内频谱可用空域范围如图 2 所示。可以看到, 仅有在干扰源附近的子区域干扰温度超过干扰温度门限。

在相同的干扰源和传感器分布下, 将每个传感器探测到的干扰温度样本值进行 Kriging 估值, 可得到整个探测区域内的干扰温度分布。这里在进行

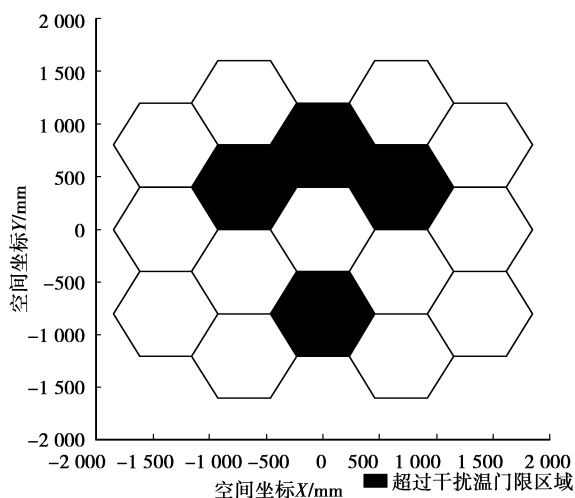


图 2 MTM-SVD 算法的频谱可用空域分布

变异函数拟合时选取滞后宽度为 120 m, 变异函数拟合如图 3 所示。图 4 是利用 Kriging 估计法获得的干扰温度分布。可以观察到在干扰源坐标附近的干扰温度较高, 离干扰源远的地方干扰温度较低。设置与 MTM-SVD 方法相同的干扰温度门限值, 可得到基于图 4 的考察区域内可用频谱空域分布图, 如图 5 所示。

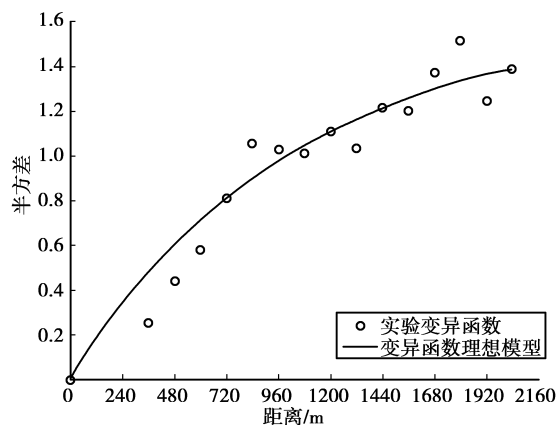


图 3 实验变异函数拟合理论变异函数

对比图 2 和图 5 可以看出, 在相同传感器和干扰源分布下, MTM-SVD 的空域检测方法是以前 1 个子区域为单位进行判断, 整个区域的干扰温度值是离散的。而基于 Kriging 法的估计, 考虑了考察区域内所有点的干扰温度, 使得资源的可用判断更加精细, 资源的可用范围得到扩展。其中采用 Kriging 方法所得的超过干扰温度面积为使用 MTM-SVD 方法的 69.9%。随机选取了 10 个样本点, 将 2 种测量法测量值与样本点值进行误差计算, 其中 Kriging

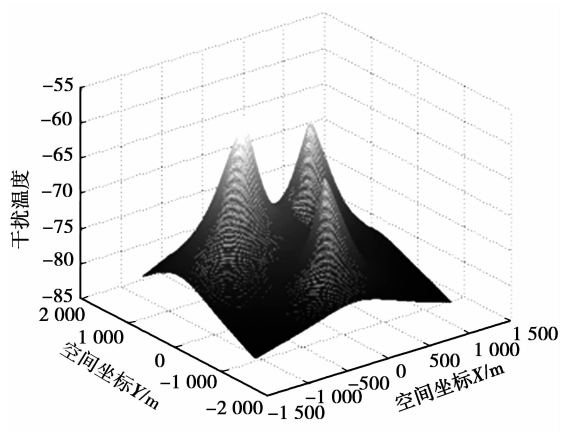


图 4 Kriging 方法的空域干扰温度估计分布

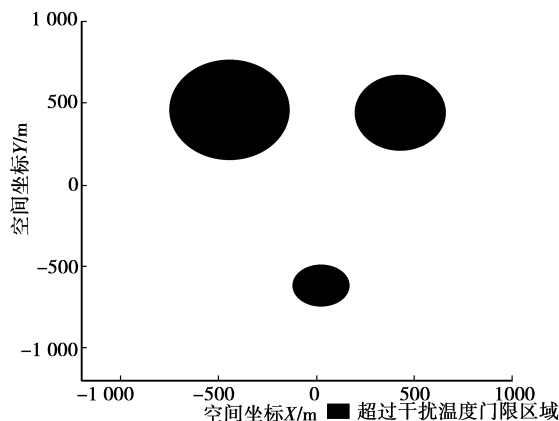


图 5 Kriging 方法的频谱可用空域分布

方法的平均误差为 0.08dB, 而 MTM-SVD 方法由于采用的是空间平均法, 误差高达 2.8dB。

5 结 语

干扰温度空域估计的细化, 对提高资源利用率有重要意义。提出的基于 Kriging 法的干扰温度空域分布能够较准确的估计出考察区域内干扰温度的空域分布。由于 Kriging 法已在许多领域得到广泛应用, 并得到长足发展, 为了便于验证, 只在自由空间传播模型中进行仿真, 实际情况可根据不同的电磁环境, 选择不同的变异函数理论模型的不同 Kriging 法。

参考文献:

[1] MITOLA J, MAGUIRE G O. Cognitive radio: making soft-ware radios more personal [J]. IEEE Personal Communications Magazine, 1999, 6(4):13-18.
 [2] MITOLA J. Cognitive radio for flexible mobile multi-

- media communications [C/OL]//IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications, San Diego, CA, USA, November 15-17, 1999 [2002-08-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=819467.
- [3] Spectrum Policy Task Force, ETDocket No. 02-135 [R]. Washington, D. C.: FCC, 2002.
- [4] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal, 2005, 23(2): 201-220.
- [5] BRONEZ T P. On the performance advantage of Multitaper spectral analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1992, 40(12): 2941-2946.
- [6] CLANCY T C. Formalizing the interference temperature model[J]. Wireless Communication and Mobile Computing, 2007, 7(9): 1077-1086.
- [7] RIIHJARVI J, MAHONEN P, WELLENS M, et al. Characterization and modelling of spectrum for dynamic spectrum access with spatial statistics and random fields [C/OL]// IEEE 19th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, Cannes, September 15 - 18, 2008 [2008-12-08]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4699912&tag=1.
- [8] 王家华,高海余,周叶编. 克里金地质绘图技术——计算机的模型和算法[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
- [9] 杨志伟,杨家玮. 认知无线电中的一种干扰温度估计算法[J]. 电子技术应用, 2006, 32(12): 128-130.
YANG ZHI-WEI, YANG JIA-WEI. A interference temperature estimation in cognitive radio[J]. Application of Electronic Technology, 2006, 32(12): 128-130.
- [10] 张晓, 邓建国. 干扰温度机制的研究进展[J]. 中兴通信技术, 2007, 13(3): 19-23.
ZHANG XIAO, DENG JIAN-GUO. Research development of interference temperature mechanism[J]. ZTE Communications, 2007, 13(3): 19-23.
- [11] 杨丰瑞, 刘辉. 认知无线电中基于干扰温度的频谱探测技术[J]. 通信技术, 2008, 41(8): 92-94.
YANG FENG-RUI, LIU HUI. Spectrum estimation technology based on interference temperature in cognitive radio[J]. Communications Technology, 2008, 41(8): 92-94.
- [12] WEISS T A, JONDRAL F K. Spectrum pooling: an innovation strategy for the enhancement of spectrum efficiency[J]. IEEE Communications Magazine, 2004, 42(3): 8-14.
- [13] THOMSON D J. Spectrum estimation and harmonic analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1982, 70(9): 1055-1096.
- [14] 弓小平, 杨毅恒. 普通Kriging法在空间插值中的运用[J]. 西北大学学报, 2008, 38(6): 878-882.
GONG XIAO-PING, YANG YI-HENG. Ordinary Kriging algorithm applied for interpolation[J]. Journal of Northwest University, 2008, 38(6): 878-882.
- [15] DEVROYE N, MITRAN P, TAROKH V. Limits on communications in a cognitive radio channel[J]. IEEE Communication Magazine, 2006, 44(6): 44-49.
- [16] 孙洪泉. 地质统计学及其应用[M]. 北京:中国矿业大学出版社, 1990.

(编辑 侯湘)