

一种基于模拟滤波器的频谱感知方法研究

李鹏¹, 闵慧²

(1.湖南中医药大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410208;

2.湖南信息职业技术学院软件学院, 湖南 长沙 410200)

✉1715847023@qq.com; 2524100007@qq.com



摘要: 检测已知地点的频谱使用情况是动态频谱访问网络的基本问题。本文提出一种基于模拟滤波器的频谱感知方案(SSS-AF), 其主要思路是, 如果邻接频带的能量和较低, 则认为该频带内的所有信道只存在一个测量值。为此, 基于压缩传感理论, 提出一种智能搜索算法, 通过将总测量值数量降低至最小值来消除干扰, 检测出可用频谱。采集特高频(Ultra-High Frequency, UHF)空白区域电视信号进行全面跟踪驱动仿真实验, 评估算法性能。仿真结果表明, 本文算法的频谱感知精度较高, 当信道占用率分别为10%和30%时, 本文算法的搜索速度分别上升3.4倍和1.5倍。

关键词: 动态频谱访问网络; 模拟滤波器; 信道; 压缩传感; 测量值

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A

Research on a Spectrum Sensing Method based on Analog Filter

LI Peng¹, MIN Hui²

(1.School of Informatics, Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, China;

2.Software Department, Hunan College of Information, Changsha 410200, China)

✉1715847023@qq.com; 2524100007@qq.com

Abstract: Detection of spectrum usage at a given location is an essential problem in dynamic spectrum access networks. This paper proposes a spectrum sensing algorithm based on analog filter (SSS-AF). The main idea is that if the energy sum of an adjacent frequency band is low, it is concluded that only one measurement value exists for all channels within that frequency band. Therefore, based on compressed sensing theory, an intelligent search algorithm is proposed to eliminate the interference and detect the available spectrum by reducing the total measured value to the minimum. The UHF (Ultra-High Frequency) blank area TV signal is collected and a comprehensive tracking and driving simulation experiment is carried out to evaluate the performance of the algorithm. Simulation results show that the spectrum sensing accuracy of the proposed algorithm is high, and the search speed of this algorithm increases by 3.4 times and 1.5 times respectively when 10% and 30% of the channels are occupied.

Keywords: dynamic spectrum access network; analog filter; channel; compressed sensing; measured value

1 引言(Introduction)

移动数据的迅速增长给蜂窝网络的运营商带来了严峻挑战, 许多运营商面临严重的频谱短缺问题, 如果不加以解决, 会导致频谱危机^[1]。这便要求对频谱进行创新性的动态分析和访问。

频谱动态访问(DSA)网络^[2]的一个基本问题就是获得频谱

图、所有信道的占用情况及使用超时情况, 如图1所示。假设频带为 $X = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$, 如果信道 i 被占用则 $x_i = 1$, 否则为0。频谱图可以为DSA设备提供关于整个频率的全局概况, 有助于实现信道的最优选择。例如, 需要可靠连接的DSA设备可以选择过去受干扰程度最低的信道。需要更多链路带宽的其他设备可以尝试信道绑定^[3], 并选择具有更多可用附近频率

的信道。有两种方法可以生成频谱图：一种是检索具体位置已占用信道的地理位置数据库；另一种是使DSA设备感知无线电频率的宽带并检查频率占用情况。

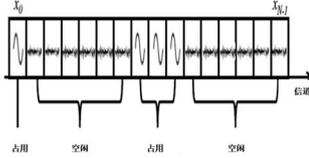


图1 宽带频谱感知问题

Fig.1 Broadband spectrum sensing problem

然而，当前的频谱感知技术^[4-5]还存在如下不足：(1)在DSA网络中挨个检测所有窄带信道(比如序列扫描技术^[6])，以确定信号能量或某个签名是否存在时，它总是需要 N 次搜索，其中 N 是信道数量，时间复杂度较高。(2)基于高性能模数转换器(ADC)等先进设备进行宽带扫描时，高速率ADC的成本高，功耗大，信号处理的计算量太大^[7]。例如，为了检测出500 MHz带宽，需要功率为2.15 W、价格为775 \$、速率为1 Giga/s样本的ADC。因此，这一带宽扫描技术不适用于能量有限的移动设备。最近有人提出采用压缩传感技术进行带宽频谱感知^[8]。这些技术需要次奈奎斯特抽样，搜索复杂度为 $O(k \cdot \log N)$ ，其中 k 是频谱的稀疏度。然而，这往往需要 k 值先验知识，这在DSA网络中是不可行的，因为DSA网络的移动设备会频繁地加入和离开网络。鉴于此，本文基于压缩感知理论，提出了一种改进的频谱感知方案，并通过仿真实验验证了本文方案的有效性。

2 基于模拟滤波器的频谱感知(Spectrum sensing based on analog filter)

2.1 问题阐述

假设频谱由 N 个信道组成(副载波)，每个信道的带宽固定，如图1所示。设变量 $x_i \in \{0,1\}$ 为指示变量，可指明信道 i 是否被占用。我们首先研究确定 x_i 的所有数值这一基本问题， $\forall i = 0,1,\dots,N-1$ 。

设 P_i 表示信道 i 的感知功率， Th_i 是信道 i 的能量检测阈值。如果 $P_i < Th_i$ ，则 $x_i = 0$ ，否则为1。可以根据文献^[9]确定阈值 Th_i 。设 f_i 表示信道 i 频带的左端。可将频谱滤波器定位于区间 $[f_i, f_{i+b}]$ 上，以分离出在该频带内的信号， i 和 b 随机确定。在滤波和测量后，我们可以获得频带内的信号功率： $P_{[i,i+b-1]} = P_i + P_{i+1} + \dots + P_{i+b-1}$ 。设 $Th_{[i,i+b-1]}$ 表示相应的能量检测阈值，可以做出如下决策：如果 $P_{[i,i+b-1]} < Th_{[i,i+b-1]}$ ，则对所有的 $j \in i, \dots, i+b-1$ 有 $x_j = 0$ ；否则，如果 $P_{[i,i+b-1]} > Th_{[i,i+b-1]}$ ，则对一个或多个 $j \in \{i, \dots, i+b-1\}$ 有 $x_j = 1$ 。对第二种情况，我们唯一知道的是在 i 和 b 间至少有一个信道被占用。尤其是发射站与我们检测器的位置可能不同，所以从 $P_{[i,i+b-1]}$ 的值我们无法知道多少个站在发射信号。通过使用滤波器获得后续测量序列，我们对所有 $i \in 0, \dots, N-1$ 确定 x_i 的值。我们的目标是使需要的测量值尽量少。

2.2 基本算法

本部分给出了基于可调信道滤波的频谱感知算法(SSS-

AF)。我们假设可调滤波器^[10]可用，且可以完全分离出目标信道。然后，可以使用能量检测器使滤波器输出可以确定某带宽是否被占用。基本思路是：当 $P_{[i,i+b-1]}$ 低于阈值时，我们可以一次性推断 $x_i, \dots, x_{i+b-1} = 0$ ；否则，当 $P_{[i,i+b-1]}$ 高于阈值时，我们掌握的信息不多。该算法的线性部分主要是检测出全为1的连续 x_i ，对数部分主要是检测出连续0。当0值较多时(稀疏情况)，则对数部分占主导地位，算法效率较高。

开始时，算法搜索带有连续0值的首个频带。如果 $x_0 = 0$ ，则算法测量 $P_{[1,2]}$ 。如果 $P_{[1,2]}$ 较小，则算法使测量间隔翻倍，以测量 $P_{[3,6]}$ 。如果 $P_{[3,6]}$ 高于噪声功率，则算法使测量间隔缩小一半，以测量 $P_{[3,4]}$ ，依次类推。该二分搜索过程部署为迭代函数 *identifyZeroes*(i, d)。该函数返回整数 j ，使 x_j, \dots, x_{i+j-1} 均为0且 $x_{i+j} = 1$ 。如果返回 $j = 0$ ，则表明 $x_i = 1$ ，且未发现0值。设置参数 d ，使 $[i, i+d-1]$ 为将被探测的首个间隔。然而，返回的 j 值可能小于等于 d 值。

算法1: SSS-AF

初始化 i, j 为0，频谱分布 X 全为0；

N 是频带内所有信道数量；

测量噪声功率，设置阈值。

While ($i < N$) {

$j = \text{identifyZeroes}(i, 1)$;

设置 $X[i, i+j-1] = 0$ 且 $x_{i+j} = 1$;

$i = i + j + 1$;

If ($i < N$) {

$j = \text{identifyOnes}(i)$;

设置 $X[i, i+j-1] = 1$ 且 $x_i = 0$;

$i = i + j + 1$; }

//通过线性搜索找到带有连续1的 $X[i, i+j-1]$

identifyOnes(i) {

int $j = 0$;

While ($i + j < N$) {

测量 P_{i+j} ;

If $P_{i+j} <$ 阈值, break ;

Else $j++$; }

返回 j ; }

//通过二分搜索，找到带有连续0的 $X[i, i+j-1]$

identifyZeroes(i, d) {

int $j = 0$;

If ($i + d > N$) $d = N - i$;

测量 $P_{[i, i+d-1]}$;

If ($P_{[i, i+d-1]} \geq$ 阈值) {

If ($d / 2 \geq 1$)

$j = \text{identifyZeroes}(i, d / 2)$;

Else $j = 0$; }

Else $j = d + \text{identifyZeroes}(i + d; 2 * d)$;

返回 j ; }

一旦算法检测出首个连续0之后的首个1，则开始进行线性搜索，以检测首个连续1。由函数 *identifyOnes(i)* 完成这一任务。函数返回一个整数 j ，使 x_i, \dots, x_{i+j-1} 均为1且 $x_{i+j} = 0$ 。如果返回 $j = 0$ ，则表明 $x_i = 0$ ，未检测到1。如图2所示，SSS-AF使滤波带宽翻倍，直到检测出被占用信道。然后，缩小滤波带宽以找到被占用信道。当找到空闲信道后，算法将再次增加滤波带宽。假设 $N = 64$ ，且只占用了信道15。算法首先通过衡量 $P_0, P_{[1,2]}, P_{[3,6]}, P_{[7,14]}, P_{[15,30]}$ 来检测连续0。因为 $P_{[15,30]}$ 非常显著，所以通过缩小其滤波器尺寸来进行二分搜索，以搜索出被占用的信道，然后衡量 $P_{[15,22]}, P_{[15,18]}, P_{[15,16]}$ 及 P_{15} 。现在，它是通过衡量 P_{15} 和 P_{16} 来检测连续的1。因为信道16为空，则算法再次衡量 $P_{17}, P_{[18,19]}, P_{[20,23]}, P_{[24,31]}, P_{[32,47]}$ 和 $P_{[48,63]}$ 来检测0。与线性扫描的64个测量值相比，此时的测量值数量为13。

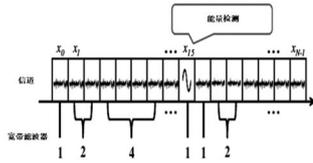


图2 SSS-AF检测示例

Fig.2 SSS-AF detection example

2.2.1 复杂度分析

考虑一些极端情况。当 X 全为1时，算法时间复杂度为 $\Theta(N)$ ；当 X 由1和0交替构成时，算法时间复杂度也为 $\Theta(N)$ 。假设 X 为 k 度稀疏，设 $k = \rho N$ 且 $0 < \rho \leq 1$ 。于是，测量值数量为 $c_1 k + c_2 \log_2[(1-\rho)N]$ ，其中 c_1 和 c_2 为常数。 $c_1 k$ 项是用于检测1的线性部分， $c_2 \log_2[(1-\rho)N]$ 项是用于检测0的部分。

最坏情况下， x_i 的 k 个1不连续，于是有 $k-1$ 、 k 或 $k+1$ 段连续0。请注意，已知稀疏度 k ，不可能有 $k+1$ 段以上的连续0值 x_i 。设 l_h 表示段 h 的长度，此时的复杂度为 $\sum_h c_2 \log_2(l_h)$ 且 $\sum_h l_h = (1-\rho)N$ 。因为 \log 函数的凹性，如果对所有 h 、 l_h 均相等，则获得 $\sum_h c_2 \log_2(l_h)$ 最大值。因此，

$$\max \sum_h c_2 \log_2(l_h) = c_2(k+1) \log_2\left(\frac{(1-\rho)N}{k+1}\right).$$

2.2.2 基于固定带宽模拟滤波器的改进型算法

如果频谱非常拥挤，则使用一对模拟滤波器和能量检测器进行搜索将会导致穷举搜索。我们对本文算法进行改进以处理这一情况。我们对 $\log_2(N)$ 个固定带宽滤波器和能量检测器进行融合，使其可以同步运行，防止穷举搜索。请注意，基本设计中的低通可调滤波器只需要滤波 $\log_2(N)$ 个带宽，即一个信道 $1, 2, \dots, \log_2(N)$ 次。因此，我们将可调低通滤波器替换为 $\log_2(N)$ 个固定低通滤波器。每个测量值有 $\log_2(N)$ 个能量读数，同步更新频谱图中的元素。

算法2：改进型SSS-AF

初始化 i, j 为0，频谱分布 X 全为0；

N 是频带内所有信道数量；

测量噪声功率，设置阈值。

While($i < N$) {

$j = \text{identifyZeroes}(i)$;

设置 $X[i, i+j-1]$ 为0, x_{i+j} 为1;

$i = i + j + 1$;

If($i < N$) {

$j = \text{identifyOnes}(i)$;

设置 $X[i, i+j-1]$ 为1, x_i 为0;

$i = i + j + 1$; }

identifyOnes(i)

identifyOnes(i) { //通过二分搜索来找出带有连续0值的

$X[i, i+j-1]$

int $j = 0$;

If($i+d > N$) $d = N - i$;

BW_{Max} : 将被感知的最大带宽;

测量 $P_{[i]}, P_{[i, i+(2^1-1)]}, P_{[i, i+(2^2-1)]}, \dots, P_{[i, i+BW_{\text{Max}}]}$;

If $P_{[i, i+(2^k-1)]} \geq \text{阈值}, 0 \leq k \leq \log(BW_{\text{Max}})$ {

$j = k$; }

Else $j = BW_{\text{Max}} + \text{identifyZeroes}(i + BW_{\text{Max}} + 1)$;

返回 j ; }

3 仿真实验(Simulation experiment)

本部分基于实际采集到的信号展开一组仿真实验。首先研究本文算法的信道感知精度。然后，比较SSS-AF相对序列扫描^[6]和压缩传感^[8]的算法性能。我们以这些数据为基础，观察本文基本型/改进型SSS-AF算法需要多少次信道感知才能构建频谱图。出于简便起见，我们将两种算法称为SSS-AF-B和SSS-AF-E。

(1) 仿真设置。为了提高评估的真实性，我们使用实时空中信号，使用带有UHF室内天线的SDR来采集范围为470—698 MHz的所有TV空白区域信号。因为无线电的样本率为25 MHz，所以无法覆盖整个空白区域。我们在下变频为DC后对每个TV信道单独采样，采集到的TV信号强度范围为-66—84 dBm。所有TV信道采集完后，利用 $2 \times B/R$ 因子对来自每个信道的信号样本进行插值和过采样，其中 B 是空白区域的总带宽， R 是样本率。最后，我们对这些样本进行累加以获得合成宽带信号 $S(t) = \sum_k s_k(t) \cdot e^{2\pi f_k t}$ ，其中 $s_k(t)$ 表示时刻 t 第 k 个TV信道的基带信号， f_k 是第 k 个TV信道的载波频率， $e^{2\pi f_k t}$ 项表示载波信号。我们部署文献[8]中的算法作为压缩传感算法。该算法假设使用可以获得模拟域整个宽带频谱的模拟DFT设备。然后，低速模数转换器对模拟缓冲器进行随机采样，再对结果作线性组合。为了与SSS-AF做比较，我们计算 M/N ，其中 M 是样本数量， N 是奈奎斯特速率采样数量，检测精度为99%。由于需要稀疏度信息，因此我们假设每次运行时该信息已知。

(2) 信道感知精度。通过改变每个信道感知的能量读数数量和信号强度来测量漏警率。虚警率在结果中可以忽略不计，所以此处略。图3给出了相关结果。当信号强度

为-80 dBm或更高时, 1,000 个样本基本可以实现信号功率的准确估计。请注意, 只用10 个能量读数就可以充分检测出-70 dBm或更高强度的信号。在信号强度非常强烈的DSA网络中, 可以显著降低能量读数的数量。

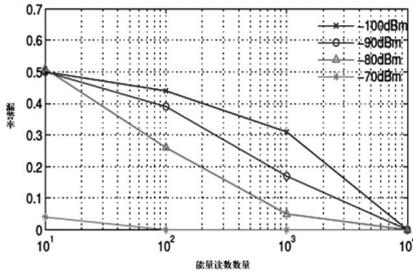


图3 信道感知使用不同数量的能量读数时获得的漏警信号检测率
Fig.3 Detection rate of missed alarm signal when channel sensing uses different number of energy readings

(3)信道感知速度。我们计算了构建一个完整的频谱图需要的信道测量值总量, 测试了带有1,000 个信道的频谱带宽。频谱内被占用的信道数量为1—1,000 个。仿真运行100 次, 每次运行时被占用信道的位置随机确定, 结果如图4所示。其中, Basic-8和Enhanced-8表示每8 个信道分为一组。序列扫描总是扫描所有信道, 因此需要的测量值数量不变。另一方面, 压缩传感完成信道感知需要的样本数量低于奈奎斯特率样本。

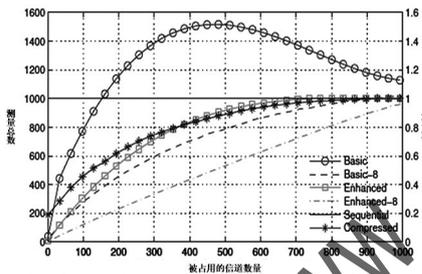


图4 序列扫描、SSS-AF-B、SSS-AF-E和压缩传感算法的性能
Fig.4 Performance of sequential scanning, SSS-AF-B, SSS-AF-E and compressed sensing algorithms

当频谱稀疏时, SSS-AF-B性能优于序列扫描。例如, 当占用50 个信道时, SSS-AF-B需要不到500 个测量值, 只有序列扫描的一半, 但是性能不久出现下降。原因如下: 当检测出空闲信道后, SSS-AF-B移到下一个搜索空间, 搜索窗口变大。否则, 如果检测出信道在使用, 它会保持在当前搜索空间的同时缩小窗口。如果频谱使用更为密集, 则它会在同一频率周围前后移动的同时不断放大和缩小窗口。我们在图4中发现, SSS-AF-B主要在频谱占用率为一半左右时进行信道感知。当频谱密度变大时, 传感时间下降, 因为SSS-AF-B在大部分时间对被占用信道进行序列传感。当信道占用率分别为10%和30%时, 本文算法的搜索速度分别上升3.4 倍和1.5 倍。

SSS-AF-E的性能明显更优。与SSS-AF-B相比, SSS-AF-E需要的总测量数量只有SSS-AF-B的20%。尤其是当只

有一个信道被占用时, 它进行测量操作的次数平均而言下降至原来的1/5。这一性能提升主要是因为 $\log_2(1000) = 10$ 个滤波器的并行化信道检测。SSS-AF-B的问题在SSS-AF-E中并不存在。SSS-AF-E在感知被占用信道时从不回到先前搜索空间。虽然概括起来比较困难, 但是在仿真中SSS-AF-E的性能要优于稀疏信道内的压缩传感。另外, SSS-AF-E不需要信道稀疏度或专用硬件等先验知识。

4 结论(Conclusion)

本文提出了一种新的带宽频谱快速感知算法。与压缩传感或带宽无线电方法不同, SSS-AF算法不需要非常复杂的硬件设备。相反, 我们只使用价格低、能效高的现有模拟滤波器和能量检测器。SSS-AF算法的复杂度与压缩传感算法渐近相当。基于真实硬件设备的仿真结果表明, SSS-AF算法与压缩传感算法的性能相当, 但是SSS-AF算法不需要频谱稀疏度先验知识。

参考文献(References)

- [1] 吴皓,张涛,陈跃,等.基于相互无偏基和拟合优度检验的频谱感知方法[J].电波科学学报,2022,37(1):67-72.
- [2] 陈剑,吴建平,李贺武.基于用户分配和负载的频谱分配算法[J].软件学报,2013,24(7):1638-1649.
- [3] 彭艺,朱福以,魏翔,等.基于深度强化学习的认知无线电协作频谱感知[J].数据采集与处理,2022,37(2):346-358.
- [4] 许瑞琛,蒋挺.基于POMDP的认知无线电自适应频谱感知算法[J].通信学报,2019,34(6):49-56.
- [5] 周浩,高远,朱昌平.基于双门限能量检测的选择式协作频谱感知[J].计算机仿真,2019,31(1):199-203.
- [6] YUCEK T, ARSLAN H. A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 11(1):116-130.
- [7] BUCCELLA C, CECATI C, LATAFAT H. Digital control of power converters—A survey[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(3):437-447.
- [8] 刘焕淋,王展鹏,陈勇,等.物理损伤感知的多芯光纤网络动态路由资源分配方法[J].电子学报,2022,50(2):502-507.
- [9] 张展,魏平,高林,等.以欠采样速率实现盲谱感知及二维DOA估计[J].电子科技大学学报,2022,51(3):357-362.
- [10] SAARI V, KALTIOKALLIO M, LINDFORS S, et al. A 240-MHz low-pass filter with variable gain in 65-nm CMOS for a UWB radio receiver[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2019, 56(7):1488-1499.

作者简介:

李 鹏(1983-), 男, 博士, 讲师.研究领域: 生物信息学, 机器学习, 中医药大数据, 网络优化理论。
闵 慧(1986-), 女, 硕士, 讲师.研究领域: 认知无线网络, 生物信息学.本文通讯作者。