基于加权一致优化的宽带分布式协作压缩频谱感知算法

闫玉芝[1],李有明[1],周桂莉[1],吴耀辉[1,2]

(1. 宁波大学通信技术研究所,浙江 宁波 315211;
2. 浙江万里学院电子信息学院,浙江 宁波 315100)

摘　要:宽带分布式协作压缩频谱感知不仅降低过高的采样速率,而且改善在低信噪比环境下的频谱感知性能。为进一步提高频谱感知性能,提出一种基于加权一致优化的宽带分布式协作压缩频谱感知算法。该算法根据当前迭代重构出的频谱信号设定下一次迭代重构的权值,促使频谱信号上存在授权用户的子频段产生信号值,降低重构出错的可能性。仿真结果表明,该算法不仅能够增大频谱重构的准确性,而且能够降低感知过程的时间和通信开销,改善频谱感知性能。

关键词:宽带频谱感知;压缩感知;分布式协作;加权一致优化

中图分类号:TN929　　**文献标识码**:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016259

Wideband distributed cooperative compressed spectrum sensing algorithm based on weighted consensus optimization

YAN Yuzhi[1], LI Youming[1], ZHOU Guili[1], WU Yaohui[1,2]

1. Institute of Communication Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China
2. School of Electronic and Information Engineering, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China

Abstract: Wideband distributed cooperative spectrum sensing based on compressed sensing can not only reduce high sampling rate, but also improve the spectrum sensing performance in low signal to noise ratio environment. In order to further enhance the spectrum sensing performance, a wideband distributed cooperative compressed spectrum sensing algorithm based on weighted consensus optimization was proposed. In this algorithm, the next iterative reconstruction weights were determined according to the current iterative reconstructed spectrum signal, which can encourage the sub-band occupied by primary user to generate signal value and decrease the likelihood of incorrect reconstruction. Simulation results show that the proposed algorithm can not only increases the spectral reconstruction accuracy, but also reduces time and communication costs of the sensing process, and improves the spectrum sensing performance.

Key words: wideband spectrum sensing, compressed sensing, distributed cooperation, weighted consensus optimization

收稿日期:2016-07-25;**修回日期**:2016-09-29

通信作者: 李有明,liyouming@nbu.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61571250);宁波市自然科学基金资助项目(No.2015A610121,No.2016A610225)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61571250), Ningbo Natural Science Foundation of China (No.2015A610121, No.2016A610225)

1 引言

随着当前无线通信服务需求的增多，一方面，无线可用频谱资源日益紧缺，另一方面，多数已授权频段的利用率低下[1]。针对无线频谱这种不合理利用的现象，认知无线电（cognitive radio，CR）[2] 技术在不干扰授权用户（primary user，PU）通信的情况下，机会式接入空闲频段进行通信，实现频谱共享，提高频谱利用率。频谱感知作为认知无线电中的关键技术，持续不断地感知当前频段的使用状态，为后期频谱分析及决策做好准备。好的感知性能使感知用户能有效地利用频谱资源，尤其在无线宽带网络中，感知用户能够得到更多的频谱接入机会来完成通信。由于宽带频段较宽，以奈奎斯特采样的频谱感知方式不仅给感知过程带来过高的通信开销，而且导致高速模拟数字转换器（analog-to-digital converter，ADC）的硬件实现困难。在实际的无线感知网络中，由于频谱利用率低下[1]，授权用户信号在频域中具有稀疏特性[3-8]。基于此特性，感知用户结合压缩感知（compressed sensing，CS）[9,10] 技术实现宽带频谱感知，可以有效降低宽带感知过程中信号采样数据量，加快频谱感知进程。基于压缩感知的频谱感知算法虽然可以降低宽带信号的采样速率和感知过程的通信开销，但是因采样数据的减少，会导致频谱感知性能恶化，尤其在低信噪比的环境中，频谱感知性能更易恶化[4]。为了改善压缩频谱感知性能，宽带感知用户通过协作的方式来进行频谱感知[3-6]。由于授权用户信号具有共同的频域稀疏特性，宽带集中式协作压缩频谱感知算法[3,4]将多个感知用户的采样数据发送到融合中心，通过求解最小矩阵秩问题的方式进行频谱感知，并取得较好的感知性能。但随着感知用户数或采样数据量的增加，这种通过融合中心进行频谱感知的通信开销急剧增加，并且感知性能易受用户节点失败的影响。相比集中协作感知，宽带分布式协作压缩频谱感知[5,6]则具有较低的通信开销且不易受用户节点失败的影响。参考文献[5]提出一种在一跳通信范围内感知用户基于一致平均的分布式协作频谱感知算法，虽然感知过程的通信开销较小，但感知性能较差。针对多跳通信范围内的多用户网络，参考文献[6]提出一种基于一致优化的宽带分布式协作压缩频谱感知算法，该算法虽然可以降低感知过程的通信开销，但是没有充分利用当前迭代重构出的频谱信号，而是对频谱信号上各个子频段同等对待和处理。为改善该算法的感知性能，本文提出一种基于加权一致优化的宽带频谱感知算法。该算法把感知过程中当前迭代重构出的频谱信号作为下一次迭代重构权值选择的依据，对于高概率存在授权用户的子频段进行加权处理，促使下一次重构出的频谱信号对应子频段产生信号值，增大频谱重构的准确性，提高频谱感知性能。

2 系统模型

如图 1 所示，在一个同时存在多个感知用户和授权用户的认知无线电宽带网络中，感知用户被允许接入空闲频段进行通信。频域中可利用的总带宽均匀分为 M 个子频段，每个子频段仅被单个授权或感知用户占用通信，并且在每次感知间隔内，其他感知用户不干扰当前用户的感知过程。在频谱感知阶段，设存在 J 个感知用户和 P 个正在通信的授权用户，则第 j 个感知用户端接收到的信号为：

$$y_j(t)=\sum_{p=1}^{P}h_{pj}(t)*x_p(t)+n_j(t) \tag{1}$$

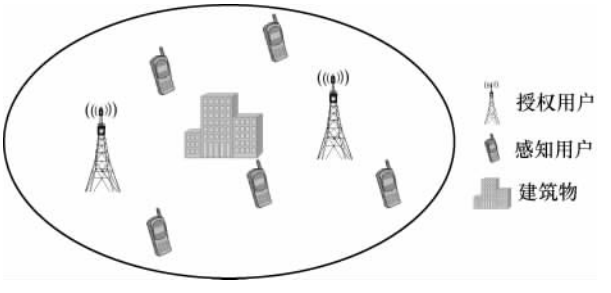


图 1 宽带分布式协作压缩频谱感知网络模型

其中，$h_{pj}(t)$为第 p 个授权用户与第 j 个感知用户之间的信道增益，$n_j(t)$为加性高斯白噪声。式(1)在频域中表示为：

$$y_{fj}=H_{fj}x_{fj}+n_{fj} \tag{2}$$

其中，$H_{fj}=\sum_{p=1}^{P}\mathrm{diag}(h_{f,pj})$，$x_{fj}=\sum_{p=1}^{P}x_{f,pj}$，其中 $N\times1$ 维向量 y_{fj}、$h_{f,pj}$、$x_{f,pj}$ 和 n_{fj} 分别是时域信号 $y_j(t)$、$h_{pj}(t)$、$x_p(t)$和 $n_j(t)$的频域离散表示形式。由于宽带频谱的占用率较低[1]，使授权用户的频谱信号 x_{fj} 具有稀疏特性，因此感知用户可以结合压缩感知技术进行频谱感知[6]。频谱感知最终目的是对频谱信号 x_{fj} 上各个子频段的使用状态进行判定，由于授权用户占用的子频段能量高于未被占用时的能量，故可通过频域能量检测法[7]确定各个子频段的使用状态：

$$\hat{d}_j(m)=\begin{cases}1, & e_m\geqslant\tau\\ 0, & e_m<\tau\end{cases} \tag{3}$$

其中，$\hat{d}_j$表示整个宽带上 M 个子频段的使用状态信息

向量，e_m 为频谱信号 x_{fj} 上第 m 个子频段具有的能量，$1\leqslant m\leqslant M$。$\hat{d}_j(m)=1$ 表示第 m 个子频段被授权用户占用，即该频段具有的能量大于能量门限 τ；$\hat{d}_j(m)=0$ 则表示该子频段是空闲频带，未被授权用户占用，感知用户可以接入通信。

3　宽带分布式协作压缩频谱感知

为了改善低信噪比环境下的频谱感知性能，感知用户通过分布式协作的方式进行频谱感知。在频谱感知阶段，每个感知用户在自己的感知端，利用压缩采样数据重构出频谱信号，然后把重构出的频谱信号广播给一跳通信范围内的相邻用户，每个感知用户都进行一致加权重构，进入下一次迭代融合过程，直至整个网络的所有感知用户的感知结果一致相同。

3.1　单个感知用户的压缩采样

在第 j 个感知用户端，感知用户 j 通过模拟信息转换器对接收到的信号 $y_j(t)$ 进行压缩采样，获得 $K\times1$ 维采样数据 $z_{t,j}$，采样过程可表示为：

$$z_{t,j}=\Phi_j y_{t,j} \tag{4}$$

其中，$N\times1$ 维 $y_{t,j}$ 是对时域信号 $y_j(t)$ 进行奈奎斯特采样后的离散表示形式，且 $K<N$，Φ_j 为 $K\times N$ 维高斯随机测量矩阵。由式(2)及离散傅里叶变换关系 $y_{t,j}=F^{-1}y_{fj}$，式(4)可写为：

$$z_{t,j}=\Phi_j F^{-1}H_{fj}x_{fj}+\Phi_j F^{-1}n_{fj}=A_j x_{fj}+n_{t,j} \tag{5}$$

其中，$z_{t,j}$ 是第 j 个感知用户端压缩采样得到的 $K\times1$ 维数据，A_j 为 $K\times N$ 维传感矩阵且 $A_j=\Phi_j F^{-1}H_{fj}$，$n_{t,j}=\Phi_j F^{-1}n_{fj}$，$F^{-1}$ 为 $N\times N$ 维离散傅里叶逆变换矩阵。根据压缩感知理论[9]，在没有噪声干扰的情况下，感知用户 j 利用压缩采样数据 $z_{t,j}$ 重构出宽带频谱稀疏信号 x_{fj}。

$$\min_{x_{f,j}}\left\|x_{f,j}\right\|_0 \quad \text{s.t.}\ z_{t,j}=A_j x_{f,j} \tag{6}$$

式(6)是一个 NP 难问题，由于其具有高的复杂度而求解困难，但当传感矩阵 A_j 满足受限等距特性(restricted isometry property，RIP)，式(6)可以松弛为求解最小 L_1 范数问题[10]。由于实际中采样数据不可避免受噪声干扰，式(6)变为如下形式：

$$\min_{x_{f,j}}\left\|x_{f,j}\right\|_1 \quad \text{s.t.}\ \left\|z_{t,j}-A_j x_{f,j}\right\|_2\leqslant\varepsilon \tag{7}$$

其中，ε 为采样数据中的噪声误差上限且 $\left\|n_{t,j}\right\|_2\leqslant\varepsilon$。在压缩频谱感知过程中，感知用户根据压缩采样数据 $z_{t,j}$ 来重构出频谱信号 x_{fj}，最后利用频域能量检测法[7]确定频谱信号上各个子频段的使用状态。

3.2　宽带分布式压缩频谱感知

在压缩感知信号重构过程中，最小 L_0 范数问题求解依赖于信号非零元素个数，而松弛成最小 L_1 范数问题求解取决于信号元素的绝对幅值。为改善压缩感知松弛后的重构性能，Candes 等人[11]提出一种求解加权最小 L_1 范数的重构算法，该算法根据前一次迭代出的信号设定当前迭代重构的权值，来降低错误重构的可能性。同理在频谱感知的信号重构过程中，为提高频谱感知性能，对于高概率存在授权用户的子频段进行加权处理，权值 w 满足 $0\leqslant w<1$，则促使对应子频段产生信号值，同时保持余下的子频段的权值 $w=1$，避免抑制这些子频段上授权用户信号值的产生。结合加权策略式(7)可写为：

$$\min_{x_{f,j}}\sum_{k=1}^{N}w_{jk}x_{f,j}(k) \quad \text{s.t.}\ \left\|z_{t,j}-A_j x_{x_{f,j}}\right\|_2\leqslant\varepsilon \tag{8}$$

其中，w_{jk} 表示在第 j 个感知用户端频谱信号 $x_{f,j}$ 的第 k 个元素值对应的权值。式(8)可以通过求解正则化 L_1 范数最小二乘问题来重构频谱信号 x_{fj}。

$$\min_{x_{f,j}}\left\|W_j x_{f,j}\right\|_1+\lambda_j\left\|z_{t,j}-A_j x_{f,j}\right\|_2^2 \tag{9}$$

其中，W_j 是由加权系数 $w_{j1},w_{j2},\cdots,w_{jN}$ 组成的对角加权矩阵，λ_j 是在感知用户 j 端的正则化因子。在该无线感知网络中，感知用户通过分布式协作的方式进行频谱感知。感知网络用一个无向图 $G=(U,V)$ 表示[12]，网络中所有感知用户可用序号集 $N=\{1,2,\cdots,J\}$ 表示，$V=\{v_j|j\in N\}$ 表示有限非空的感知用户集合，$U=\{g_{ij}=(v_i,v_j)|i,j\in N\}$ 表示感知用户之间连接边集合，$Z_j=\{v_i|g_{ij}\in U\}$ 表示以第 j 个感知用户为中心的一跳通信范围内相邻用户集合。针对第 j 个感知用户感知端，则有：

$$\begin{aligned}&\min_{x_{f,j}}\left\|W_j x_{f,j}\right\|_1+\lambda_j\left\|z_{t,j}-A_j x_{f,j}\right\|_2^2\\&\text{s.t.}\ \ x_{f,j}=\bar{x}_{f,i},\forall i\in\mathbb{Z}_j\end{aligned} \tag{10}$$

即在以第 j 个感知用户为中心的一跳通信范围内，通过一致约束迫使重构出的频谱信号 x_{fj} 与周围邻居用户重构出频谱 $\bar{x}_{fi}$ 一致。为了减少约束方程，降低计算量[6]，式(10)可写成：

$$\begin{aligned}&\min_{x_{f,j}}\left\|W_j x_{f,j}\right\|_1+\lambda_j\left\|z_{t,j}-A_j x_{f,j}\right\|_2^2\\&\text{s.t.}\ \ x_{f,j}=\sum_{i\in\mathbb{Z}_j}\theta_{ji}\bar{x}_{f,i}\end{aligned} \tag{11}$$

其中，系数 θ_{ji} 是第 j 个感知用户与一跳通信范围内感知用户 i 连接边的连接系数，且 $\theta_{ji}=\theta_{ij}$。式(11)可以通过交替方向乘子法来进行迭代求解[8]，具体过程如下：

$$L\left(\boldsymbol{x}_{f,j};W_j,\lambda_j,\boldsymbol{\beta}_j,c,\left\{\bar{\boldsymbol{x}}_{f,i}\right\}_{i\in\mathbb{Z}_j}\right)=\left\|W_j\boldsymbol{x}_{f,j}\right\|_1+$$

$$\lambda_j\left\|\boldsymbol{z}_{t,j}-\boldsymbol{A}_j\boldsymbol{x}_{f,j}\right\|_2^2+\boldsymbol{\beta}_j\boldsymbol{x}_{f,j}+\frac{c}{2}\left\|\boldsymbol{x}_{f,j}-\sum_{i\in\mathbb{Z}_j}\theta_{ji}\bar{\boldsymbol{x}}_{f,i}\right\|_2^2 \quad (12)$$

其中，参数 β_j 和 c 为拉格朗日和增强拉格朗日乘子，在重构频谱信号阶段，每个感知用户通过求解如下迭代过程来更新频谱信号和拉格朗日乘子：

$$\boldsymbol{x}_{f,j}(l+1)=\arg\min_{x_{f,j}}L\left(\boldsymbol{x}_{f,j};W_j(l+1),\lambda_j,\boldsymbol{\beta}_j(l),c,\left\{\bar{\boldsymbol{x}}_{f,i}(l)\right\}_{i\in\mathbb{Z}_j}\right) \quad (13)$$

$$\boldsymbol{\beta}_j(l+1)=\boldsymbol{\beta}_j(l)+c\left(\boldsymbol{x}_{f,j}(l+1)-\sum_{i\in\mathbb{Z}_j}\theta_{ji}\bar{\boldsymbol{x}}_{f,i}(l+1)\right) \quad (14)$$

在整个迭代过程中，网络中的所有感知用户的感知结果要达到一致相同需要经过多次迭代，对于 l 次迭代重构出的频谱信号上能量大于设定门限值的子频段，在下一次迭代重构出的频谱信号上相应频段更倾向于存在授权用户，为提高频谱重构准确性，把上一次迭代重构出的频谱信号作为本次迭代重构权值 w_{jk} 选择的依据。即对 l+1 次迭代重构对应权值 w_{jk} 设置如下：

$$w_{jk}(l+1)=\begin{cases}\dfrac{\rho}{\left|\boldsymbol{x}_{f,jk}(l)\right|}, & \left|\boldsymbol{x}_{f,jk}(l)\right|\geqslant\gamma\\ 1, & \left|\boldsymbol{x}_{f,jk}(l)\right|<\gamma\end{cases} \quad (15)$$

其中，γ 为预设的判决门限，$0\leqslant\rho<\gamma$，$1\leqslant k\leqslant N$，$W_j(l+1)$ 为 $w_{j1}(l+1),w_{j2}(l+1),\cdots,w_{jN}(l+1)$组成的对角矩阵。$x_{fj}(l)$表示第 j 个感知用户在第 l 次迭代更新得到的频谱信号，$\beta_j(l)$是第 l 次迭代更新的拉格朗日乘子。在第 l+1 迭代过程中，第 j 个感知用户在以自己为中心的一跳通信范围内，通过式(15)来更新权值矩阵 $W_j(l+1)$，接着通过式(13)更新频谱信号 $x_{fj}(l+1)$，然后把 $x_{fj}(l+1)$广播给相邻的一跳邻居用户，最后通过式(14)更新拉格朗日乘子 $\beta_j(l+1)$。感知网络中所有感知用户进行相同操作，然后进行下一次迭代融合过程，直至全网感知用户的感知结果一致。

整个算法的实现过程如下。

阶段一：每个感知用户压缩采样得到的时域采样数据为 z_{tj}，本地传感矩阵为 A_j，频谱重构最大迭代次数为 $l_{\max}$，设置参数 λ_j、c 和 α，其中 α 衡量相邻两次重构出频谱信号的差别程度，l 表示迭代次数，初始迭代次数 l=0，初始频谱信号 $x_{fj}(0)$=0 以及拉格朗日乘子 $\beta_j(0)$=0，$\forall j,j\in N$。

阶段二：感知用户进行加权一致优化迭代融合过程：$l=l+1$。

(1)所有感知用户通过式(15)确定各个子频段上的加权系数 $w_{jk}(l+1)$，然后通过式(13)更新频谱信号 $x_{fj}(l+1)$。

(2)所有感知用户广播自己重构出的 $x_{fj}(l+1)$给它们的一跳通信范围内相邻用户，然后通过式(14)更新拉格朗日乘子 $\beta_j(l+1)$。

(3)若 $l<l_{\max}$ 或$\|x_{fj}(l+1)-x_{fj}(l)\|_2\geqslant\alpha$，继续阶段二过程，否则终止加权一致优化迭代融合过程，转至阶段三过程。

阶段三：每个感知用户把得到的最终频谱信号 x_{fj} 通过式(3)确定其频谱占用状态$\hat{\boldsymbol{d}}_j$，然后根据频谱占用情况接入空闲频谱进行通信。

4 仿真结果及分析

在实验仿真中，宽带频段被均匀分成 M=32 个子频段，每个子频段仅由单个授权用户占用通信，频带占用率约为 12.5%。子频段信道经历频率选择性衰落，并在每次感知过程中，每个子频段信道的增益服从瑞利分布且保持不变。K/N 表示压缩率，其中 K 为压缩采样点数，N 为奈奎斯特采样点数且 $N=M$。感知用户信噪比（signal to noise ratio，SNR）为该感知用户接收到的宽带信号功率与高斯白噪声功率之比。在压缩频谱感知中，频谱重构的准确性可由归一化均方误差（normalized mean square error，NMSE）$E\{\|x_{fj}-\tilde{x}_{fj}\|^2/\|\tilde{x}_{fj}\|^2\}$作为评价指标，其中，$\tilde{x}_{fj}$ 是授权用户的真实频谱信号，而频谱感知性能的好坏可由检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 进行衡量[5]，其中检测概率为 $P_d=E\left\{\dfrac{d^T(d=\hat{d})}{(q^Td)}\right\}$，虚警概率为 $P_f=E\left\{\dfrac{(q-d)^T(d\neq\hat{d})}{(M-q^Td)}\right\}$，其中 d 为该宽带上子频段真实的占用状态信息向量，$\hat{d}$为感知用户检测出的占用状态信息向量，q 为元素全为 1 的 $M\times1$ 维向量。仿真中分别通过与基于一致平均的宽带分布式协作频谱感知算法[5]（简称为一致平均方法）和基于一致优化的宽带分布式协作频谱感知算法[6]（简称为一致优化方法）进行比较，验证本文提出的基于加权一致优化的宽带分布式协作压缩频谱感知算法（简称为加权一致优化方法）的有效性。

图 2 给出了信噪比为–5 dB，协作用户数分别为 5 和7 条件下 3 种频谱感知算法的频谱重构性能随压缩率变化的曲线。由图 2 可知，随着压缩采样数据不断增加，3 种算法重构出的频谱信号的归一化均方误差不断减小，即频谱重构的准确性不断提高。随着协作用户数增加，本文所提加权一致优化方法和一致优化方法的频谱重构误差降低，而一致

平均方法的频谱重构性能改善不明显。由于频谱感知的最终目的是对频谱信号上各个子频段的使用状态进行判定，当频谱重构误差越小，即重构出的频谱信号越接近授权用户的真实频谱信号，则在此基础上对频谱信号上各个子频段的使用状态的判定更为准确，否则相应的虚警判决就会增加，降低频谱利用率。故针对频谱信号的重构性能，本文所提加权一致优化方法要好于一致平均方法和一致优化方法。

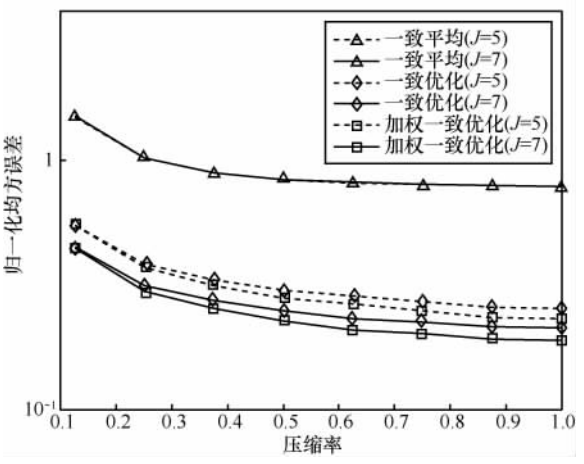


图 2　不同协作用户数下频谱重构性能随压缩率变化的关系

图 3 给出了虚警概率 P_f=0，仿真条件与图 2 中相同时 3 种频谱感知方法的检测概率随压缩率变化的曲线。在压缩频谱感知中，频谱重构性能直接影响到频谱感知性能，频谱重构的准确性越好，相应频谱感知性能越好。由图 3 可知，随着压缩采样数据不断增加，3 种频谱感知算法的检测概率持续增大，并且增加协作用户可以有效提升频谱感知性能。通过比较图 2 和图 3 可知，本文所提加权一致优化方法的频谱重构性能不仅要好于一致平均和一致优化方法的重构性能，而且相应的频谱感知性能也好于后两者。

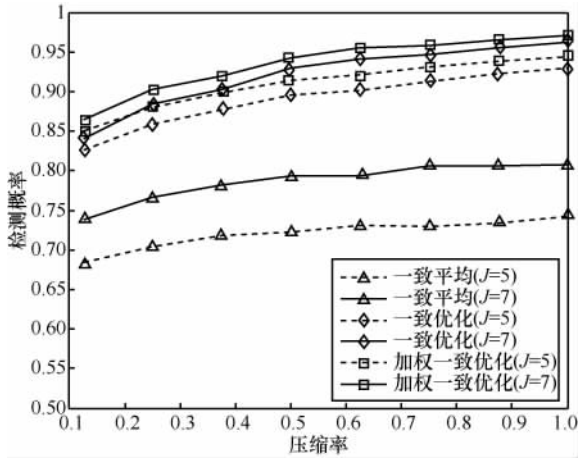


图 3　不同协作用户数下检测概率随压缩率变化的关系

图 4 给出了虚警概率 P_f=0、协作用户数为 7、信噪比分别为−5 dB 和 0 dB 时，3 种算法的检测概率随压缩率变化的曲线。由图 4 可知，随着压缩率不断增大，检测概率不断增大，对应的频谱感知性能越好，且信噪比由−5 dB 增大到 0 dB 时，频谱重构准确性增大，频谱感知性能变好。尽管频谱感知性能受到信噪比变化的影响，本文所提加权一致优化方法的频谱感知性能要好于一致平均方法和一致优化方法的频谱感知性能。由图 3 和图 4 可知，在达到同等检测概率的条件下，本文所提加权一致优化方法相比一致优化方法所需要压缩采样数据较少，对应的通信花销和感知时间降低，因而感知用户可以快速遍历整个频段，获取频谱占用状态信息，有效的利用空闲频段。

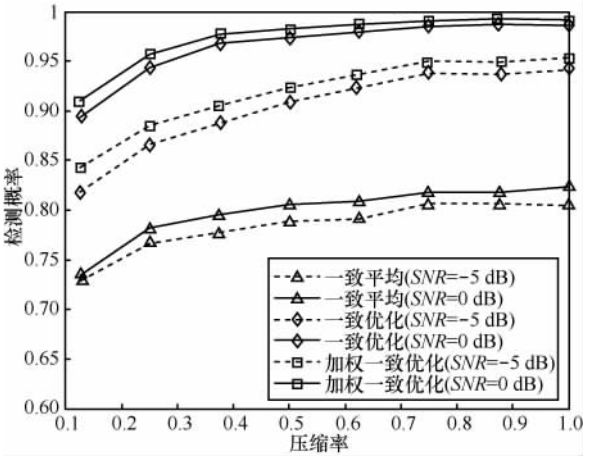


图 4　不同信噪比下检测概率随压缩率变化的关系

5　结束语

虽然基于压缩感知的宽带频谱感知算法能有效降低宽带信号的采样速率，但由于采样数据量的减少，频谱感知性能会相应变差，尤其在低信噪比环境中，这种恶化更为明显。宽带压缩频谱感知通过分布式协作的方式可以获得用户分集增益，有效提升感知性能。因此，本文提出一种基于加权一致优化的宽带分布式协作压缩频谱感知算法。通过实验仿真可以得出，基于加权一致优化的频谱感知算法可以增大在低信噪比环境下的频谱重构准确性，有效提升频谱感知性能。在满足同等感知性能的条件下，本文所提感知算法可以快速完成感知过程，进而感知用户可以有效的利用空闲频段，提高频谱利用率。

参考文献：

[1]　WANG B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a

survey[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 5-23.

[2] MITOLA J I, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.

[3] WANG Y, TIAN Z, FENG C. Collecting detection diversity and complexity gains in cooperative spectrum sensing[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11 (8): 2876-2883.

[4] QIN Z, GAO Y, PLUMBLEY M D, et al. Wideband spectrum sensing on real-time signals at sub-nyquist sampling rates in single and cooperative multiple nodes[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 64(12): 3106-3117.

[5] TIAN Z. Compressed wideband sensing in cooperative cognitive radio networks[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, November 30–December 4, 2008, Piscataway, NJ, USA. New Jersey: IEEE Press, 2008: 1-5.

[6] ZENG F, LI C, TIAN Z. Distributed compressive spectrum sensing in cooperative multi-hop cognitive networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1): 37-48.

[7] JIANG J, SUN H, BAGLEE D, et al. Achieving autonomous compressive spectrum sensing for cognitive radios[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(3): 1281-1291.

[8] BAZERQUE J A, GIANNAKIS G B. Distributed spectrum sensing for cognitive radio networks by exploiting sparsity[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58 (3): 1847-1862.

[9] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.

[10] CANDE J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.

[11] CANDES E J, WAKIN M B, BOYD S P. Enhancing sparsity by reweightedminimization[J]. Journal of Fourier Analysis and Applications, 2008, 14(5-6): 877-905.

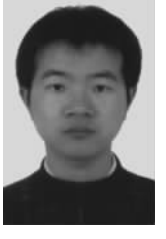
[12] SHI W, LING Q, YUAN K, et al. On the linear convergence of the ADMM in decentralized consensus optimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(7): 1750-1761.

[作者简介]

闫玉芝(1989–),男,宁波大学硕士生,主要研究方向为认知无线电频谱感知、压缩感知。

李有明(1963–),男,宁波大学教授、博士生导师,主要研究方向为宽带通信、电力线通信、协作中继、认知无线电等。

周桂莉(1992–),女,宁波大学硕士生,主要研究方向为水声通信中资源分配。



吴耀辉(1979–),男,宁波大学博士生,浙江万里学院讲师,主要研究方向为 OFDM 系统资源分配和频谱感知。