

基于无线传感网的分布式协作调制识别算法*

汪 伟, 张效义, 胡赞鹏

(解放军信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002)

摘要: 针对低信噪比时单接收节点调制识别率低的问题, 提出了基于无线传感网的分布式协作调制识别方法, 在低信噪比下实现对四种典型调制方式的正确识别。首先利用网络中相互协作的多个传感器节点, 从提高性能出发, 在节点能耗最小的前提下, 根据特征的识别能力与信噪比的关系以及特征计算量来设计协作方案, 每节点只提取部分特征。中心节点处将汇聚来的特征组合成特征向量, 并利用支持向量机分类器对其进行分类。仿真表明, 该方法的识别性能优于单节点和已有的多节点方法, 传感器节点能耗降低, 并且对信噪比环境具有更好的自适应性。

关键词: 无线传感网; 调制识别; 分布式协作; 支持向量机; 自适应性

中图分类号: TN929.5; TP212.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2014)05-1524-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.058

Distributed cooperative modulation recognition based on wireless sensor networks

WANG Wei, ZHANG Xiao-yi, HU Yun-peng

(Institute of Information System Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aiming at the low recognition rate when SNR is low in single node, this paper proposed a distributed cooperative method to recognize different modulation types based on wireless sensor networks and realized correct recognition of four classic modulations in low-SNR environment. It used several collaborated sensors in networks to improve the performance of the system and based on the principle of lowest sensor overhead. It designed cooperative method according to the relationships between the ability of the characteristics with the SNR and the calculation of characteristics, and each node extracted part of the characteristics. It combined a feature vector by the features which sent to the central node. Then it used support vector machine classifier to recognize the signals. Simulation results show that the recognition rate of the proposed method is higher than the single-node and the existed multi-nodes method, overhead of sensor is reduced, and has better adaptability to SNR environments.

Key words: wireless sensor networks; modulation recognition; distributed cooperative; support vector machine; adaptability

0 引言

数字通信信号的调制识别可在多种调制信号和有噪声干扰情况下确定接收信号的调制方式, 为参数估计等信号进一步分析处理提供依据。调制识别方法大致分为基于似然概率的理论决策法和基于特征提取的模式识别法两种, 但目前大多数研究仅限于单节点, 识别性能很大程度上取决于信道质量和信号强度, 在低信噪比和恶劣信道情况下性能较差。随着无线传感网的发展, 分布式信号检测、估计和识别算法受到了越来越多的关注。

文献[1]提到了分布式调制识别的若干网络结构, 包括决策融合、分布式计算和有中心的信号融合。决策融合不需要网络中的传感器节点对于接收信号的同步, 传输数据量小且稳定, 但是由于损失了较多原始信息, 对性能改善有限。分布式计算将整个计算过程分配到多个传感器节点上, 每个节点只需计算部分中间结果即可, 降低了传感器的能耗, 但某个较差的

中间结果都将导致最终结果变差。有中心的信号融合分为同步和非同步两种, 融合后信号信噪比提高, 可以明显改善性能, 但是传输数据量大, 不适合无线传感网。文献[2]提出了基于数据层、特征层、决策层信息融合的调制识别方法, 给出了不同层次的融合准则, 并对不同层次的优缺点进行了比较。文献[3]设计了一种基于特征层的分布式协作方案, 利用网络中多个传感器、提升性能的同时, 降低系统能耗, 简单易行, 但是对于网络环境的变化其灵活性较差。文献[4]中单节点利用循环谱特征得到决策结果并发送给中心节点, 中心节点处也计算循环谱特征, 通过 Bayesian 准则来得到最终识别结果。文献[5~7]中也提出了若干分布式的调制识别算法。由以上文献可知, 无线传感网中传感器节点间传输能力是有限的, 将原始数据全部无差错地传送是不易实现的。因此基于特征值或者决策结果的协作方案更适用于无线传感网。

本文针对文献[3]中方案的不足进行了改进, 选取了四种典型数字通信信号 BPSK、QPSK、8PSK、16QAM, 利用相互协作

收稿日期: 2013-07-18; **修回日期:** 2013-08-24 **基金项目:** 国家科技重大专项资助项目(2010ZX03006-002)

作者简介: 汪伟(1989-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向为多传感器协同信号检测与识别(ww_0312@126.com); 张效义(1966-), 男, 河南尉氏人, 教授, 硕导, 主要研究方向为通信与信息系统; 胡赞鹏(1978-), 男, 江西南昌人, 副教授, 硕导, 主要研究方向为无线通信、无线传感器网络等。

的多个传感器,根据信噪比大小设计协作方案,得到四个高阶累积量组合成的特征向量,再利用支持向量机分类器对其进行分类。仿真测试了不同信噪比条件下本文方案的识别性能,并与文献[3]、加权方法及单节点进行了比较。

1 系统模型

无线传感网是由部署在监测区域内的多个传感器节点组成,通过无线通信方式形成的自组织网络系统,其目的是协作地感知、采集和处理网络覆盖区域中感知对象的信息,并发送给观察者^[8]。本文采用的是有中心的基于特征层的分布式协作网络系统,系统模型如图1所示。

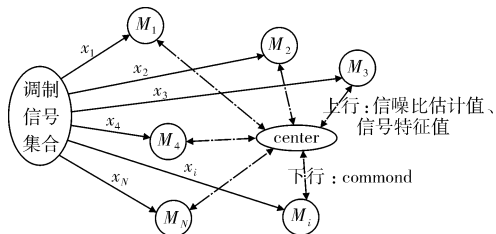


图1 分布式协作调制识别系统模型

图1中 $M_1, M_2, \dots, M_N$ 为传感器节点,放置在监测区域内不同的地理位置,可感知并接收信号,具有信号处理能力;Center是中心节点,根据各传感器节点的信噪比分布,自适应地选择协作策略,并且内含支持向量机分类器,可对输入的信号特征向量进行识别。

2 分布式协作方案

2.1 特征提取与分析

信号特征是能够区分信号类型的重要参数。目前用于信号识别的特征主要有以下几种:瞬时特征^[9]、小波变换特征^[10]、循环平稳特征^[11]、高阶累积量特征^[12]等。在参考了相关文献后,本文选取高阶累积量对四种数字调制信号BPSK、QPSK、8PSK、16QAM进行识别。

由于高斯白噪声高于2阶的高阶累积量为零,因此利用高阶累积量进行信号的调制识别可以很好地抑制噪声干扰;高阶累积量计算简单,主要是求取信号的高阶矩,不同的高阶累积量含有若干相同的高阶矩,利用多个传感器的协同,通过合理组合,可降低每个传感器的平均计算量。

对一个零均值的复随机过程 $X(n)$,其高阶混合矩可表示为^[13]

$$M_{pq} = E[X(n)^p X^*(n)^q] \quad (1)$$

其中: $*$ 表示函数的共轭。根据共轭位置的不同,四阶和六阶高阶累积量分别定义为

$$C_{40} = \text{cum}(x, x, x, x) = m_{40} - 3(m_{20})^2 \quad (2)$$

$$C_{41} = \text{cum}(x, x, x, x^*) = m_{41} - 3m_{20}m_{21} \quad (3)$$

$$C_{42} = \text{cum}(x, x, x^*, x^*) = m_{42} - |m_{20}|^2 - 2m_{21}^2 \quad (4)$$

$$C_{63} = \text{cum}(x, x, x, x^*, x^*, x^*) = m_{63} - 9C_{42}C_{21} - 6m_{21}^3 \quad (5)$$

仿真得到的高阶累积量随带内信噪比的变化如图2所示。由图2可知,各高阶累积量特征值可准确区分不同信号时的信噪比分别为 C_{40} (6 dB)、 C_{63} (4 dB)、 C_{42} (2 dB)、 C_{41} (1 dB)。

2.2 分布式协作方案

单节点调制识别不仅性能受信道质量和信号强度影响大,

而且需提取信号所有特征值,能耗高。而在无线传感网中,可以充分利用多传感器的优势,设计有效的分布式自适应协作方案,通过信息融合获得比单节点更好的性能^[2],更适合周围变化的信噪比环境。并且每个传感器节点只提取部分特征值,降低了传感器能耗,延长了使用寿命。

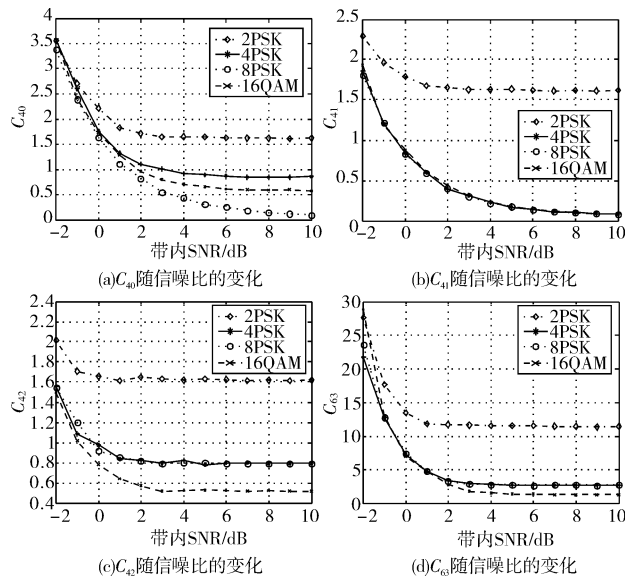


图2 四种高阶累积量在不同带内信噪比(SNR)时的变化

已有加权方法是每个传感器都提取所有特征值,然后根据信噪比进行加权,这样并不能节省传感器能耗。文献[3]中分布式协作方法是根据每节点信噪比大小,让信噪比大的传感器节点提取信噪比要求高的特征值,让信噪比小的传感器节点提取信噪比要求低的特征值。这种方法每个传感器节点只提取一个特征值,能耗降低,并且识别性能优于单节点。但是此方法没有充分考虑信噪比环境的变化,如果出现信噪比变化范围大的情况,低信噪比节点提取的特征值误差较大,这将导致中心节点得到的特征向量识别效果变差,系统性能也会下降,所以需要考虑不同特征值所适用的信噪比区间。以高阶累积量 C_{42} 为例可以看到,当信噪比达到2 dB时,各种信号的 C_{42} 都达到稳定。可认为当某传感器节点粗估的信噪比大于等于2 dB时,此节点提取的特征 C_{42} 是可靠的;否则认为此节点提取的 C_{42} 是不可靠的。根据图2仿真结果将信噪比分为四个区间,如表1所示。

表1 信噪比区间和相应的可靠高阶累积量

[1, 2)	[2, 4)	[4, 6)	[6, +∞)
C_{41}	C_{41}/C_{42}	$C_{41}/C_{42}/C_{63}$	$C_{40}/C_{41}/C_{42}/C_{63}$

显然信噪比要求由高到低依次为 C_{40} 、 C_{63} 、 C_{42} 、 C_{41} 。

基于此思路,本文提出了一种充分考虑特征值与信噪比变化关系,根据高阶累积量计算特点,在保证性能前提下以计算量最小为原则的分布式协作方案,流程如图3所示。

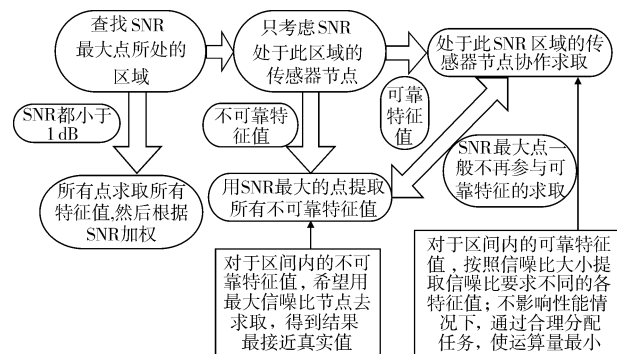


图3 分布式协作方案流程

以四个传感器节点为例,所对应网络的具体分布式协作方案如下:

a) 查找信噪比位于 $[6, +\infty)$ 的节点,节点个数是 num1。当 num1 = 1,此节点提取所有特征值;当 num1 ≥ 2 时,将含有相同高阶矩的高阶累积量在同一节点求取可以减少计算量,按照表 2 的原则协作求取。

表 2 计算量最小的高阶累积量组合

节点个数	不同节点提取的高阶累积量组合
2	$C_{40}/C_{41}; C_{42}/C_{63}$
3	$C_{40}; C_{42}/C_{63}; C_{41}$
4	$C_{40}; C_{41}; C_{42}; C_{63}$

b) 当 num1 = 0 时,查找信噪比位于 $[4, 6)$ 的节点,节点个数是 num2。当 num2 = 1,此节点提取所有特征值;当 num2 = 2 时,考虑到 C_{40} 已经不处于稳定的信噪比区间,故用最大的信噪比点来求取 C_{40} ,另外一个节点提取位于稳定区间的 $C_{41}/C_{42}/C_{63}$ 。由于在保证性能情况下希望单个传感器节点计算量尽量小,所以由表 2,信噪比最大点求取 C_{40}/C_{41} ,次大点提取 C_{42}/C_{63} 。同理,当 num2 = 3 时,最大的信噪比点求取 C_{40} ,次大点求取 C_{42}/C_{63} ,次次大点求取 C_{41} ,当 num2 = 4 时,最大的信噪比点求取 C_{40} ,次大点求取 C_{63} ,次次大点求取 C_{42} ,最小信噪比点求取 C_{41} 。

c) 当 num2 = 0 时,查找信噪比位于 $[2, 4)$ 的节点,节点个数是 num3。当 num3 = 1,此节点提取所有特征值;当 num3 = 2 时,考虑到 C_{40}/C_{63} 已经不处于稳定的信噪比区间,故用最大的信噪比点来求取 C_{40}/C_{63} ,另外一个节点提取位于稳定区间的 C_{41}/C_{42} ;同理,当 num3 = 3 或 4 时,最大的信噪比点求取 C_{40}/C_{63} ,次大点求取 C_{42} ,次次大点求取 C_{41} 。

d) 当 num3 = 0 时,查找信噪比位于 $[1, 2)$ 的节点,节点个数是 num4。当 num4 = 1,此节点提取所有特征值;当 num4 = 2 或 3 或 4 时,考虑到 $C_{40}/C_{42}/C_{63}$ 已经不处于稳定的信噪比区间,故用最大的信噪比点来求取 $C_{40}/C_{42}/C_{63}$,次大点提取位于稳定区间的 C_{41} 。

e) 当所有节点的信噪比低于 1 dB 时,每个传感器节点都求取所有高阶累积量值,然后由中心节点根据信噪比进行加权。

2.3 分布式协作方案的自适应性

本文方案结合文献[3]和加权法的优点,对于不同信噪比环境都能自适应地选择最优策略,提高性能并且减少计算量。

a) 当信噪比都较差时,每个传感器节点都求取所有特征值再加权。

b) 当信噪比分布较集中时,多节点协作求取特征,每节点提取部分特征值即可,不影响性能,同时降低计算量。

c) 当信噪比分布较分散时,即可能出现低信噪比节点时,舍弃信噪比差的节点,通过较高信噪比区间内节点多提取特征的做法来提高性能。

d) 对于要提取的特征进行分析,相同节点提取中间过程计算量重复多的若干特征,使每个传感器节点的计算量尽可能小。

3 仿真分析

使用 MATLAB 仿真软件对本文方法与文献[3]、加权方

法、单节点的两种情况(信噪比为正态分布均值/网络中随机某节点)在不同信噪比环境下进行了比较,分析了识别率、计算时间、每传感器节点提取特征的平均个数和节点数目改变时的网络性能变化。仿真条件:假设网络中有四个传感器节点,信号波特率 1M,采样率 10M,400 个码元,载频 3M,滚降系数 0.35,蒙特卡洛循环次数 2500。支持向量机分类器训练序列 200,测试序列 2000,选取高斯核,核参数 10。仿真中的信噪比大小都是对应带内信噪比。

假设信道模型为阴影衰落,则各个传感器节点接收到的信噪比服从对数正态分布,如果将信噪比表示成 dB 形式,那么信噪比服从正态分布^[14]。

1) 本文方案在不同信噪比环境下,每个节点需要提取的特征个数平均值,如表 3 所示。

表 3 每节点提取的特征平均个数

信噪比分布	节点 1	/ 节点 2	/ 节点 3	/ 节点 4
$N(2, 1)$	0.9876	/ 1.0612	/ 0.9460	/ 1.0052
$N(2, 3)$	0.9740	/ 1.0224	/ 0.9936	/ 1.0148
$N(2, 5)$	0.9972	/ 1.0492	/ 0.9768	/ 1.0104
$N(3, 1)$	0.9996	/ 0.9992	/ 0.9940	/ 1.0072
$N(3, 3)$	0.9896	/ 0.9868	/ 1.0096	/ 1.0140
$N(3, 5)$	0.9740	/ 0.9928	/ 0.9648	/ 1.0684
$N(4, 1)$	1.0364	/ 1.0208	/ 0.9764	/ 0.9664
$N(4, 3)$	0.9724	/ 1.0068	/ 0.9896	/ 1.0312
$N(4, 5)$	0.9648	/ 0.9680	/ 0.9796	/ 1.0876

如果不考虑每个高阶累积量特征的计算量大小,表 3 显示了本文方案在不同信噪比环境下,每个节点平均提取特征个数接近于 1,相比加权法来说可以有效节省传感器能耗。

2) 不同信噪比环境下,五种方案的总识别率比较,如表 4 所示。

表 4 不同方案总识别率比较

信噪比分布	本文	文献[3]	加权	随机某单节点	信噪比为均值的单节点
$N(2, 1)$	83.01	79.83	84.75	67.56	67.90
$N(2, 3)$	85.54	77.00	85.26	67.29	68.08
$N(2, 5)$	87.04	74.04	84.89	65.84	66.61
$N(3, 1)$	90.85	87.86	91.15	76.46	76.78
$N(3, 3)$	92.04	84.54	91.79	74.86	76.73
$N(3, 5)$	93.88	81.43	91.16	72.70	76.40
$N(4, 1)$	95.04	92.34	95.68	84.74	86.09
$N(4, 3)$	96.40	91.63	96.14	81.76	86.33
$N(4, 5)$	97.61	91.19	96.70	81.34	86.04

a) 相同信噪比方差,不同均值条件下,五种方法都是均值越大,识别性能越好。

b) 相同信噪比均值,不同方差条件下,随着方差的增大,本文方案识别性能变好,文献[3]方案识别效果变差,加权方案变化不大。

c) 在相同信噪比条件下,多节点联合性能明显优于单节点。

d) 在相同信噪比条件下,当信噪比分布方差较小时,本文方案识别率略低于加权法,但两者都高于文献[3]的方案;当信噪比分布方差较大时,本文方案识别率高于加权法,更高于文献[3]。

3) 不同信噪比环境下,三种分布式方案的计算时间比较。

统计的时间是四个传感器节点运行总时间,对于不同方案,单次记录的时间都是在相同信号条件(信噪比分布)下。

仿真环境为 Windows XP 操作系统下的 32 位 MATLAB 7.9 软件,硬件配置为 Intel® Pentium® Dual E2180 2 GHz、2 GB 内存的联想台式机。表 5 给出了不同方案计算时间的比较。

表 5 不同方案计算时间比较 /s

信噪比分布	本文	文献[3]	加权
$N(2,1)$	0.0445	0.0580	0.1295
$N(2,3)$	0.0388	0.0569	0.1272
$N(2,5)$	0.0375	0.0565	0.1261
$N(3,1)$	0.0429	0.0563	0.1259
$N(3,3)$	0.0386	0.0569	0.1270
$N(3,5)$	0.0379	0.0563	0.1256
$N(4,1)$	0.0420	0.0551	0.1227
$N(4,3)$	0.0400	0.0563	0.1252
$N(4,5)$	0.0399	0.0563	0.1260

对于相同信噪比条件, MATLAB 计算时间由少到多依次为本文方案、文献[3]、加权方案。这是由于,虽然本文方案和文献[3]都是只提取四个特征,但本文方案可能会出现某节点提取多个特征的情况,由于根据计算量设计了最优特征值的组合,计算量减少,所以时间会减少。但相比于加权法,前两者都明显降低了计算量。虽然本文方案在某一次情况下,可能出现有些节点提取不止一个特征,有些节点不提取特征的情况,但由表 3 可知,在多次实验中单个传感器节点提取的特征个数均值依然接近于 1。

4) 无线传感网节点个数变化。

a) 节点个数增加,以信噪比环境为 $N(3,3)$ 为例。

表 6 为节点个数增加时网络性能的变化。由表 6 可知,当传感器节点个数增加时,总识别率提高,但是当节点个数增加到一定程度时,对网络性能影响不大。这种情况因为本文方案一个特征只提取一次,并且特征数(4 个)会小于节点个数,即使节点信噪比全部落入 $[6, +\infty)$,也只会选取其中 4 个节点来提取特征,所以新增的节点对性能提升没多大影响。对于这种情况,网络系统可以加入新特征,将新增节点充分利用,性能会进一步提升。

表 6 节点个数增加时网络性能的变化

节点个数	总识别率	总时间/s	单节点平均时间/s
4	91.04	0.0386	0.00965
5	92.58	0.0442	0.00884
6	94.26	0.0513	0.00855
7	94.50	0.0525	0.00750
8	94.38	0.0539	0.00674

当传感器节点个数增加时,总时间上升,这是因为特征值求取更加分散在多节点上。但是随着点数增加,对于单节点来说,平均时间是下降的。

b) 节点个数减少,以信噪比环境 $N(3,3)$ 为例,表中单节点的信噪比是正态分布均值 3 dB。

表 7 为节点个数减少时网络性能的变化。由表 7 可知,当传感网中若干传感器出现故障,即工作节点减少时,总识别率会下降,但是依然优于单节点。

表 7 节点个数减少时网络性能的变化

节点个数	总识别率	总时间/s	单节点平均时间/s
4	91.04	0.0386	0.00965
3	88.68	0.0324	0.0108
2	86.00	0.0308	0.0154
单节点	76.73	-	-

4 结束语

本文利用无线传感网中多个传感器节点设计相互协作的分布式调制识别算法,得到反映信号调制方式的特征向量,采用支持向量机分类器对四种典型数字通信信号进行识别。方案根据特征识别能力与信噪比的关系和网络节点所处的不同信噪比区间,自适应地采用不同策略,提高了网络的灵活性,并从识别率、计算时间等方面与已有方案进行了比较。仿真表明,本文方案识别性能优于已有分布式方案,更是明显优于单传感器,与加权法相比大大降低了传感器的能耗,说明了改进方法的有效性。如何进一步改善网络性能以及如何使分布式方案更自适应于网络环境变化将是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] SU Wei, KOSINSKI J. Framework of network centric signal sensing for automatic modulation classification [C]//Proc of International Conference on Networking, Sensing and Control. 2010: 534-539.
- [2] 程汉文,吴乐南. 基于信息融合的信号调制方式识别[J]. 信号处理, 2009, 25(4): 625-629.
- [3] 刘爱声,朱琦. 多传感器节点分布式协作调制识别算法[J]. 信号处理, 2011, 26(8): 1235-1241.
- [4] HEADLEY W C, REED J D, SILVA C D. Distributed cyclic spectrum feature-based modulation classification [C]//Proc of IEEE Wireless Communication and Networking Conference. 2008: 1200-1204.
- [5] FORERO P A, CANO A, GIANNAKIS G B. Distributed feature-based modulation classification using wireless sensor networks [C]//Proc of IEEE Military Communications Conference. 2008: 1-7.
- [6] XU J L, SU W, ZHOU M C. Distributed automatic modulation classification with multiple sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(11): 1779-1785.
- [7] ZHANG Yan, ANSARI N, SU Wei. Multi-sensor signal fusion based modulation classification by using wireless sensor networks [C]//Proc of International Conference on Communications. 2011: 1-5.
- [8] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 4-9.
- [9] NANDI A K, AZZOUZ E E. Automatic identification of digital modulation types [J]. Signal Processing, 1995, 47(1): 55-69.
- [10] HO K C, PROKOPIW W, CHAN Y T. Modulation identification by the wavelet transform [C]//Proc of IEEE Military Communications Conference. 1995: 886-890.
- [11] GARDNER W A, SPOONER C M. Cyclic spectral analysis for signal detection and modulation recognition [C]//Proc of Military Communications Conference. 1988: 419-424.
- [12] SWAMI A, SADLER B M. Hierarchical digital modulation classification using cumulants [J]. IEEE Trans on Communications, 2000, 48(3): 416-429.
- [13] 包锡锐,吴瑛,周欣. 基于高阶累积量的数字调制信号识别算法 [J]. 信息工程大学学报, 2004, 8(4): 463-467.
- [14] 郭梯云,郭国扬,李建东. 移动通信[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003: 66-76.