

基于改进免疫遗传算法的 K 覆盖异构 传感器节点调度

杨锋英, 汤震

(黄淮学院 信息工程学院, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为了实现无线传感器网络监测区域目标点的多重覆盖, 设计了一种基于改进免疫遗传算法的异构传感器节点调度算法实现目标点的 K 重覆盖; 首先, 在传统的概率感知模型中加入剩余能量和感知能力因素, 得到改进的概率感知模型, 并设计了以最小化节点数并满足覆盖度约束的目标函数; 然后, 采用改进的免疫遗传算法对节点进行调度, 最后, 给出了具体的采用改进免疫遗传算法实现 WSN 异构节点调度的具体算法; 仿真实验表明: 文中方法能在满足 K 覆盖约束前提下实现监测区域的节点调度, 与其他方法相比, 活动节点数平均多 7%, 具有较长的网络生命周期和较少的网络能耗。

关键词: 免疫遗传算法 K 覆盖; 异构传感器节点; 网络生命周期

Heterogeneous Sensor Node Scheduling with K-Coverage Guarantee Based on Improved Immune Gene Algorithm

Yang Fengying, Tang Zhen

(Information Engineering College, Huanghuai University, Zhumadian 463000, China)

Abstract: In order to realize the multiple-coverage in monitor area, a heterogeneous sensor node method with K-coverage guarantee was proposed in this paper. Firstly, remain energy and sensor ability factors were added to the traditional sensor model to get the improved sensor model, and the goal function was designed to satisfy the coverage constraint. Then the improved immune gene algorithm was used to schedule the sensor node. Finally, the specific algorithm for heterogeneous sensor node scheduling was given based on improved immune gene algorithm. The simulation shows that our method can realize the sensor node scheduling in monitoring area with K-Coverage, and the number of live nodes was more than 7% compared with other methods, so it has the longer life circle and less energy consumption.

Key words: immune gene algorithm; heterogeneous sensor node; network life circle

0 引言

无线传感器网络监测区域的传感器节点受到自身能量的制约, 往往需要在完成监测任务的情况下进行最大程度地休眠, 以节约能量消耗和均衡网络开销, 最终提高无线传感器网络的生命周期^[1-3]。

节点调度^[4-5]即通过对节点的状态从时空方面进行控制, 对节点在工作和休眠两个状态进行高效调度, 使得冗余节点处于休眠状态, 以减少网络的数据流量和节约网络的能量开销, 从而有效解决传感器网络的覆盖和能量问题。

目前已有的实现节点调度的覆盖算法主要有: 文献 [6] 设计了一种基于节点随机部署和连通概率模型的节点调度算法, 在算法中考虑了不同覆盖率和连通率对应的节点数量对覆盖率的影响, 但文中提出的模型仅考虑了完全覆盖条件, 未考虑多重覆盖情况下对应的连通率问题。文献 [7] 首先以 Sink 节点为基准定义了虚拟坐标的概念, 然后设计了一种基于虚拟坐标的节点调度方法, 首先确定工作节点个数 K , 当总节点数为 N 时, 确定每个节点的邻居点数 N/K , 但没有说明如何确定参考点数 h 。文献 [8] 设计了一种基于邻居节点距离的调

度算法, 通过接收邻居节点的 RSSI 强度判断距离, 当 RSSI 强度高于某一阈值时, 则认为邻居节点能覆盖自己的感知区域, 从而进而决定休眠, 这种方法原理简单, 易于实现, 但是具有较大误差。文献 [9] 根据节点在监测区域的部署的邻居节点集, 计算 Voronoi 覆盖邻居节点集, 从而将部署图转换为 Voronoi 图, 实现了节点对监测区域的 K 覆盖, 但对于每个点均需要根据邻居节点计算 Voronoi 图再计算覆盖度, 具有较大的时间复杂度。文献 [10] 首先判断节点的冗余性, 计算每个节点 2 跳距离范围内的邻居节点, 根据邻居节点的覆盖范围判断自己是否为冗余节点, 并在此基础上设计了 LUC-1 和 LUC-P 节点调度分布式算法。文献 [11] 采用与文献 [10] 类似的机制进行节点调度, 即通过收集邻居信息, 然后对自身进行冗余性判断, 在此基础上进行节点调度。

上述工作均研究了无线传感器网络中的节点调度问题, 但没有考虑节点的异构性对节点调度的影响, 因此, 本文在上述工作的基础上, 提出了一种采用基于改进免疫遗传算法实现调度的新算法, 并通过实验证明了文中方法的有效性。

1 系统模型

1.1 问题描述

假设监测区域 A 为二维平面, 将其离散化为 K 个栅格, 每个栅格的面积为 1, 传感器节点总数为 n 个, 在监测区域中密集分布, 节点集可以表示为 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, 各传感器节点异构, 即不同类型节点对应的初始能量、感知能力存在差

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-01-30。

基金项目: 河南省科技攻关计划资助项目 (122102310474)。

作者简介: 杨锋英 (1979-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事云计算、计算机网络、智能计算方向的研究。

异, 为了实现网络连通, 节点的通信半径 R_c 大于或等于感知半径 R_s 的两倍, s_{jk} 表示类型为 k 的节点 j , x_{ik} 表示 s_{jk} 在栅格 i 的放置情况, 当 x_{ik} 为 1 时, 表示节点 s_{jk} 被放置在栅格 i 上。

1.2 改进的概率感知模型

任一类型 k 的传感器节点 s_{jk} 的坐标可以表示为 $s_{jk} = (sx_{jk}, sy_{jk})$, 则传感器节点 s_{jk} 与栅格点 $g = (gx, gy)$ 之间的欧式距离可以表示为:

$$dist(s_{jk}, g) = \sqrt{(sx_{jk} - gx)^2 + (sy_{jk} - gy)^2} \quad (1)$$

在理想情况下, 节点对目标的覆盖可以采用二元感知模型^[10], 即假设节点 s_{jk} 的感知半径为 r_k , 则节点 s_{jk} 对目标点 g 的覆盖情况可以表示为公式 (2) 所示:

$$cov(m_i, g) = \begin{cases} 1 & dist(m_i, g) \leq R_s \\ 0 & \text{其它情况} \end{cases} \quad (2)$$

在监测环境中, 信号强度受到噪声干扰, 会随着传输距离的增加而衰减, 因此, 采用精确的二元感知模型不能很好地符合实际的需要, 而概率感知模型较二元感知模型能更好地表示监测环境中节点感知目标的概率, 且能考虑电磁扰动和噪声干扰等因素的影响, 因此, 文中采用概率感知模型作为节点感知模型, 传统的概率感知模型可以表示为:

$$C(s_i, p) = \begin{cases} 0 & \text{if } d(s_i, p) \geq r - r_e \\ e^{-\lambda \alpha} & \text{if } d(s_i, p) \leq r + r_e \\ 1 & \text{if } r - r_e \leq d(s_i, p) \leq r + r_e \end{cases} \quad (3)$$

式中, $C(s_i, p)$ 为传感器节点 s_i 对目标 p 的感知概率, r_e 为传感器节点感知的不确定性误差, α 的值可以表示为 $d(s_i, p) \geq r - r_e$, λ 为感知范围为 $r - r_e$ 的感知质量衰减系数, σ 为感知范围为 $r + r_e$ 的感知质量衰减系数。

由于文中的节点为异构型节点, 因此, 在概率感知模型中综合考虑节点的剩余能量和感知半径等因素, 文中改进的概率感知模型如下所示:

$$C(s_{ik}, p) = \begin{cases} 0 & \text{if } d(s_{ik}, g) \geq r - r_e \\ \frac{E_{irk}}{E_{iok}} r_{sk} e^{-\lambda \alpha} & \text{if } d(s_{ik}, g) \leq r + r_e \\ 1 & \text{if } r - r_e \leq d(s_{ik}, g) \leq r + r_e \end{cases} \quad (4)$$

式中, E_{irk} 和 E_{iok} 分别表示节点 s_{ik} 的剩余能量和初始能量, r_{sk} 表示节点 s_{ik} 的感知半径, 其余参数与式 (1) 相同。

1.3 目标函数

S 为监测区域中的一组传感器节点, 根据公式 (4) 可以计算 S 中任一传感器节点 s_{ik} 对目标 g 的感知概率表示为 $C(s_{ik}, p)$, 当 $C(s_{ik}, p)$ 大于某预设阈值时, 就认为目标被 s_{ik} 感知覆盖。K 重覆盖是指监测区域中的每个目标点 g 均至少被 K 个节点覆盖, 即:

$$\forall g, Cov_g \geq k \quad (5)$$

节点调度的目标即在保证每个目标 K 重覆盖的情况下, 尽可能减少工作的冗余节点数, 即目标函数可以表示为:

$$\begin{cases} f_1 = \min(\sum_{i=1}^N ActiveSensor(s_{ik})) \\ s.t. \forall g, Cov_g \geq k \end{cases} \quad (6)$$

式中, $ActiveSensor(s_i)$ 表示节点 s_i 的工作状态, 当正常工作时, $ActiveSensor(s_i)$ 的值为 1, 当其为休眠状态时, 其值为 0。

2 基于免疫遗传算法的节点调度

2.1 免疫遗传算法

遗传算法是一种模拟生物进化行为的优化算法, 能获得问题的近似最优解, 但其存在着收敛速度慢的缺点。人工免疫系统基于免疫学的原理, 具有全局搜索能力强和收敛速度快的优点。因此, 将免疫算法加入遗传算法中, 利用其局部信息来指导交叉和变异过程, 从而加快全局收敛速度, 以尽快获得全局最优解或次优解。文中将这种方法称为免疫遗传算法 (Immune Genetic Algorithm, IGA)。在免疫遗传算法中, 采用抗体表示问题的解, 采用抗原表示问题的目标函数, 采用抗体和抗原之间的亲和度函数表示解的优劣。

2.2 抗体编码

节点调度的情况可以采用一串二进制编码 x 表示, 即:

v_1	v_2	...	v_{n-1}	v_n
-------	-------	-----	-----------	-------

其中, $1 \leq i \leq n$ 表示监测区域中的节点总数, 当 $v_i = 0$ 表示节点 s_i 处于休眠状态; $v_i = 1$ 表示节点 s_i 处于工作状态。

2.3 混沌运动产生初始种群

由于免疫算法和遗传算法均随机产生初始种群, 因此, 为了进一步加快算法收敛速度, 采用混沌运动产生初始种群, 由于混沌运动能根据自身的规律不重复地遍历所有状态, 即具有随机性和遍历性的特征, 因此, 它能使初始种群中的个体较为均匀地分布在占整个解空间。

首先随机产生一个抗体为 x_i , 则对 x_i 每维分量 x_{ik} ($e_k \leq x_{ik} \leq f_k$) 通过公式 (7) 将其映射到区间 (0, 1) 上, 得到 y_k :

$$y_k = \frac{x_{ik} - e_k}{f_k - e_k} \quad (7)$$

然后根据式 (8) 对式 (7) 产生的 y_{ik} 进行混沌变换:

$$z_{ik} = \begin{cases} 2y_{ik} & 0 \leq y_{ik} \leq 1/2 \\ 2(1 - y_{ik}) & 1/2 \leq y_{ik} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

将式 (8) 得到的 z_{ik} 采用公式 (9) 映射到原来空间, 从而得到新的 x_{ik} :

$$x_{ik} = a_k + z_{ik}(b_k - a_k) \quad (9)$$

当所有初始个体都采用上述混沌运动后获得 x_{ik} 后就获得了最终的初始种群。

2.4 抗体浓度计算

相似抗体越多, 越容易陷入局部最优, 因此, 需要对相似抗体进行抑制, 任意两个抗体 x_i 和 x_j 的相似程度可以通过计算抗体各基因位上对应的值相同的个数表示:

$$s(x_i, x_j) = \frac{|h | x_{ih} = x_{jh} \wedge h = 1, \dots, n |}{n} \quad (10)$$

式中, x_{ih} 和 x_{jh} 表示 x_i 和 x_j 两个抗体的第 h 位基因, n 为基因总数。

抗体的相似度可以表示为:

$$sim(x_i) = \frac{|count(j) | s(x_i, x_j) > r, \forall x_i \in A \wedge j \neq i |}{n} \quad (11)$$

从上式可以看出, 抗体 x_i 的抗体浓度可以通过计算与其相似度大于 r 的个体数量获得。

2.5 抗体和抗原之间的亲和度评价

抗体对抗原的匹配程度可以通过亲和度评价函数来评价, 即

解的优良程度可以通过亲和度函数值的大小进行评价, 亲和度函数值越大, 则候选解越优, 在达到相同的网络覆盖率的前提下, 工作节点数越少则调度方案越优, 同时在进化过程中, 抗体的浓度越低则解越优, 因此, 文中的亲和度评价函数可以描述为:

$$\begin{cases} f(x) = e^{1/f_1} + e^{sm(x)} \\ s.t. \forall g, Cov_g(x) \geq k \end{cases} \quad (12)$$

2.6 违约抗体突变

与传统的优化问题不同, 文中的节点调度模型加入了覆盖率约束因素, 因此在抗体的突变过程中, 可能产生违背约束的违约抗体, 因此需要对抗体进行修复, 即对其进行突变, 将其转换为可行抗体。

若抗体 x_i 对目标 g 的覆盖度为 u , $u \leq k$ 不能满足 k 重覆盖要求, 则计算其每个基因 x_{ij} ($1 \leq j \leq n$) 对目标点 g 的覆盖度, 即计算对总覆盖度的贡献率:

$$d_{ij} = \frac{cov(x_{ij})}{u} \quad (1 \leq j \leq n) \quad (13)$$

选择基因片中具有最小 d_{ij} 值的基因进行突变, 并判断其是否满足目标的 k 重覆盖要求, 如果满足, 则修复结束, 否则, 通过公式继续寻找次小贡献率的基因片对抗体进行突变。

3 算法描述

文中基于免疫遗传算法的节点调度过程可以描述内容如下。

初始化: 抗体种群规模为 M 的初始抗体, 抗体长度为传感器节点个数 P , 当前进化代数 $\lambda = 1$, 进化代数最大值 λ_{max} ;

步骤 1: 初始抗体生成。随机产生规模为 M 初始抗体, 并根据 3.3 所示的混沌运动即公式 (7)、公式 (8) 和公式 (9) 在初始抗体周围随机产生一组抗体, 形成最终的初始抗体集 $A_\lambda = \{Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_N\}$;

步骤 2: 抗体浓度和亲和度计算。首先根据公式 (10) 和 (11) 计算各抗体浓度, 以及各抗体对应的调度方案的工作节点数, 然后根据公式 (12) 并根据各抗体的亲和度。

步骤 3: 抗体克隆。在抗体克隆的过程中, 各抗体克隆的规模与其亲和度有关, 当抗体的亲和度越高, 则被克隆的数量越多, 可以通过下式计算:

$$pro(x_i) = \frac{e^{f(x_i)}}{\sum_{x_j \in A} e^{f(x_j)}} \quad (14)$$

步骤 4: 抗体突变。对克隆后的抗体群中的每个抗体判断是否满足覆盖度约束, 对不满足约束的抗体根据 3.6 进行突变, 从而将违约抗体突变为可行抗体。

步骤 5: 抗体多样化处理。根据公式 (10) 和 (11) 再次计算各抗体浓度, 对相似抗体采用混沌运动即公式 (7)、公式 (8) 和公式 (9) 进行多样化处理, 从而得到新一代抗体 $A_{\lambda+1} = \{Ab_1', Ab_2', \dots, Ab_N'\}$ 。

步骤 6: $\lambda = \lambda + 1$, 判断当前迭代次数 λ 是否达到最大值 λ_{max} ;

如果达到最大值, 则算法结束, 输出抗体集中最优解作为调度方案。

否则转入步骤 2 继续迭代。

4 仿真实验

在 MatLab 仿真环境下采用文中方法和文献 [10] 所示的节点调度进行仿真并进行比较, 监测区域为 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$, 各异构

传感器节点的能量为 (2, 5), 每个传感器节点的感知半径 R_i 的值为 (3, 6), 节点发送数据和接收数据采用的通信模型为:

$$E_{trans}(l, d) = \begin{cases} l * (E_{elec} + \epsilon_{imp} * d^2) & d < d_0 \\ l * (E_{elec} + \epsilon_{amp} * d^4) & d \geq d_0 \end{cases} \quad (15)$$

$$E_{rec} = l * E_{elec}$$

式中, $E_{trans}(l, d)$ 和 E_{rec} 分别表示数据传输和接收耗能, l 为数据包位数, E_{elec} 是无线收发电路耗能, ϵ_{imp} 、 ϵ_{amp} 和 d_0 分别表示自由空间模型、多路衰减模型功率放大电路功耗系数和两者分离的距离阈值。

文中参数设置如下: 传感器节点感知的不确定性误差 r_e 为 0.08, 感知范围为 $r - r_e$ 的感知质量衰减系数 λ 为 0.12, 感知范围为 $r + r_e$ 的感知质量衰减系数 σ 为 0.15, 迭代次数最大值 $\lambda_{max} = 200$, 传感器节点数为 200, 各节点的初始能量位于 (2, 5) 之间, 各节点的感知半径位于 (3, 6) 之间。

采用文中方法获得满足 K 覆盖的节点调度方案, 当 K 为 3 时, 在满足所有监测目标 3 重覆盖的情况下, 与文献 [10] 中方法在网络能耗和覆盖率方面进行比较, 得到的结果如图 1~2 所示。

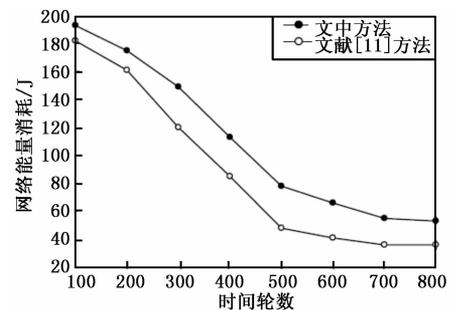


图 1 网络能耗对比

从图 1 中可以看出, 文中方法在整个网络运行期间消耗的能量远低于文献 [10] 中方法, 较文献 [10] 方法平均低 13.5%。

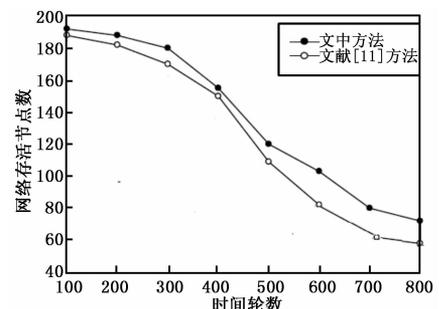


图 2 生命周期比较

从图 2 可以看出, 文中方法在迭代过程中, 其存活节点数远高于文献 [10] 方法, 较文献 [10] 方法的活动节点数平均多 7%, 显然这是因为文中方法能有效地对节点调度, 使得具有较多能量、感知能力强以及覆盖范围大的节点尽可能处于工作状态, 从而有效地减少工作节点数, 最终提高网络生命周期。

5 结语

免疫遗传算法是基于人工免疫算法和遗传算法而形成的一种优化算法, 具有收敛速度快、全局搜索能力强和鲁棒性强的优点。因此, 本文研究了基于免疫遗传算法实现监测区域 WSN 异构节点调度的算法, 首先, 建立了基于异构节点剩余

能量和感知能力的概率感知模型，在此基础上得到了调度的目标函数。然后设计了改进的免疫遗传算法实现对节点的调度优化。仿真实验证明文中方法能有效地实现监测区域目标的 K 重覆盖，且具有存活节点多和能耗少的优点。

参考文献:

[1] Peng D, Zhang Q Y. An energy efficient cluster-Routing protocol for wireless sensor networks [A]. Proceedings of the International Conference on Computer Design and Applications [C], Qinhuangdao, 2010: 2530 - 2533.
 [2] 凡高娟, 孙力娟, 王汝传, 等. 非均匀分布下无线传感器网络节点调度机制 [J]. 通信学报, 2011, 32 (3): 10 - 18.
 [3] Zhang G Q, Zhang Z L, Fan J X. A Locally adjustable Planar Structure for Adaptive Topology Control in Wireless Ad Hoc Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21 (10): 1387 - 1397.
 [4] 温俊, 蒋杰, 方力, 等. 异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法 [J]. 软件学报, 2010, 21 (9): 2304 - 2319.
 [5] 李小龙, 林亚平, 易叶青, 等. 传感器网络中基于虚拟坐标的节点调度方案 [J]. 软件学报, 2008, 19 (8): 2089 - 2101.
 [6] Xing X F, Wang G J, Wu J. Square Region-based Coverage and

Connectivity Probability Model in Wireless Sensor Networks [A]. Proc. of the 5th International Conference on Collaborative Computing [C], Washington D. C., 2009: 1 - 8.
 [7] 方关林, 李平. 一种能耗均衡的无线传感器网络覆盖协议 [J]. 计算机工程, 2011, 37 (8): 97 - 98.
 [7] Yen L H, Cheng Y M. Range-based sleep scheduling (RBSS) for wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2009, 48 (3): 411 - 423.
 [8] 王成, 樊建席, 王仁喜, 等. 基于 Voronoi 图的无线传感器网络 K 覆盖算法 [J]. 计算机工程, 2012, 38 (4): 84 - 87.
 [9] Younis O, Krunz M, Ramasubramanian S. Location unaware coverage in wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2008, 6 (7): 1078 - 1097.
 [10] 凡高娟, 孙力娟, 王汝传, 等. 非均匀分布下无线传感器网络节点调度机制 [J]. 通信学报, 2011, 32 (3): 10 - 17.
 [11] Yen L H, Cheng Y M. Range-based sleep scheduling (RBSS) for wireless sensor networks [J]. Wireless Personal Communications, 2009, 48 (3): 411 - 423.
 [12] 吕振, 安吉勇. 基于 Zigbee 无线传感器在居民供暖系统中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (5): 1372 - 1378.

(上接第 1532 页)

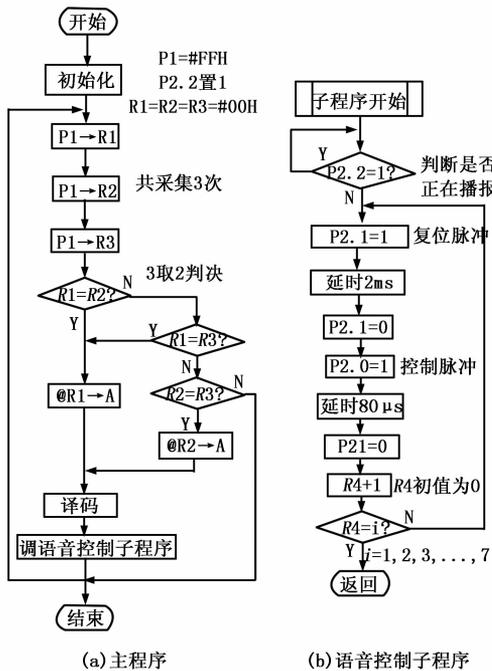


图 5 软件流程图

编码设计进行比较，用 TEK 公司的 TDS2024 示波器观察输出脉冲个数。现给出了其中一种违规情况的试验：即输入编码 20H 给控制单元的 P1 口，观察控制信号输出情况。把示波器设置为扫描时间 100 μ s/格，幅度 5 V/格，CH1 观察的 P1.5，CH2 观察的 P2.0，按示波器 RUN/STOP 键抓拍输出控制脉冲，待示波器停止扫描后，静止画面如图 6 所示，图中显示，CH1 为高电平，CH2 有 6 个脉冲，且宽度约为 80 μ s，满足语音芯片控制时间要求。

对照表 1，输出的 6 个控制脉冲，表示车体右侧违规，显然，控制单元判决与自动识别的结果与编码设计完全拟合。

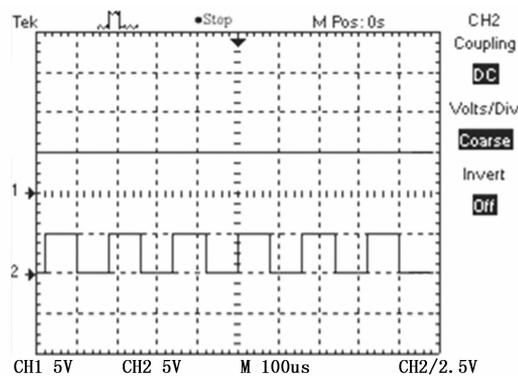


图 6 验证观察结果图

5 结论

论文介绍了便携式智能桩考训练装置的系统设计方案。重点介绍了系统实现的硬件电路实现与软件设计流程。并针对系统设计给出了核心部位即控制单元的验证试验，结果表明：设计方案正确，可用于部队大中型车辆桩考训练中，满足了受训人员在无人值守的条件下，全天候独立训练的要求，为部队遂行多样化任务提供有力保障。

参考文献:

[1] Compact Rectangular Inductive Prox. TL-Q/TL-G [Z]. OMRON Electronics LLC.
 [2] 王幸之, 王雷, 翟成, 等. 单片机应用系统抗干扰技术 [M]. 北京: 航天航空大学出版社, 1999.
 [3] 孙运全, 张华, 项伟, 等. 多参量汽车电动助力转向控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (9): 2471 - 2473.
 [4] Wu M S, Wu X M. Design of the Single-chip Microcomputer Experiment Teaching System for Application. Electrical and control Engineering [A]. 2011 International Conference on [C], 2011: 649 - 652.