

# 离散事件触发通信机制下 NCS 实验平台的构建

曹慧超 李 炜 申富媛 童 源

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院 甘肃 兰州 730050)

**摘 要** 目前离散事件触发通信机制 DETCS(Periodic time-triggered communication scheme) 下 NCS(Networked control system) 理论研究结果的验证仍限于单机下的 Matlab 仿真,尚无真实网络环境的引入;而传统基于周期时间触发通信机制的 NCS 实验平台,又缺少受控制需求驱动事件触发条件的约束。针对此问题,开发了 DETCS 下的虚拟 NCS 实验平台。该平台以校园局域网为通信媒介,采用 OPC 通信协议,结合西门子 S7-300PLC,首先实现了分离于 2 台 PC 机上的被控对象和控制器的通信;其次将离散事件触发条件引入被控对象输出端,借助 Matlab OPC 工具箱提供的 OPC 技术及软件组态方法实现了真实网络环境下基于 DETCS 的虚拟 NCS 平台的搭建。实验平台测试及结果分析表明,DETCS 的引入兼顾了 NCS 的控制性能和网络资源的节约,所搭建的平台能够为 DETCS 下的 NCS 理论研究提供有效的工程可用性验证平台。

**关键词** 离散事件触发 网络化控制系统 OPC 技术 实验平台

中图分类号 TP302.8 文献标识码 A DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2016.03.032

## CONSTRUCTING EXPERIMENT PLATFORM FOR VIRTUAL NCS UNDER DISCRETE EVENT-TRIGGERED COMMUNICATION SCHEME

Cao Huichao Li Wei Shen Fuyuan Tong Yuan

(College of Electrical and Information Engineering Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract** The verification of theoretical results of NCS based on discrete event-triggered communication scheme (DETCS) is still in a Matlab simulation environment which uses a single computer without introducing the real network environment, and the traditional NCS experiment platform under the periodic time-triggered communication scheme lacks the event-triggered condition constraints driven by control requirement. In view of this, we developed the experiment platform of virtual NCS under DETCS. On the platform, a campus LAN is selected as the communication medium, meanwhile, OPC communication protocol is adopted in combination with Siemens S7-300PLC, the platform first realises the communication between the plant and controller which is separated from two computers; Then, it introduces the discrete event-triggered condition into the plant output, furthermore, in virtue of the OPC technology, which is provided by Matlab OPC Toolbox, and the software configuration method, it realises the construction of virtual NCS platform based on DETCS under real network environment. Experiment platform test and results analysis showed that the introduction of DETCS could take the control performance of NCS and the saving of network resource into consideration simultaneously, and the constructed platform could provide effective engineering availability verification platform for theoretical research of NCS under DETCS.

**Keywords** Discrete event-triggered Networked control system (NCS) OPC technology Experiment platform

## 0 引 言

目前,网络化控制系统 NCS 以其独特优势在各个领域得到了广泛的应用,同时也因特殊的网络反馈通道所引出的许多问题受到了学术界的关注<sup>[1-4]</sup>。为验证一些理论研究结果的正确性和可用性,不少学者还搭建了不同类型的 NCS 仿真平台。文献[5]基于 Matlab 的 TrueTime 工具箱,开发了 NCS 综合仿真平台,实现了对控制系统与网络系统的联合仿真。文献[6]利用网络仿真软件 NS2 实现真实网络环境的模拟,利用 Java 网络接口模块连接 Matlab 仿真对象和 NS2 网络模块,设计并实现了 NCS 实时仿真平台。文献[7]也基于网络模拟器 NS2 设计了一种直流电机网络化控制系统仿真平台。文献[8]利用 OPC 技

术、PC 机以及 PLC 实现了服务器和客户端的网络通信,构建了 NCS 仿真平台。

但上述 NCS 仿真平台均基于周期时间触发通信机制 PT-TCS 所搭建。然而面对 NCS 中有限的网络带宽资源,PT-TCS 因未从控制的需求出发便按固定的周期传输信息,使得大量冗余数据的传输导致了网络通道的拥塞,也使得网络资源未被合理有效利用,因此如何更有效地利用网络带宽资源,并使系统达到理想的控制目标,逐渐成为 NCS 研究中的一个重要问题。近期一种信息量按需传输的离散事件触发通信机制 DETCS 下的

收稿日期:2014-07-29。国家自然科学基金项目(61364011);甘肃省自然科学基金项目(1308RJZA148)。曹慧超,博士生,主研领域:故障诊断与容错控制。李炜,教授。申富媛,讲师。童源,硕士生。

NCS 设计方法开始进入人们的视野<sup>[9]</sup>。DETCS 的引入,兼顾了系统的控制性能与网络资源的有效节约,展现出了突出的优势。但现有研究所得结论均采用单机下 Matlab 仿真来验证其有效性<sup>[10-11]</sup>,对于工程可用性的验证仍存在缺失。

因此,本文拟在真实的网络环境下,利用 OPC 标准化通信协议,借助西门子 Step 7、Simatic Net 及 Matlab 等软件,通过引入离散事件触发条件,搭建基于 DETCS 的 NCS 实验平台,以期为相应的理论结果寻求较为工程化的实验验证手段。

## 1 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台设计

DETCS 引入 NCS 后,使得网络资源得到了更为合理的利用,但同时其结构也随之发生了一定的变化,下面首先陈述 DETCS 下 NCS 的结构,然后给出相应实验平台的构建方案。

### 1.1 DETCS 下 NCS 的结构

DETCS 中数据传输是根据控制任务“按需”进行的,基于此机制的 NCS 结构如图 1 所示。

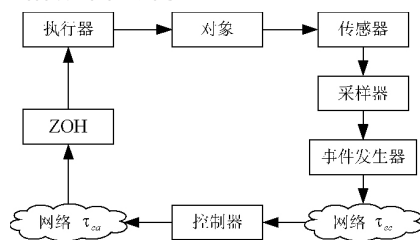


图1 DETCS 下 NCS 结构图

与传统的 PTCS 下 NCS 结构图不同的是,图 1 中在采样器后增加了“事件发生器”。其功能是根据事先设定的事件触发条件,对采样数据进行判断筛选,满足触发条件的采样信号则被传输给控制器,反之则不被传输。它的引入自然而然的结果就是数据的传输不再按固定的采样周期进行,而是按控制系统的需求变周期进行,从而节约网络资源。

### 1.2 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台的构建方案

依据 DETCS 下的 NCS 结构图 1 所示,开发相应的实验平台主要包括 3 部分工作:被控对象的虚拟和控制器设计、DETCS 的引入、通信网络及通信协议。

#### (1) 被控对象的虚拟和控制器设计

考虑到 Matlab/Simulink 环境具有强大数字运算能力、丰富的图形环境和大量成熟的控制工具箱,是解决系统建模和分析、研究和开发新的网络过程控制算法的首选,因此本平台分别采用 2 台装有 Matlab7.6 以上软件的 PC 机,分别虚拟被控对象并设计控制器,以使其具有模拟多种对象和实现不同控制算法的灵便性。若条件允许或需要时,还可将虚拟被控对象和控制器部分或全部替换为实体,构成半实体或全实体平台。

#### (2) DETCS 的引入

DETCS 是一种仅在采样时刻依据某种“事件”发生与否决定系统采样数据是否需要传输的通信机制。这种机制下,需要对被控对象输出的离散采样信息进行不断的分析判断,因此在平台搭建中最为直接的方法就是在虚拟对象模型后引入一个离散事件触发模块,来计算判断被控对象的采样信息是否需要被传输。考虑该模块的计算分析需要,可以采用 Matlab/Simulink 中 M-函数模块来实现。

#### (3) 通信网络及通信协议

搭建 NCS 实验平台,应尽可能地接近工程背景,其中真实

的网络环境是关键。考虑常用的 TrueTime 是依据网络 MAC 协议对网络时延等进行模拟<sup>[6]</sup>且仅适用于单级的网络拓扑,具有一定局限性;NS2 软件虽能模拟复杂网络环境<sup>[7-8]</sup>,但由于其采用 C++ 和 OTCL 程序语言搭建网络拓扑环结构,使得应用起来难度又较大。因此,为了使所搭建平台具有网络工程真实性的同时可操作性更强,本平台的构建选用校园局域网作为通信媒介。

当被控对象和控制器通过 Matlab/Simulink 中的模块组件实现于校园局域网中的两台不同 PC 机上后,二者之间的数据传递,则需要选择合适的通信协议。目前,采用服务器/客户端模式的 OPC 技术可按照标准化的方法解决软硬件之间数据交换问题,即客户端能够用一种标准的方法去访问任意厂商的 OPC 服务器程序<sup>[12]</sup>,且 Matlab 中已具有专门的 OPC 工具箱,所以,本平台搭建中采用数据传送性能高、开发成本低、可靠性高的 OPC 作为通信协议。

#### (4) DETCS 下 NCS 实验平台的结构

综上所述,DETCS 下虚拟 NCS 实验平台的实现选用 OPC 通信协议,以西门子 S7-300 PLC 作为 OPC 服务器,2 台装有 Matlab7.6 以上软件的 PC 作为 2 个 OPC 客户端,分别虚拟被控对象和控制器,以校园局域网为通信媒介,借助 Matlab 中 OPC Toolbox 工具箱提供的相应 OPC 技术实现 OPC 服务器与客户端的网络通信。需要强调的是,为实现 DETCS 所引入的离散事件触发模块被置于被控对象之后,且与其同在一个 PC 机的 Matlab/Simulink 中实现。该模块便可判断受控对象输出采样数据是否需要传输,满足条件被传输的采样数据最终将通过 PLC 数据通道传给控制器。平台的整体拓扑结构如图 2 所示。

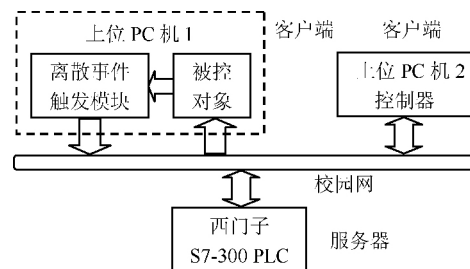


图2 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台拓扑结构

## 2 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台的实现

DETCS 下的虚拟 NCS 实验平台实际为 PTCS 下 NCS 实验平台基础之上的改建,因此首先应搭建 PTCS 下的 NCS 实验平台。其硬件设备有 2 台 PC 机、西门子 S7-300 PLC (CP 313C)、以太网通信模块 (CP 343-1 Lean)、IE 通用模块 (IE\_CP);软件除 Matlab 外,还包括西门子编程软件 Step7 V5.5 和西门子网络通信软件 Simatic Net V6.0。

### 2.1 PTCS 下虚拟 NCS 实验平台组态

#### (1) 配置 PC 站

在 Simatic Net 软件 Station Configuration Editor 窗口中 1 号槽插入 OPC Server,3 号槽插入 IE General,并分别进行网卡配置和站点命名。

#### (2) PLC 硬件组态

在 Step 7 软件 SIMATIC Manager 中创建一个新工程,依次组态 PC 站和 Simatic 300 站,即在硬件库中选取实际设备中的相应硬件型号,并设置各个模块属性,然后编译保存。

(3) 网络配置

点击 Configure Network 按钮进行网络配置,设置 PG/PC 接口后,进行组态下载,下载成功后,Station Configuration Editor 窗口中组件状态显示运行成功、连接激活。

2.2 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台搭建

基于 DETCS 的虚拟 NCS 实验平台中,系统输出的采样数据采用“按需求”(需求也即“离散事件触发条件”)的传输方式,其实现必须借助于软件组态的有效编程方可实现从 PTTCS 向 DETCS 的转换。下面具体陈述 DETCS 实现方法和相应的软件组态。

(1) DETCS 具体实现方法

PTTCS 下 NCS 实验平台中,采样数据均按其固有周期通过网络被传输,这未能满足 DETCS 的要求,使得不满足离散事件触发条件的采样数据也被传输,所以如何实现信息按需求传输成为关键。

考虑到实际中一旦对 OPC 进行相应工作属性的初始化后,OPC 便以固有频率刷新,即便不满足触发条件的采样信息也会被 OPC 以固定周期刷新,并通过网络传输送入 PLC,尽管可以通过 Matlab 中 shut down 语句关闭 OPC 的通信,停止对不满足触发条件的数据的传输,但此时也无数据送入 PLC,整个系统是开路的,为了解决此问题,引入了“0”数据包的概念。即当系统采样数据满足离散事件触发条件时,则将此采样数据直接写入 OPC Write 模块并通过网络传输送入 PLC,最终送至控制器端的 OPC Read 模块,此过程中还需要将当前满足触发条件的采样数据值缓存至另外一个中间寄存器,如 MREAL190 中;若不满足,则写入 OPC Write 模块并通过网络传输至 PLC 的是为“0”的数据包,而当 PLC 读到数值“0”时,将上一个满足离散事件触发条件的数值,即 MREAL190 中的值返回给控制器端的 OPC Read 模块。

从数据包大小的层面来讲,“0”数据包在传输时占用的网络资源较实际传输的真实值所占用的资源要少很多<sup>[13]</sup>,所以采用此方法实现 DETCS,从一定程度上节约了网络资源。DETCS 下 NCS 实验平台的工作流程如图 3 所示。

(2) 软件组态

虽然现有 Matlab 7.0 以上的软件中集成了 OPC 工具箱,即一个 OPC 客户端数据访问软件,使得通过 OPC 工具箱连接任何一个 OPC 数据服务器,实现对连接的 OPC 数据服务器的读或写。但是固有的 OPC Read 模块和 OPC Write 模块中 item 的“Active”属性为“on”,且不可改动,即 item 按照固有刷新速率去更新数据。而通常情况下 OPC 的刷新周期远大于 Matlab 中所组建的仿真系统的运行周期,这导致了异步问题的出现。为了实现 OPC 扫描周期与 Matlab 中仿真系统的同步运行,通过编写程序生成“Active”属性可改动的 OPC Read 与 OPC Write 模块。OPC Read 模块程序如下:

```
da = opcdca('localhost','OPC.SimaticNET'); % 确认本地 OPC 服务器
```

```
connect(da); % 连接服务器
grp1 = addgroup(da,'OPC Read'); % 添加组并命名
itm1 = additem(grp1,'S7:[S7 connection_1]MREAL80');
% 在组中添加项目 1
r = read(itm1) % 读取项目 1 中的值
itm1.Active = "off"; % 关闭项目 1 的激活属性
blkPath = gensread(grp1); % 生成 itm1 中 Active 属性为 off 的 OPC Read 模块
```

执行完上述程序,构造出的新 OPC Read 模块中 Active 属性中则被改为 off,此刻只有当读指令发送时,item 的数据才会被更新,解决了 OPC Read 模块刷新频率与 Matlab 中仿真系统运行同步的问题。同理可构造 Active 属性可修改为 off 的 OPC Write 模块,此处不在赘述。

(3) DETCS 下虚拟 NCS 实验平台的搭建

为了说明平台的搭建过程,NCS 中受控对象这里采用典型的惯性环节(亦可为其他任何复杂系统模型),置于其后的离散事件触发模块中触发条件如下<sup>[11]</sup>:

$$e^T(i_k h) V e(i_k h) \geq \delta_1 y^T(i_k h) V y(i_k h) \quad (1)$$

$$\|y(i_k h)\| \geq \delta_2 > 0 \quad (2)$$

其中:  $V$  是正定的权矩阵;  $\delta_1 > 0$   $\delta_2 > 0$  为给定的标量参数,与系统的期望性能指标有关;  $e(i_k h)$  表示当前采样时刻  $i_k h$  与最近数据传输时刻  $t_k h$  的数据差,即:

$$e(i_k h) = y(i_k h) - y(t_k h) \quad (3)$$

控制器采用经典 PID 控制,则在两台 PC 机中利用 Matlab/Simulink 分别构建 NCS 系统的被控对象与离散事件触发条件模块、以及控制器,分别作为 OPC 的客户端,其连接如图 4、图 5 所示。

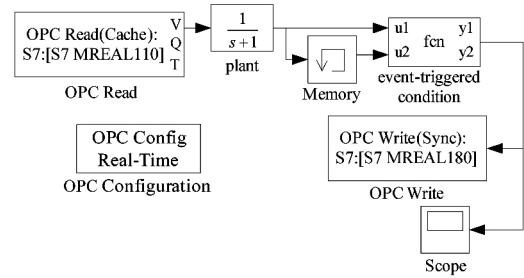


图 4 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台被控对象连接图

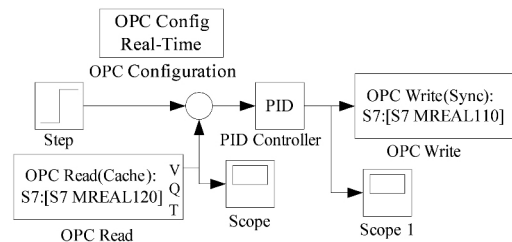


图 5 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台控制器连接图

依据 DETCS 具体实现方法中的描述,上述平台搭建中需将满足离散事件触发条件的采样数据缓存于另外一个中间寄存器。结合图 4 和图 5 所示,当对象模型的采样数据经过事件触发模块判断之后,满足触发条件的当前采样数据写入 MREAL180,同时将此值写入另一中间寄存器 MREAL190,然后控制器客户端 MREAL120 读取 MREAL180 中的数值,并与设定输入作比较,偏差作为控制器输入量,控制器的输出写入 MREAL110;若受控对象采样数据不满足触发条件,则控制器客户端

MREAL120 读取存储于 MREAL190 中的数据,即上一个时刻满足触发条件的数据。

### 3 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台测试分析

#### 3.1 测试实验

DETCS 下虚拟 NCS 实验平台的测试主要包括:

① 引入 DETCS(1 2) 后搭建的虚拟 NCS 实验平台是否能有效节约网络资源;

② 该平台能否做到网络资源节约与系统性能的折衷平衡。

为便于实验分析,这里以 2.2 节式(3)中的系统为例,其中惯性环节时间常数取 1 s; PID 控制器参数采用扩充临界比例法整定  $K_p = 0.4$ ,  $K_I = 0.195$ ; 离散事件触发条件中触发参数选取  $\delta_1 = 0.6$ ,  $\delta_2 = 0.99$ 、触发权矩阵  $V = I$ , 依据式(1)、式(2)利用 M-函数编写图 4 中的离散事件触发模块,并取采样周期  $h = 0.1$  s。

实验 1 为考察引入 DETCS 后 NCS 节约网络通信资源的状况,采用单位阶跃响应实验进行测试,并与相同条件下基于 PTCS 的 NCS 实验平台所得响应曲线进行比较,如图 6 所示,离散事件触发 NCS 数据实际传输时刻和传输间隔如图 7 所示。

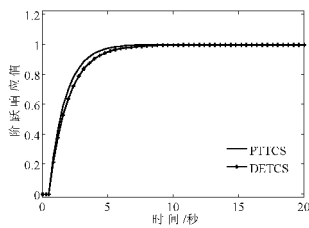


图 6 系统响应曲线

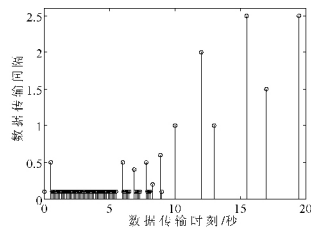


图 7 DETCS 下 NCS 数据传输时刻与传输间隔

表 1 给出了控制时段为 20 s 时,分别采用基于 DETCS、PTCS 的 NCS 实验平台进行仿真所得相关参变量的综合比较。

其中:  $n$  表示实际数据传输量,  $\bar{h}$  表示平均传输周期,  $\gamma_{e/t}$  表示数据传输率。

表 1 不同通讯机制下相关指标综合比较

机制	$n$	$\bar{h}$	$\gamma_{e/t}$
DETCS 下实验平台	76	0.263	38%
PTCS 下实验平台	200	0.1	100%

实验 2 为进一步分析 DETCS 引入后,不同触发参数对网络资源节约及系统性能的影响,分别改变  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , 反复进行实验得到如表 2、表 3 的结果,其中采样周期  $h = 0.1$  s, 控制时段仍取 20 s。其中:  $e_{ss}$  表示稳态误差。

表 2  $\delta_2 = 0.99$  不同触发参数  $\delta_1$  下的相关量比较

$\delta_1$	$n$	$\bar{h}$	$\gamma_{e/t}$	$e_{ss}$
0.4	127	0.157	63.5%	0.01
0.5	92	0.217	46%	0.01
0.6	76	0.263	38%	0.01
0.7	58	0.345	29%	0.01
0.8	52	0.385	26%	0.01

表 3  $\delta_1 = 0.6$  不同触发参数  $\delta_2$  下的相关量比较

$\delta_2$	$n$	$\bar{h}$	$\gamma_{e/t}$	$e_{ss}$
0.995	94	0.213	47%	0.005
0.99	83	0.241	41.5%	0.01
0.98	76	0.263	38%	0.02
0.97	73	0.274	36.5%	0.03

#### 3.2 结果分析

① 从单位阶跃响应实验 1 所得曲线图 6 中看出,DETCS 下 NCS 的响应曲线略慢于 PTCS 下的,但最终趋于稳态值 1,有良好的控制性能;结合图 7 还可看出,当阶跃响应曲线趋于 1 附近后,离散事件触发条件满足的机率减少,传输数据在 8.3 s 后变得稀疏,数据传输量较暂态过程明显减少;从表 1 中也能看到,20 s 控制时段内,DETCS 较 PTCS 的结果而言,系统实际数据传输量、数据传输率都明显减少,平均传输周期增大。这些均表明 DETCS 下虚拟 NCS 实验平台,在满足系统控制性能的同时,能够有效地减少网络通信负载,使得网络资源得到了适度利用。

② 从实验 2 所得表 2、表 3 中可直观地看出,在给定的 20 s 控制时段内,随着触发参数  $\delta_1$  或  $\delta_2$  的不断增大,更多的网络通信资源被节省;但触发参数引入并增大的同时,稳态误差  $e_{ss}$  随之出现并逐渐增大,这说明网络资源的节约是以牺牲系统性能为代价的。因此,在实际应用中,当系统控制性能要求较高时,需减小触发参数数值、适当增加传输数据量;反之若希望节省出更多带宽资源时,则可增大触发参数,减少数据传输量,适度降低系统性能要求。由此看来,采用 DETCS 下的 NCS 实验平台,完全可以依据需求,合理选择离散事件触发参变量,折衷平衡系统性能与网络资源的节约。

### 4 结 语

本文利用 OPC 和 Matlab 技术,采用西门子 S7-300PLC 及 PC 机,在真实网络环境下,构建了基于 DETCS 的虚拟 NCS 实验平台,为目前基于 DETCS 的 NCS 理论研究提供了实验途径。通过实验平台的测试分析表明,所述的平台搭建方法是可行的,而且基于所搭建的 DETCS 下的虚拟 NCS 实验平台能够实现网络资源的有效节约,同时可依据实际应用需求,合理选择触发参数实现网络资源节约与系统性能的折衷平衡。

#### 参 考 文 献

[1] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2007, 95(1): 138-162.

[2] Heemels W P M, Teel A R, Wouw N, et al. Networked control systems with communication constraints: tradeoffs between sampling intervals, delays and performance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(8): 1781-1796.

[3] Donkers M C F, Heemels W P M H, Bernardini D, et al. Stability analysis of stochastic networked control systems [J]. Automatica, 2012, 48(5): 917-925.

[4] Li Peiran, Bao Zhejing, Yang Qiang, et al.  $H_\infty$  control synthesis for lurie networked control systems with multiple delays based on the non-uniform characteristic [J]. Asian Journal of Control, 2013, 15(4): 1112-1123.

(下转第 171 页)

验说明四阶多项式插值法的效果好于抛物线插值法。

### 3.4 定位算法的对比实验

为了比较第2节中几何位置定位法和本文给出的定位方法(以下分别简称为算法1和算法2)的效果,进行以下实验:将声源放置在方位角为 $270^\circ$ ,距离为3 m的位置,进行38次实验。在每一次实验中,首先采集声源信号,再进行小波去噪,加窗分帧,时延估计等操作,最后分别使用算法1和算法2得到各自的声源位置估计。分别统计采用算法1和算法2的情况下,方位角估计和距离估计的成功率、平均值和平均误差,实验结果如表2所示。

表2 算法1和算法2的对比结果

	方位角( $^\circ$ )			距离(m)		
	成功率	平均值	平均误差	成功率	平均值	平均误差
算法1	38/38	269.83	0.22	38/38	2.96	0.08
算法2	37/38	269.82	0.23	37/38	3.17	0.17

从表2中可看出,使用算法1进行声源定位的成功率和精度明显优于算法2,声源距离估计的平均误差减小了52.9%。

## 4 结 语

本文实现了一个基于四元十字阵的声源定位系统。在实现过程中,首先使用小波去噪算法对语音信号进行预处理,再使用抗干扰能力较强的自适应特征值分解算法进行时延估计,并给出了时延值筛选算法,用于剔除错误的时延值。在抛物线插值的基础上,给出了四阶多项式插值法,最后给出了基于时延值冗余的声源定位算法,估计声源的方位角和距离。

实验结果表明,本定位系统对声源方位角的估计能达到超过70%的成功率,平均误差小于 $5^\circ$ ;当声源在 $45^\circ$ 、 $135^\circ$ 、 $225^\circ$ 和 $315^\circ$ 方向时,声源距离估计存在奇点,当声源方位角与X、Y轴的夹角不超过 $15^\circ$ 且声源距离不超过2.5 m时,声源距离估计的成功率达到50%以上。

在时延值插值的对比实验中,通过四阶多项式插值法得到的时延估计平均误差比抛物线插值法小8.9%;在定位算法的对比实验中,通过本文给出的定位算法得到的距离估计平均误差比几何位置定位法小52.9%。在后续的研究中将致力于提高声源距离估计的精度,减小声源实际距离和方位角对距离估计的影响。

## 参 考 文 献

[1] Kotus J, Lopatka K, Czyzewski A. Detection and localization of selected acoustic events in acoustic field for smart surveillance applications[J]. *Multimedia Tools and Applications* 2014, 68(1): 5-21.

[2] Zhong X, Wang S, Dorman M, et al. Sound source localization from tactile aids for unilateral cochlear implant users[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2013, 134(5): 4062.

[3] 裴少雄. 基于DSP的声响枪袭定位系统研究[D]. 南京理工大学 2014.

[4] 张西爽. 超音速子弹声源定位算法的研究与设计[D]. 北京交通大学 2013.

[5] Hahn W, Tretter S. Optimum processing for delay-vector estimation in passive signal arrays[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*,

1973, 19(5): 608-614.

[6] Knapp C, Carter G C. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1976, 24(4): 320-327.

[7] Wang H, Kaveh M. Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide-band source[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 1985, 33(4): 823-831.

[8] Pourmohammad A, Ahadi S M. Real time high accuracy 3-D PHAT-based sound source localization using a simple 4-microphone arrangement[J]. *Systems Journal, IEEE* 2012, 6(3): 455-468.

[9] Pertilä P. Acoustic source localization in a room environment and at moderate distances[D]. Tampere University of Technology 2009.

[10] Yan H, Zhang Y, Yang Q. Time-Delay Estimation Based on Cross-Correlation and Wavelet Denoising[C]//Proceedings of 2013 Chinese Intelligent Automation Conference. Springer Berlin Heidelberg, 2013: 841-848.

[11] Chen J, Benesty J, Huang Y A. Time delay estimation in room acoustic environments: an overview[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2006: 1-19.

[12] Benesty J. Adaptive eigenvalue decomposition algorithm for passive acoustic source localization[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2000, 107(1): 384-391.

[13] 赵圣, 崔牧凡, 尤磊, 等. 基于小型麦克风阵列的声源定位技术[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版* 2013, 41(S1): 188-191.

[14] 周峰. 室内麦克风阵列声源定位算法研究和实现[D]. 复旦大学 2009.

[15] Linan Z, Peng Y, Hao S, et al. Sound source target localization system of mobile robot[C]//Singapore: 11th IEEE International Conference on Control Automation Robotics & Vision 2010: 2289-2294.

(上接第146页)

[5] 康军, 牛云. 网络化控制系统综合仿真平台设计[J]. *系统仿真学报* 2011, 23(9): 1842-1847.

[6] 王庆凤, 陈虹, 王萍. 基于NS2的网络控制系统仿真平台的设计与实现[J]. *系统仿真学报* 2011, 23(2): 270-274.

[7] 高远, 江明, 葛愿. 基于NS2的直流电机网络化控制系统仿真[J]. *计算机工程与应用* 2013, 49(21): 83-86.

[8] 李二超, 李炜, 李战明, 等. 基于OPC技术的网络控制系统仿真平台设计[J]. *实验技术与管理* 2012, 29(6): 90-93.

[9] Yue Dong, Tian Engang, Han Qinglong. A delay system method to design of event-triggered control of networked control systems[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control 2011: 1688-1673.

[10] Hu Songlin, Yin Xiuxia, Zhang Yunning, et al. Event-triggered guaranteed cost control for uncertain discrete-time networked control systems with time-varying transmission delays[J]. *IET Control Theory and Applications* 2012, 6(18): 2793-2804.

[11] Peng Chen, Han Qinglong, Yue Dong. To Transmit or not to transmit: a discrete event-triggered communication scheme for networked Takagi-Sugeno fuzzy systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2013, 21(1): 164-170.

[12] 陆会明, 朱耀春. 控制装置标准化通讯[M]. 北京: 机械工业出版社 2010.

[13] 载伊, 麦克唐纳, 鲁菲. 思科网络技术学院教程 CCNA Exploration: 网络基础知识[M]. 北京: 人民邮电出版社 2009.