

# 多机航空电子网络架构与评价方法的研究

## Research on Architecture and Evaluation of Multi-Aircraft Avionics Network

蒲小勃<sup>1</sup>, 李燕<sup>2</sup>, 徐杨<sup>2</sup>, 王月星<sup>1</sup>

(1. 成都飞机设计研究所航空电子研究室, 成都 610041;

2. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 成都 611731)



蒲小勃

教授, 自然科学研究员。1982 年获南京航空航天大学学士学位, 2007 年获北京航空航天大学博士学位。现任中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所副所长, 副总设计师, 西北工业大学、南京航空航天大学等兼职教授, 中国航空研究院博士生导师。长期从事航空电子系统技术研究工作, 历经多个型号工程研制并取得突出成就, 是国家突出贡献专家和中航工业航空电子系统首席专家。在航空电子系统设计、计算机与网络、座舱显示与控制、传感器综合、仿真评估与综合等方面开展了大量研究工作, 荣获多项国家和省部级科技成果奖。1996 年获国务院政府特殊津贴。

## 0 引言

在现代战争中, 多飞行器协同任务已成为获取战争空天主导权的必要手段<sup>[1]</sup>。多飞行器协同作战的新概念<sup>[2]</sup>随之被提出, 美国空军科学顾问委员会也指出, 飞行器应当以集群的方式执行任务而不是单独行动, 多飞行器协同作战能提高作战效率, 并且对战场环境更具有适应性, 作战代价最小<sup>[3-5]</sup>。多飞行器

针对多飞行器协同作战中关键交互技术需求, 以协同任务为驱动提出设备级多机航空电子网络架构。在该架构中, 通过改进的拍卖式快速任务规划算法可以完成任务与承担飞行器的匹配, 因此, 可将飞行器间的协同交互代价转换成机载设备间的交互代价。其次, 以交互通信代价目标函数为依据, 提出基于协同任务的航空电子网络服务质量的评价方法。系统仿真结果表明了该架构以及评价方法的简洁性, 在反映多飞行器协同作战实质的同时, 也对网络质量进行了合理的评估。

关键词: 多飞行器; 航空电子网络; 网络质量评价; 协同作战

中图分类号: V247.5

文章编号: 1671-637X(2015)01-0001-05

之间通过无线网络进行高度的信息共享以及资源的优化调度, 以分工合作的方式完成一个(或多个)共同目标<sup>[6]</sup>, 可产生远超出一架飞行器单独完成任务时的效果。

然而, 在现有的航空电子体系结构中都是以飞行器为研究单位, 无法体现协同作战的实质, 即机载设备之间的协同。通过对多飞行器协同通信过程中的机间无线网络特性, 以及机内设备间有线网络特性的研究, 提出设备级航空电子网络架构, 以及以通信代价目标函数为依据, 对多机协同任务的网络结构进行评价, 并选择出最优的任务资源分配方案。

## 1 设备级多机航空电子网络系统

### 1.1 多机协同任务网络化需求分析

现代战场环境多样、任务复杂, 要求多飞行器之间根据任务的相关性形成飞行团队进行协同作战。团队中的每个飞行器都会配备大量不同类型、不同功能的机载设备, 也就

是航空电子系统设备具有异构性的特征。同时, 某些飞行器需要同时参与多个任务的协同, 而一个任务同样也可能需要跨机协作。因此, 在协同过程中, 飞行器间需要通过频繁的通信以共享机载设备的信息, 传递任务的相关信息, 从而形成飞行器间的通信网络以提高任务的执行效率。

现有的航空电子系统具有高带宽、低时延、高稳定性等特点, 因此, 机内数据通信往往具有较高的传输速率, 且由于整套航空电子系统集成度很高, 从而使机内网络的稳定性与准确性从根本上得到保证。例如, FC-AE-1553 光纤总线, 其带宽能够达到 1 Gb, 传输速度快, 带宽高, 而飞行器之间所使用的无线网络带宽却只有几十兆, 由此可见, 飞行器内部高速数据网络与飞行器间低速无线网络等方面存在明显的差异。此外, 位于同一飞行器内的设备通信是不用考虑飞行器间距离、航向等外部因素的, 因此在同一飞行器内, 通信所需的代价是很小的, 与飞行器间的无线通信代价相比, 几乎可以忽略不计。

总的来说,飞行器机内高速数据网络相对于机外无线网络具有带宽高、时延小、机内设备协同性好的特性,飞行器间协同瓶颈在于机外无线网络。

考虑机内高速数据网络协议与飞行器间无线网络协议的差别,机内高速数据网络协议的数据包不可能直接在飞行器间无线网络中直接传输,因此,机内高速数据网络中的数据包需要经过飞行器内部的机载网络适配器进行打包,封装成为无线网络数据包后,才能在飞行器间无线网络中进行传输。网络数据包的传输过程如图1所示。

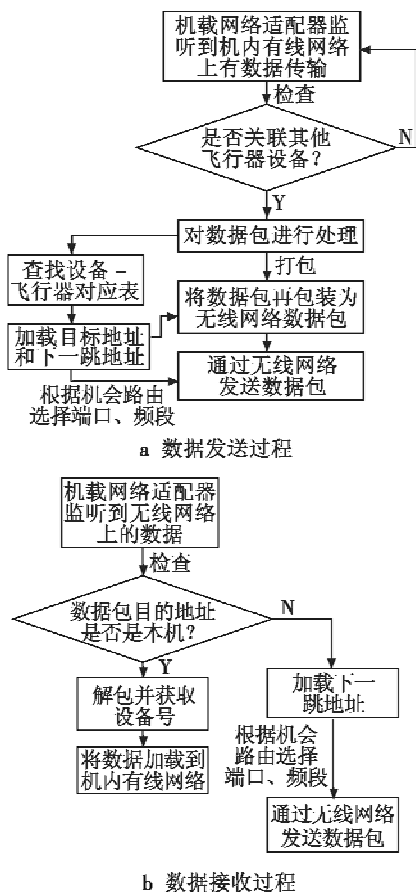


图1 机间数据传输过程

Fig. 1 Data transmission process between planes

当飞行器中的机载网络适配器监听到从机内高速数据网络中其他设备发出的数据包之后,首先对数据包进行检测,并确定发送数据包的目的地是本机内部设备还是其他飞行器的设备。如果数据包是发往

本机内部设备的,则可以直达目的设备;如果数据包是发往其他飞行器设备的,那么机载网络适配器首先对数据包进行处理,由于数据包不能直接在无线网络中传输,机载网络适配器必须对数据包进行打包等处理流程,再通过无线网络进行发送或转发。而考虑到多飞行器系统中异构性差异,这种传统的多跳路由式信息传递机制若面向未来高速多机协同作战的应用,其大宗的数据包会直接占用有限的无线通信资源,使整个系统执行效率降低。

通过对现有作战应用领域的研究发现,典型的多机航空电子网络系统可以依据体系结构划分为飞行器间基于无线连接的航空电子网络和单机内航空电子网络两个主要部分。由于任务的最终实现者是飞行器内的机载设备,所以飞行器间基于任务的协同,在本质上是各飞行器内部参与任务的航空电子设备之间的协同。在协同的过程中,位于同一飞行器的设备会通过机内的有线网络通信,而跨机设备需要通过飞行器间形成的无线网络进行协作。网络体系如图2所示,执行相同任务的机载设备具有同一颜色。

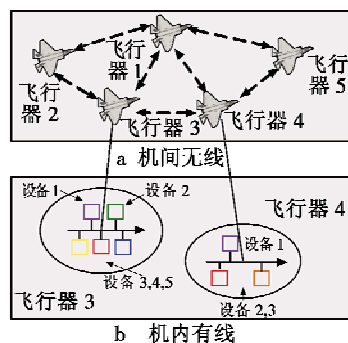


图2 多机航空电子网络系统

Fig. 2 Avionics network of multiple aircrafts

在协同任务中不仅各个飞行器通过网络进行协同,飞行器间的机载设备也同样需要通过网络进行通信协同,因此,网络的构建对协同作战具有极其重要的作用。为了更加直观地表示这种设备级协同作战通

信的实质,在现有的多机航空电子网络系统基础上,提出设备级多机航空电子网络架构。

### 1.2 设备级多机航空电子网络架构设计

通过1.1节的分析可知,多机任务协同的实质是设备间的协同。此外,通过研究发现,在通常状态下协同任务相对独立,即执行不同任务的设备网络间数据交换的需求不高,而同一协同任务内的设备间需要紧密的数据交换以完成任务同步机制和传感器信息融合等。基于以上需求,通过对飞行器间无线网络以及飞行器内部设备间有线网络的研究,抽象成设备间的网络连接,从而提出设备级多机航空电子网络架构。

在设备级多机航空电子网络中,所有机载设备将会被抽象成网络中的节点,节点之间的连线表示两个设备之间正在进行通信,而连接边上的权重表示两个节点通信所需的代价。由于在协同任务中飞行器间会进行相互的通信,所以从逻辑上来说,此网络上的所有节点之间也都可以进行通信。但是由于设备间的通信也是基于任务的,不同的任务需要不同的设备协作完成,只有当面对协同任务时,设备之间才会发起通信,各个设备会根据各自任务的关联性相互通信从而形成一个小的通信子网。如图3所示,虚线表示逻辑上所有节点都可以进行通信,而实际进行通信的节点之间用实线表示,边上的权重表示所需代价,由此可以看出,基于不同的任务,整个联通网中可以划分出来不同的任务子网。

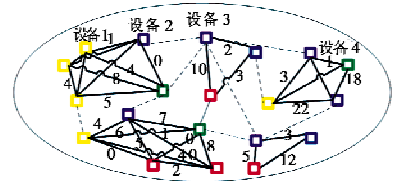


图3 设备级多机航空电子网络

Fig. 3 Device-level avionics network

## 2 基于任务的多机协同优化方法

### 2.1 基于拍卖的多机协同任务规划算法

在处理动态环境下小规模多飞行器的协同资源分配问题时,拍卖算法对于动态变化及不确定环境具有较强的鲁棒性,且能够有效利用系统中各飞行器关联关系进行分配。基于拍卖算法的这些特点,本文将多智能体系统中的拍卖算法应用于多飞行器协同资源分配问题中,提高救援多飞行器团队协作效率。资源问题是指在满足系统约束的条件下,根据给定的任务、目标和相应的性能评价机制,将系统中各项资源合理地分配至飞行器,充分利用系统中的资源和飞行器特性,实现整个系统的效益最大化,由3部分组成:需要分配的资源,可接受资源的飞行器以及相应的分配规则。在多飞行器救援中,资源分配的核心问题是将系统中存在的 $M$ 个可用资源合理地分配给 $N$ 个任务使用,在最大化整个系统效益的同时满足其动态性、实时性等要求。

本文在传统拍卖算法<sup>[7]</sup>的基础上进行改进,问题模型描述如下: $A_n = \langle T, R, V, U, C, H \rangle$ 。其中: $T$ 为系统任务集合(task),包括各种需要执行的任务序列; $R$ 为可用满足任务执行的系统竞拍资源集合(resource); $V$ 为参与任务的飞行器集合(bidder),由侦察机、攻击机等组成; $U$ 为效益集合(utility),即飞行器完成任务可获得的效益值; $C$ 为完成某项任务所消耗的代价(cost); $H$ 为竞拍函数 $H(p, b)$ ,其中, $p(t)$ 和 $b(t)$ 分别定义竞拍的配置与竞价规则,定义每个竞拍飞行器竞价 $v_i = [a_i, b_i]$ ,则其竞价期望效用函数 $U_i$ 可表示为

$$U(\hat{T}) = \sum_{i \in m} E_{v_i} \{ p_i(r_i, v_i) v_i - b_i(r_i, v_i) \} = (1 - \sum_{i=1}^n \int_{v_i}^{\infty} \bar{p}_i(r_i,$$

$$v_i) f_i(v_i) dv_i) v_0) + \sum_{i=1}^n \int_{v_i}^{\infty} \bar{b}_i(r_i, v_i) f_i(v_i) dv_i \quad (1)$$

式中: $f(\cdot)$ 表示竞拍机对其他竞拍者的竞价估计概率密度函数; $v_i$ 表示自己的竞价; $r_i$ 表示准备竞价。在协同任务拍卖模型中,竞拍者目标是要实现最大的竞拍效用,其竞拍过程必须满足两个基本约束:

1) 竞拍者参与竞拍,所出竞价不得高于其竞拍的基本机会成本,即竞拍过程必须满足参与竞拍者的基本理性约束;

2) 竞拍者必须获得足够的资源以支持其竞拍所得任务的执行,即系统的拍卖机制必须满足资源相容性约束,即竞拍者获得任务时所获得的资源至少与任务所需资源一致。

整个拍卖流程描述如下:当 $V$ 中若干飞行器发现任务 $T$ 中若干子任务可被接受,则 $V$ 成为拍卖者,拍卖算法框架启动一个子拍卖市场,启动拍卖任务;然后各飞行器基于自身的认知模型对承接任务 $T$ 进行评估,计算完成任务 $T_i$ 需要的资源量,并向其他飞行器公布拍卖信息;由于需要在实时环境中快速地进行任务分配,因此规定一轮拍卖的时限,当一轮拍卖结束时(即达到拍卖时限),拍卖代理根据竞标情况选择出价最高的 $m$ 个飞行器为竞标成功,竞拍成功飞行器执行相应任务,竞拍结束。

### 2.2 设备级多机航空电子网络链路模型

设备级的航空网络中的节点代表设备,节点连线的权重代表通信的代价,但是各个设备之间通信链路状况不同。根据设备所在飞行器的情况将设备间通信链路状况分为两种情况:

1) 2个设备均处于同一飞行器内,此时它们之间为有线连接;

2) 通信的2个设备处于不同的2个飞行器内,此时2个设备需要借助机间的无线通信网络进行通信。

因此,设备间通信链路质量的评价方法转化为飞行器间通信与机内通信链路之间的通信代价。飞行器间的无线网络链路带宽有限,拓扑结构不稳定,网络延时,飞行器的飞行航向,以及飞行器的距离对通信也有很大影响。综合考虑,飞行器网络连接主要包含通信介质、航向、雷达半径、雷达角度、机间距离5个因素。

由于飞行器内有线通信不论在速度还是延迟上都大大优越于机间的无线通信,设备之间的通信瓶颈主要在于所属飞行器机间无线网络的带宽限制。因此在本文中,通过对飞行器间的无线传输代价建模,从而获得设备之间的协同交互代价。具体数学表示如下所述。

定义协同多飞行器系统: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ ,包含 $n$ 架飞行器,而整个飞行器系统设备集合为 $R = \{Res_1^V, \dots, Res_j^V, \dots, Res_n^V\}$ ,其中, $Res_j^V$ 表示第 $j$ 号设备属于飞行器 $V_i$ 。对于飞行器间的通信代价为

$$con(V_i, V_j) = \lambda \cdot M + \alpha \cdot R + \beta \cdot D + \delta \cdot r + \eta \cdot A \quad (2)$$

式中: $M, R, D, r, A$ 分别代表通信介质、机间距离、航向、雷达半径、雷达角度;对应的 $\lambda, \alpha, \beta, \delta, \eta$ 依次代表上述的5个因素对通信的影响程度因子。基于上述分析,设备间的通信代价计算方式为

$$con(Res_i^V, Res_k^V) = \begin{cases} 0 & i=j \\ f(con(V_i, V_j)) & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

当设备属于同一飞行器内,通信代价为0;否则设备间的通信代价与所属飞行器通信代价成正比。

### 2.3 基于协同任务的多机设备网络评价机制

在协同任务中,鉴于飞行器间的频繁通信形成了航空电子网络架构,因此,协同任务的完成也需要依靠网络进行数据传输。当网络服务质量较好时,有助于飞行团队的合

作;反之,会制约飞行器间的协作。因此,网络架构服务质量对协同作战的整体作用有着极其重要的影响。通常,飞行团队面对一个任务时,会将其划分为多个子任务,直至将其划分到具体的设备,因此,协同参加同一子任务的设备之间需要频繁的数据通信,参与相同子任务的设备间通信链路质量关系到整个子任务的执行质量。

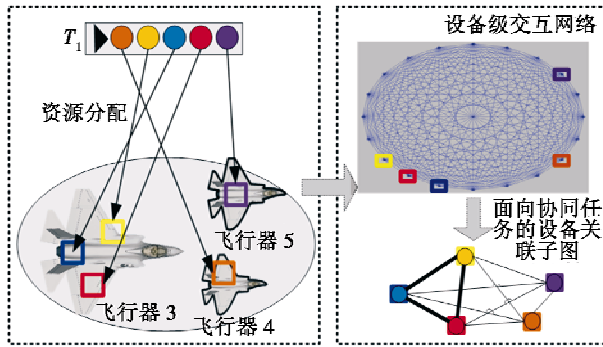


图4 面向协同任务的设备级多机协同示意

Fig.4 Task oriented device-level coordination network

依据协同任务设备级分配,产生各协同任务设备间连接质量网络映射如图4所示。

依据协同任务优先级叠加各评价结果,也就是首先分别评价出各个子任务的网络服务质量,从而计算出整体任务的目标函数,即航空电子网络服务质量的评价依据。协同任务  $T$  的划分可以表示为:  $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_m\}$ , 对于每个子任务  $T_i$  在设备级多机航空电子网络都会对应一个通信子图,根据 2.2 节中设备间通信代价计算方法可知,整个子任务的代价函数为所有参与设备之间通信代价的加权和,而目标函数即为每个子任务的通信代价之和。数学表达式为

$$J_S = \sum_{T_n \in S} C_{T_n} \sum_{Res_i^V, Res_k^V \in T_n} x_i^{T_n} \times x_k^{T_n} \times con(Res_i^V, Res_k^V) \quad (4)$$

式中:  $C_{T_n}$  表示每个子任务在整体任务中的优先级;  $x_i^{T_n}$  为 0, 1 决策变量,  $x_i^{T_n} = 1$ , 表示设备  $i$  分配有执行任务  $T_n$ ,  $x_i^{T_n} = 0$ , 表示设备  $i$  没有参

与任务  $T_m$ 。

基于拍卖方式获得的协同任务分配方案的代价函数为所有子任务代价的加权和,即

$$J_T = \sum_{T_n \in T} \gamma_{T_n} J_{T_n} \quad (5)$$

式中,  $\gamma_{T_n}$  表示子任务  $T_m$  的权重(与重要性、通信频繁比例等因素相关)。因此,对于资源分配,目标为寻找最佳的拍卖任务分配方案  $A_{opt}^*$ ,

使得代价函数最小,即

$$A_{opt}^* = \arg \min J_T(A_{opt}^*) = \arg \min \sum_{T_n \in T} \gamma_{T_n} \times \sum_{Res_i^V, Res_k^V \in T_n} c_{e(Res_i^V, Res_k^V)} \times x_i^{T_n} \times x_k^{T_n} \times con(Res_i^V, Res_k^V) \quad (6)$$

### 3 基于协同任务的航空电子网络评价系统

为了对协同任务连接的网络质量进行评价,实现了航空电子网络仿真评价系统。通过此系统,用户可以实时地观察到飞行器战场间的网络拓扑结构、设备间的通信情况,此外,用户也可以对网络架构进行实时的评价。其包含下列两种参数设计。

1) 设备级协同多飞行器网络连接与设备展示。在协同过程中,随着任务的不同,所需求的协同设备从数量到类型都会发生改变,因此,根据协同任务的变化对协同任务所需设备以动态连接图的方式进行展示。

2) 网络信号强度分析与连接展示。根据飞行器不同位置以及飞行

器之间的距离可以得到每个飞行器之间的网络连接强度,将得到的每两个飞行器之间的网络连接强度以表格的形式表示出来。

#### 3.1 设备级多机航空电子网络互联仿真

在如图5所示仿真系统中,8架飞行器在空中执行作战任务,每个飞行器都需要根据雷达范围来判断距离。在飞行器协同的过程中,系统每1s刷新一次,可动态地显示飞行器间的连接情况。此外,点击每个飞行器都可获取其位置、雷达类型、飞行速度,以及此飞行器与其他飞行器的连接情况。

图5所示为整个网络的状态。在左上部分反映整体飞行器间的状态,每个圆点代表一个飞行器,其飞行前方同心弧线的弧度代表该飞行器上装载雷达的辐射角度,弧度代表辐射范围内的信号强度等级,离飞行器越远的连接信号强度越弱。通过系统可以观测飞行器间通信的网络拓扑结构,获取每个飞行器的位置坐标、飞行方向、速度、雷达编号、飞行器的编号,以及与此飞行器有网络连接的飞行器编号。

#### 3.2 设备级多机航空电子网络的评价仿真

基于飞行器的通信状态和机内航空电子网络设备的枚举,本系统采取了矩阵显示设备通信代价的表示方法。其中,矩阵中的行和列分别代表设备的标号,对应的矩阵值即为通信代价。如图6所示,图中左侧矩阵可以显示之前任意时刻设备的连接情况,右侧表示此刻设备间的通信情况。

对协同任务网络的评价就是依据协同任务优先级叠加各评价结果,而每个子任务的评价结果即为本系统中设备通信显示矩阵中的每个元素之和,依次计算出每个子任务的代价,从而对整个协同任务的网络进行评价。

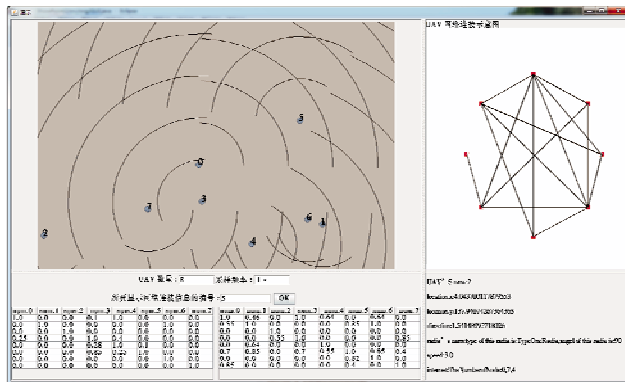


图5 航空电子网络状态示意图

Fig.5 The sketch of the avionics network status

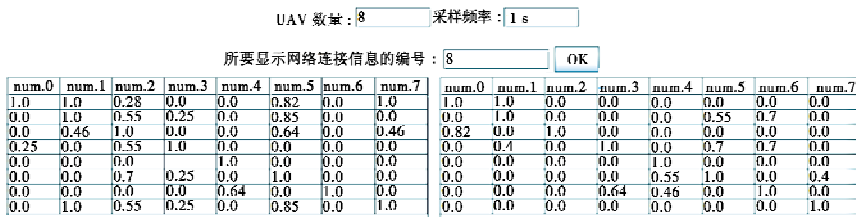


图6 矩阵显示设备级网络连接状况

Fig.6 Matrix display of the device-level avionics network

### 4 结束语

本文在已有航空电子网络体系研究基础上,发现多飞行器协同任务过程中的本质是各飞行器间机载设备与资源之间的协同。鉴于在任务协同交互网络。多机协同需要数据通信,鉴于通信网络质量直接影响协同效果,最后通过通信代价目标函数给出了合理的评价方法。

数据网络特性的综合研究,提出设备级多飞行器航空电子网络体系架构。此架构综合现有机外无线通信网络与机内高速数据网络,建立一套基于设备级的扁平式多飞行器任务协同交互网络。多机协同需要数据通信,鉴于通信网络质量直接影响协同效果,最后通过通信代价目标函数给出了合理的评价方法。

**Abstract:** Based on the key demands of interaction and information sharing among multiple aircrafts for cooperative combat, we proposed a task oriented device-level avionics network architecture, which could reflect the essence of coordination. Firstly, we improved the auction task assignment algorithm and analyzed the wireless communication among aircrafts and among airborne equipments. Then, the communication costs among aircrafts were converted into that among the airborne devices. According to the function of communication costs, a method was presented for aircraft avionics network quality evaluation. The simulation indicates the conciseness of architecture. It can not only reflect the coordination essence, but also properly evaluate the quality of the network.

**Key words:** multi-aircraft; avionics network; network quality evaluation; cooperative combat

### 参考文献

[1] FERINERMAN O, KORMAN A, LOTKER Z, et al. Collaborative search on the plane without communication[C]// Proceedings of the ACM Symposium on Principles of Distributed Computing, 2012:77-86.

[2] NEWMAN A. Transatlantic flight fights; Multi-level governance, actor entrepreneurship and international anti-terrorism cooperation [J]. Review of International Political Economy, 2011, 18(4) :481-505.

[3] KAPLANOGLU V. Multi-agent based approach for single machine scheduling with sequence-dependent setup times and machine maintenance [J]. Applied Soft Computing, 2014, 23:165-179.

[4] ROUNDY S, LELAND E S, BAKER J, et al. Improving power output for vibration-based energy scavengers [J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1) :28-36.

[5] PARADISO J A, STARNER T. Energy scavenging for mobile and Wireless electronics [J]. IEEE Pervasive Computing, 2005, 4(1) :18-27.

[6] CAO Y U, FUKUNAGA A S, KAHNG A. Cooperative mobile robotics: Antecedents and directions [J]. Autonomous Robots, 1997, 4(1) :7-27.

[7] ZHANG Y, LEE C, NIYATO D, et al. Auction approaches for resource allocation in wireless systems; A survey [J]. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, 2013, 15(3) :1020-1041.