

# 无人机传感系统场景中机载计算机处理器性能需求仿真

汪文元, 金 玮, 孙 力

(北京国鼎源创智能科技有限公司, 北京 100085)

**摘 要:** 无人机传感系统在多个领域中广泛应用, 如何为机载计算机选择合适的处理器是无人机设计时必须回答的问题之一。本文介绍了一种利用电子系统级建模与仿真工具 VisualSim 建立无人机传感系统应用场景模型, 仿真分析机载计算机使用不同数量和不同工作频率处理器时对系统性能的影响, 得到处理器量化性能指标, 从而支持处理器选型的方法。

**关键词:** 无人机传感系统; 机载计算机; 处理器; 性能仿真; 选型

**中图分类号:** N945.15 **文献标识码:** A

## Simulation of Performance Requirements of On-board Computer Processors in UAV Sensing System Scenarios

Wang Wenyuan, Jin Wei, Sun Li

(Beijing i-Innovating Intelligent Technology Co. Ltd., Beijing, 100085, China)

**Abstract:** UAV sensing systems are widely used in many fields. How to choose a suitable processor for the on-board computer is one of the questions that must be answered in the design of UAVs. This paper introduces an electronic system-level modeling and simulation method based on VisualSim. Using this method, an application scenario model of the UAV sensing system was established, and then we simulate and analyze the impact on system performance when the on-board computer uses different numbers of processors with different operating frequencies, obtain the quantized performance parameters of the processor, which results support the processor selection.

**Key words:** UAV sensing systems; on-board computer; processor; performance simulation; selection

### 0 引言

安装有传感器的无人机作为一种空中平台, 与在太空、地面、海面等其他位置上运行的单位协作, 共同组成无人机传感系统, 实现对一定范围内空间的探测工作。相比有人机等其他飞行器, 无人机具有价格便宜、使用便利、能进入不宜人类生存环境执行任务等显著优点, 受到国内外多家机构和组织的重视, 在多种领域中得到广泛应用。例如: 美国 DARPA 提出了“自适应跨域杀伤网”(ACK)<sup>[1]</sup>和“马赛克战”<sup>[2,3]</sup>, 利用无人机传感系统实现战场侦查、目标识别、目标打击、毁伤评估等功能; 美国内华达山脉公司提出了基于着舰虚拟映像(VISUAL)的无人机自动着舰系统<sup>[4]</sup>; 美国陆军提出了空中通用传感器(ACS)<sup>[5]</sup>计划,

利用无人机传感系统为地面单位提供战场实时信息。在民用领域, 也利用无人机传感系统开展电力线巡检<sup>[6,7]</sup>、安防检测<sup>[8]</sup>、环境监测<sup>[9]</sup>、农作物管理<sup>[10,11]</sup>等工作。

丰富的应用需求催生了大量携带有传感器的无人机设计, 然而在无人机机载计算机初始设计阶段, 准确评估处理器等核心元器件性能需求对系统整体的影响往往比较困难, 导致出现核心元器件选型不当这一问题。该问题不但涉及到无人机机载计算机设计本身, 也涉及到地面、太空等其他协作单位, 必须从无人机传感系统整体角度进行充分分析, 合理选取核心元器件参数, 才能保证机载计算机符合无人机传感系统性能要求。

本文以机载计算机中处理器选型为例, 利用电子

系统级建模与仿真工具 VisualSim，建立了一个无人机传感系统模型。利用该模型，仿真分析了处理器数量和工作频率这两个典型参数对无人机传感系统性能的影响，实现基于系统应用场景的量化性能指标，支持无人机机载计算机核心元器件选型。

## 1 建模与仿真方法

国际系统工程协会 (INCOSE)、NASA 等机构对各种工程实践活动进行总结，提出了基于模型的系统工程 (Model-based Systems Engineering, MBSE)<sup>[12,13]</sup>。MBSE 的主要思想之一是利用计算机可以理解的“语言”对目标工程进行系统性描述、模拟系统运行过程和结果，使得参与工程研制的各方可以对工程目标、进度、变更、参数等内容达成无歧义的一致理解，以推动工程项目在设计约束下合理开展。

将 MBSE 思想应用复杂电子系统研制中，产生了电子系统级设计 (Electronic System Level, ESL)<sup>[14]</sup> 思想。ESL 思想认为使用 Verilog、VHDL 等设计语言描述硬件寄存器和连线在每个时钟周期内行为的设计方法过于细节并占用了大量仿真计算资源，存在仿真速度慢、难以描述系统中软件行为等多种问题，为此必须提高系统设计的描述抽象层次，从行为的角度对系统进行建模和仿真，才能在有限算力的约束条件下仿真复杂系统架构。

面向角色建模<sup>[15]</sup>和事务级建模<sup>[16]</sup>是 ESL 思想的两种主要实现方式。面向角色建模起源于加州大学伯克利分校，其主要思想是将建模对象分成角色和导演两大类，不同角色模拟系统中不同组件的行为，导演制定规则并控制各个角色间的互动。面向角色建模方法主要特点之一是角色间只存在数据交互。当数据到达一个角色时，触发这个角色的行为，产生一段新数据，再交付给其他角色，触发其他角色行为。事务级建模起源于加州大学尔湾分校，其主要思想是从通信和计算两个方面对目标系统进行行为分解，再分别对计算行为和通信行为进行不同粒度的建模，以便在仿真算力需求和仿真精度之间取得平衡。比如，在计算行为上，细粒度建模可以是一个寄存器的运算，而

粗粒度建模可以是一组复杂公式的运算；在通信行为上，细粒度建模可以是一个周期上的行为，而粗粒度建模可以是多个周期内的行为。

本文同时使用面向角色建模和事务级建模两种方法，将无人机传感系统中不同组成部分抽象成不同的对象，确保各个对象间只存在数据交互，最大化降低各对象之间的耦合度，以便模型维护和行为参数化。同时，每个角色完成无人机传感系统中各组件的计算行为，角色间的数据交互则依据无人机传感系统中各组件间的通信时间特征进行设计。

## 2 无人机传感系统应用场景及机载计算机建模

### 2.1 应用场景概述

无人机传感系统应用场景及机载计算机以前述美国等无人机传感系统项目特征为主要参考，包括无人机、地面车辆和卫星三类组成。无人机作为多种传感器的载体，负责对环境情况的探测，探测数据直接或者通过卫星中继发送给地面车辆；地面车辆接收来自无人机或者卫星发来的数据，排除重复数据后进行综合处理；卫星作为无人机和地面车辆通信的中继单位，始终将从无人机接收到的数据转发到地面。

### 2.2 顶层建模

顶层模型是对无人机传感系统的整体建模，包括三架无人机、一颗中继卫星和三个地面车辆，如图 1 所示。系统模型总体采用层次化设计，每个模块内部都建模了其数据处理过程。为了避免文章过于冗长，后文会对无人机图像传感器建模进行较详细的介绍，其他模型设计则介绍其中主要特点。

由于本文采用面向角色方法进行建模和仿真，因此选用 VisualSim 中的 DigitalSimulator 作为运行本模型的仿真器，以便模拟各模块中数字电路的行为。系统中处理器工作频率等主要参数建模为可以调整的变量，调整变量即可实现对不同组态下无人机机载计算机及整体系统性能的分析。无人机传感系统的总体性能为无人机传感器发出数据到地面车辆完成数据处理后的总体时延。

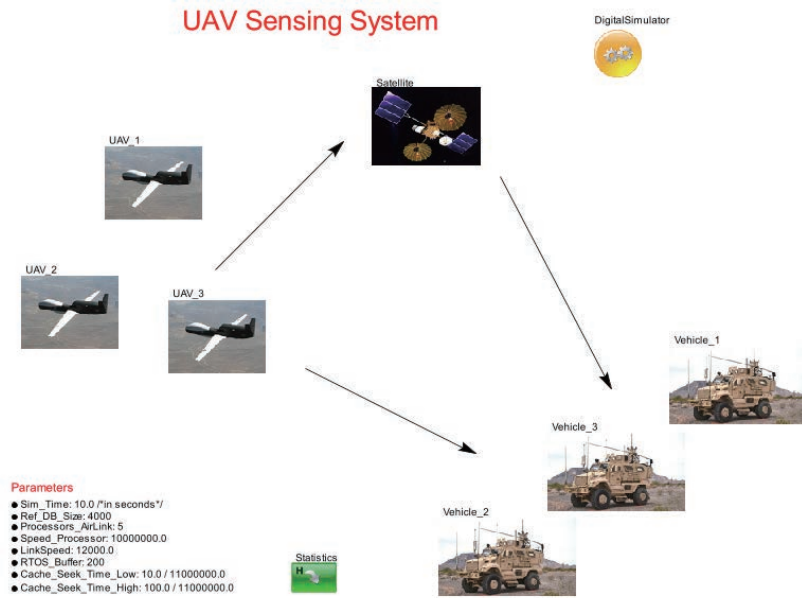


图 1 无人机传感系统顶层模型  
Fig.1 Top model of UAV sensing system

### 2.3 无人机建模

每架无人机上搭载实时图像、蒙面目标检测、光线探测 / 测距、测量与特征情报，共四种传感器，各个传感器同时工作，向无人机机载计算机发送传感数据。机载计算机完成传感器数据处理后，通过无线数据链路以广播形式发出。

无人机模型描述了四类传感器和机载计算机的行为和性能，各部分采用层次化设计，如图 2 所示。其中，四类传感器建模方法相似，仅数据不同，下文仅以图像传感器为例说明建模方法。

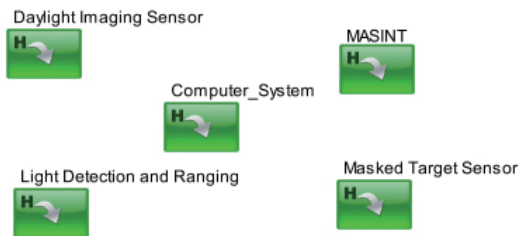


图 2 无人机模型  
Fig.2 UAV model

#### 2.3.1 图像传感器建模

图像传感器模型用于模拟传感器周期性采集无

人机外部数据并将数据发送至无人机机载计算机的过程，主要包括数据产生、链路延迟、重传三部分功能，如图 3 所示。

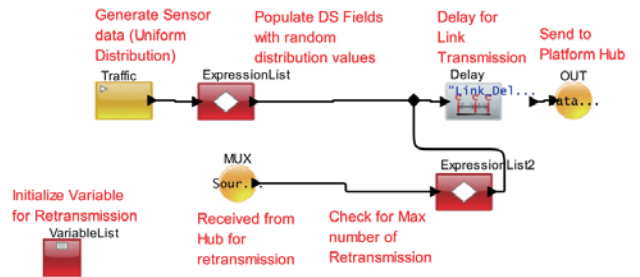


图 3 图形传感器模型  
Fig.3 Graphics sensor model

基于面向角色的建模方法，数据产生部分由 Traffic 和 ExperssionList 两个角色组成，其中，Traffic 按照预设的参数定时产生一个数据，这个数据发送到 ExperssionList 后，触发其根据预设规则产生随机数据。这个产生的数据用于模拟图像传感器接收到并进行一定处理后的数据。Delay 角色接收 ExperssionList 输出的数据，等待预设的时间后将数据通过链路 (OUT 角色) 送入机载计算机，模拟链路延迟。同时，Delay 角色也接收通过 MUX

角色发送来的重传数据，这个数据首先需要经由 ExperssionList2 角色判断是否已经发送过。如果没有，则 ExperssionList2 角色将其输入 Delay 角色；反之，则不输出这个数据。

基于事务级建模方法，Traffic、ExperssionList 和 ExperssionList2 三个模块对图形传感器中的计算行为进行了建模；Delay 模块对图形传感器中的通信行为进行了建模。

综合使用面向角色建模和事务级建模两种方法，实现了对无人机图像传感器的模拟，即：以一定时间间隔，捕获外界图形数据，进行处理后发送到机载计算机，同时对数据重发进行判断。

### 2.3.2 机载计算机建模

机载计算机模型如图 4 所示，主要实现功能如下：

#### (1) 带 cache 的多处理器系统

这一部分主要模拟机载计算机中多个处理器对输入数据的处理。对于多处理器系统采用一组 FIFO 建模。FIFO 个数模拟处理器数量，数据在 FIFO 中停留的时间模拟处理器处理数据的时间，FIFO 利用率模拟处理器利用率。对于 cache 部分性能模拟，当

数据从 FIFO 中弹出后，cache 随机延时一段时间。这段时间较长，模拟 cache 命中率较低情况，反之，模拟 cache 命中率较高情况。

#### (2) 存储系统

存储系统与多处理系统的建模方法类似，也采用一个 FIFO 模拟对存储系统操作和时延。两者的主要区别在于由于多处理器系统共享一套存储系统，因此模拟存储系统的 FIFO 只需要一个，而不必像多处理器系统一样采用多个 FIFO。

#### (3) RTOS

这一部分主要模拟 RTOS 对多处理器系统和存储系统的调度。当传感器的数据到达机载计算机后，触发 RTOS 对多处理器系统和存储系统的控制，确保当前传感器数据被多处理器中某一个处理器所处理，同时，这一处理器得到操作存储系统的权限。当多处理器系统中的所有处理器都被占用时，RTOS 则暂停对接收到的传感器数据调度，等待某个处理器空闲后再将数据送入多处理器系统和存储系统。

## 2.4 地面车辆建模

地面车辆接收来自无人机广播发送和 / 或卫星转发无人机的数据，排除掉来自不同平台的相同数据和时

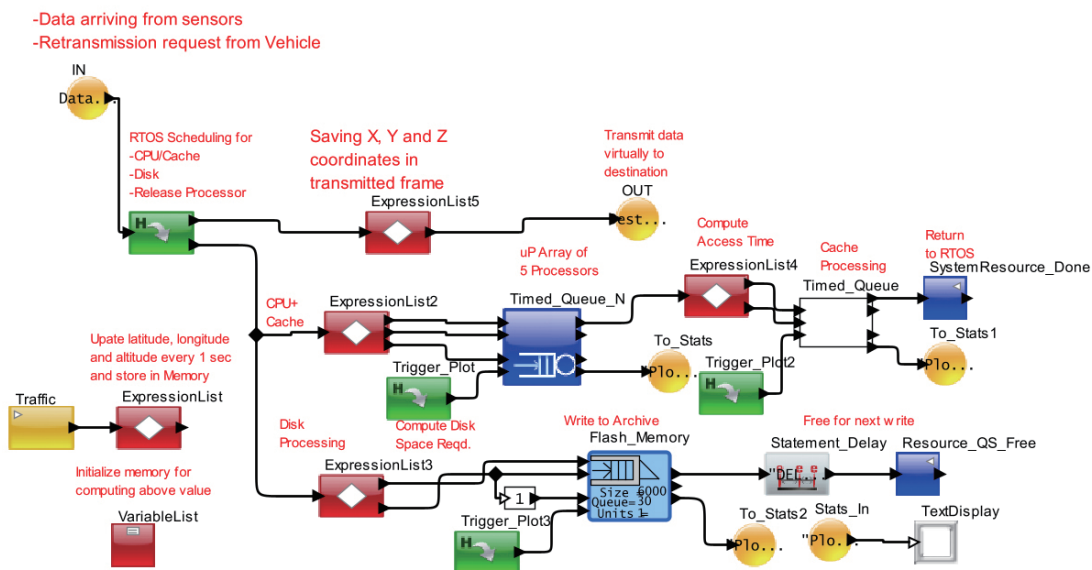


图 4 机载计算机模型

Fig.4 On-board computer model

间上先后顺序错误的数据库。根据接收到的数据建立无人机发现目标的数据库。地面车辆建模如图 5 所示，主要建模了判断接收到的数据是否存在重复或错误，以及当数据发生错误时，向无人机发出重传数据请求。在这一模型中，采用延迟模块模拟地面车辆进行数据计算时的延迟，用查找表模拟判断是否需要重传数据。

### 2.5 卫星建模

卫星接收无人机发送的广播数据，如果是没有转发过的数据，则向地面广播，如果由于多径等原因接收到已经转发的数据，则删除掉该数据。卫星模型如图 6 所示，利用查找表模拟判断是否存在重复发送的数据，并利用延迟模块模拟卫星对数据包处理的时延。当判断接收到数据包并非重复发送时，则将数据包向

地面车辆转发。

## 3 无人机传感系统性能仿真及分析

### 3.1 仿真环境

本文所述无人机传感系统模型在 VisualSim 2140 版本中完成设计和仿真，运行电脑主要配置为：处理器 AMD Ryzen7 5800U 3.2GHz、内存 16GB、硬盘 512GB。VisualSim 完成一次仿真约需要 2.5s。

### 3.2 主要仿真参数

主要仿真参数分为固定和可变两类。其中，固定参数约束了无人机传感系统的基本应用场景，包括仿真时间(10s)、传感器生成数据量及频率(0.01s-0.02s之间以均匀分布产生 40Byte-120Byte 之间的随

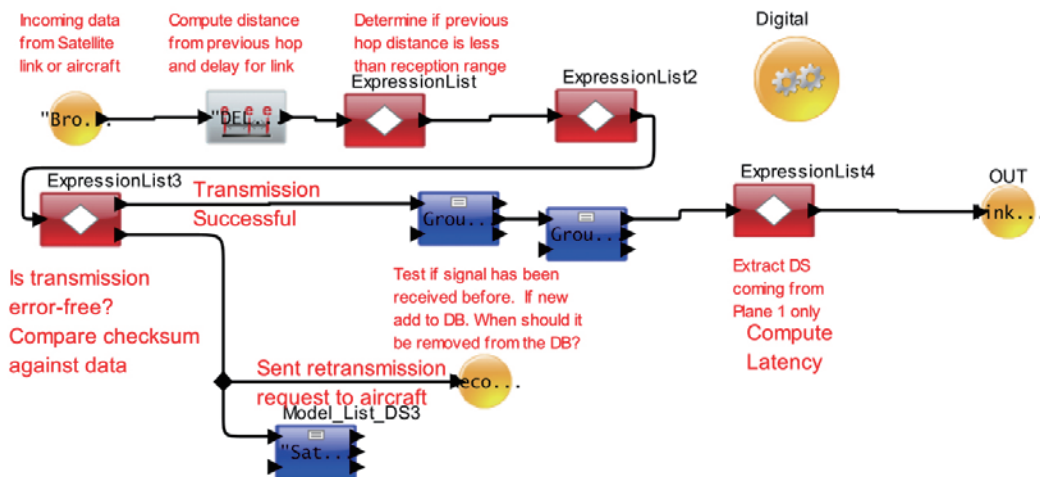


图 5 地面车辆模型

Fig.5 Ground vehicle model

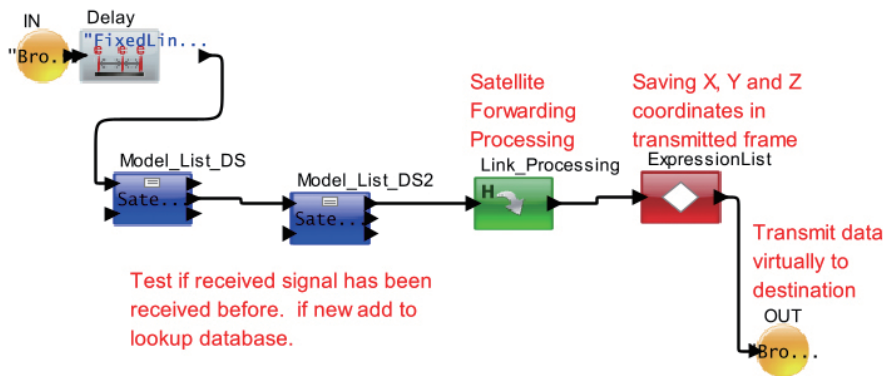


图 6 卫星模型

Fig.6 Satellite model

机数据)、无人机和卫星与地面车辆的通信速率(12000bps)、机载计算机多处理器系统 cache 延迟时间(90 μs-1000 μs 之间随机)。可变参数包括多处理器系统中处理器的数量和工作频率,通过改变这两个参数观察对无人机传感器系统性能的影响,从而得到机载计算机处理器选型的量化依据。

### 3.3 机载计算机多处理器系统仿真结果及分析

针对无人机机载计算机中多处理器系统的分析,分别将机载多处理器系统的工作频率配置为 10MHz、50MHz、100MHz 和 500MHz,处理器数量分别配置 1 个、2 个、4 个、6 个、8 个和 12 个,仿真结果如图 7 至图 10 所示。

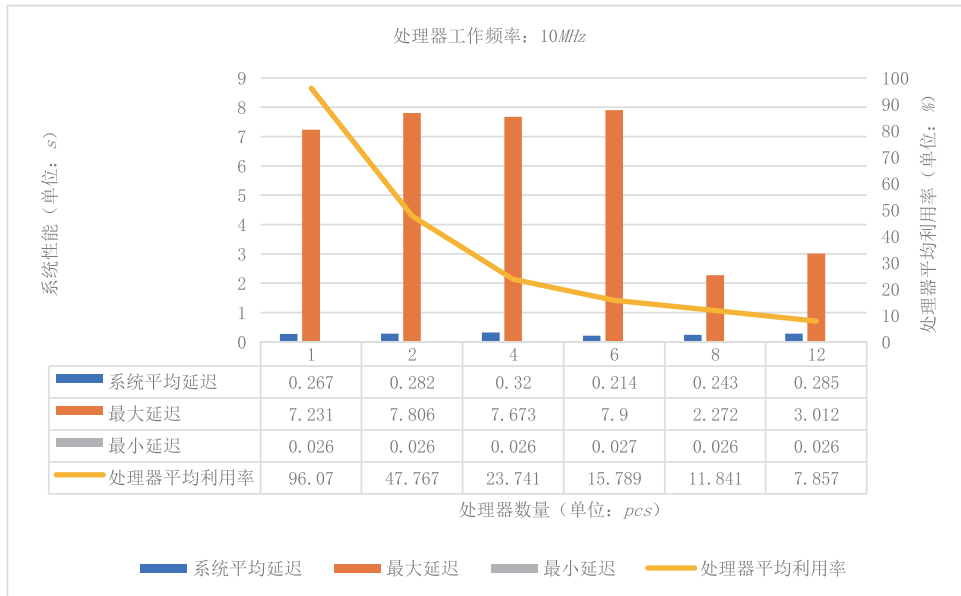


图 7 处理器工作在 10MHz 时,不同数量处理器对系统性能的影响及处理器平均利用率

Fig.7 When the processor works at 10MHz, the influence of different numbers of processors on system performance and the average utilization of processors

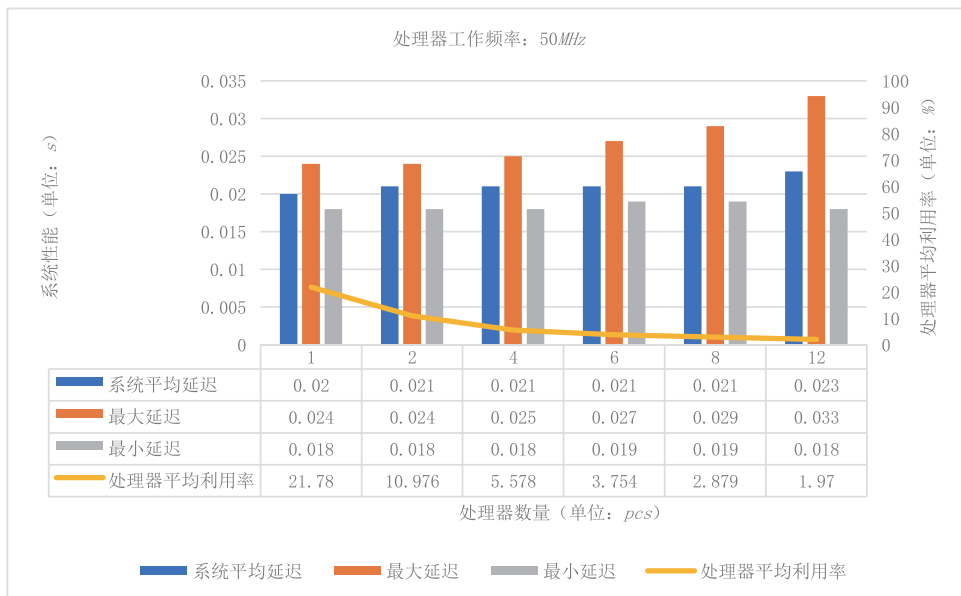


图 8 处理器工作在 50MHz 时,不同数量处理器对系统性能的影响及处理器平均利用率

Fig.8 When the processor works at 50MHz, the influence of different numbers of processors on system performance and the average utilization of processors

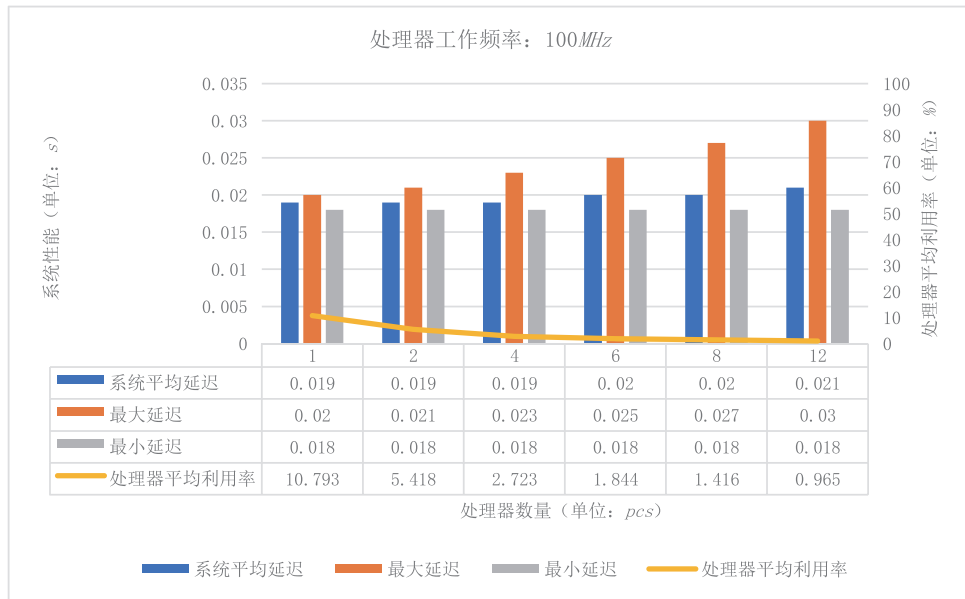


图9 处理器工作在 100MHz 时，不同数量处理器对系统性能的影响及处理器平均利用率

Fig.9 When the processor works at 100MHz, the influence of different numbers of processors on system performance and the average utilization of processors

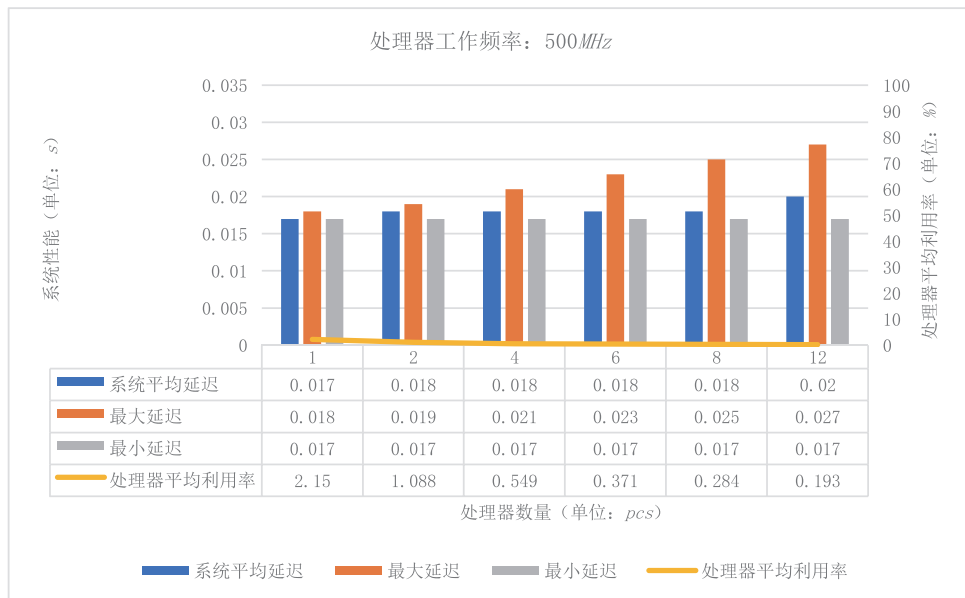


图 10 处理器工作在 500MHz 时，不同数量处理器对系统性能的影响及处理器平均利用率

Fig.10 When the processor works at 500MHz, the influence of different numbers of processors on system performance and the average utilization of processors

对于仿真结果，可从以下三个方面分析处理器数量和工作频率两个参数选择对无人机传感系统性能的影响：

1) 无人机传感系统传输延迟。首先，从增加处理器数量的角度分析，在本文所设置的仿真场景中，

处理器分别工作在上述四个频率时，增加处理器数量对提高无人机传感系统性能未见显著贡献。这是由于使用一个处理器时虽然其利用率接近 100%（10MHz 时只使用 1 个处理器，其利用率为 96.07%），但依旧能够满足系统需要。此时继续增加处理器数量，计

算任务会均摊到每个处理器上,降低了每个处理器的平均使用率(10MHz时使用12个处理器并行处理,每个处理器的利用率为7.857%),几乎不会提升处理性能。其次,从提升处理器工作频率的角度分析,当机载多处理器系统工作在10MHz时,无人机传感系统平均延迟在0.28s左右。当工作频率提升到50MHz、100MHz和500MHz时,系统的平均延迟稳定在0.025秒左右,性能提升了约10倍。但这种性能提高仅发生在处理器工作频率从10MHz提升到50MHz时,50MHz之后继续提升处理器工作频率则不再提升无人机传感系统性能,说明比50MHz更快的处理器对提升系统性能并无显著贡献。

2) 无人机传感系统传输稳定性。当多处理器系统工作在10MHz时,无人机传感系统最大延迟与平均延迟存在较大偏差,说明系统的稳定性有待提高。当多处理器系统工作在50MHz、100MHz和500MHz时,无人机传感系统最大延迟、最小延迟、平均延迟三者数值接近,说明提升处理器工作频率有助于提高无人机传感系统的稳定性。

3) 机载多处理器系统剩余计算能力。无论是提高处理器数量,还是提高处理器的工作频率,都可以观察到处理器平均利用率与处理器数量和工作频率成反比,说明在处理器数量增加、工作频率增高后,可以提升机载计算机完成传感器数据处理和转发之外的剩余计算能力。这些剩余计算能力为无人机执行更多其他任务提供可能。

综上所述,在本文所述无人机传感系统应用场景及相关参数约束下,满足机载计算机任务要求的处理器选型参数为:处理器数量不少于1颗、工作频率不低于50MHz。原因如下:选择一个处理器是在当前仿真约束下,能够完成数据处理任务;选择工作频率不低于50MHz是在当前仿真约束下,能够获得比10MHz更好的稳定性能,同时大于50MHz后,性能没有明显提升,更高的工作频率会带来更大的功耗,对无人机供电、散热等其他系统产生不必要的负担,所以不选择比50MHz更高的工作频率。如需要选择

更高工作频率、更多处理器数量,应视无人机承担的其他任务而定。

## 4 结束语

本文针对无人机传感系统应用场景中,机载计算机系统处理器选型问题,介绍了一种利用电子系统级建模与仿真工具VisualSim建立无人机传感系统应用模型,通过仿真分析了机载计算机中不同数量和不同工作频率的处理器对无人机传感系统整体性能影响的方法。通过这种方法可以从系统整体应用角度,快速得到基于量化数据的处理器性能参数选型依据,有效支持无人机机载计算机系统的设计。

## 参考文献 (References)

- [1] GREG Kuperman. Adapting Cross-Domain Kill-Webs (ACK)[EB/OL]. [2022-01-17]. <https://www.darpa.mil/program/adapting-cross-domain-kill-webs>.
- [2] 邹立岩,张明智. 马赛克战视角下的智能无人机集群作战概念研究[J]. 战术导弹技术,2020(06):67-74+86.
- [3] 李磊,蒋琪,王彤. 美国马赛克战分析[J]. 战术导弹技术,2019(06):108-114.
- [4] 程隽逸. 基于多传感器融合的舰载无人机自动着舰技术的研究[D]. 华东理工大学,2019.
- [5] JOHN Pike, STEVEN A. Aerial Common Sensor (ACS) [EB/OL].(1991-11-25)[2022-01-17]. <https://fas.org/irp/program/collect/acs.htm>.
- [6] 陈栋. 架空输电线路无人机的应用[J]. 产业与科技论坛,2020,19(02):44-45.
- [7] 毛鹏飞. 初探输电线路无人机巡检实时通信技术[J]. 通讯世界,2020,27(01):214-215.
- [8] 刘琨,张立旺,江俊峰,马鹏飞,孙振世,翁凌锋,刘铁根. 基于无人机视频联动的分布式光纤传感周界安防系统[J]. 光子·激光,2019,30(12):1244-1251.
- [9] 曾孟佳,蔡淑怡,黄旭. 基于无人机与无线传感技术的山体滑坡应急监测系统[J]. 湖州师范学院学报,2019,41(04):51-57.
- [10] 郭意. 基于无线传感网的无人机精准喷药系统研究[J]. 农机化研究,2020,42(03):134-137.
- [11] 郭明. 地空交互多感融合植物生长状况监测系统[D]. 安徽



- 理工大学,2019.
- [12] International Council on Systems Engineering (INCOSE). INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities[M]. Wiley:USA,2015.
- [13] SHISHKO R, ASTER R. NASA systems engineering handbook[M]. NASA Special Publication, 1995.
- [14] SANTOS S R A. Electronic System Level Design: An Open-Source Approach[M]. Springer, 2011:3-10.
- [15] TALPIN R G L G K S. Formal Methods and Models for System Design[M]. Springer, 2004:33-56.
- [16] CAI L and GAJSKI D. Transaction level modeling:

an overview, First IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and Systems Synthesis[C]. IEEE, 2003:19-24.



**作者简介:**

汪文元(1975年—),男,四川省仁寿县人,博士,高级工程师,长期从事复杂电子系统建模与分析、工业先进控制、系统健康管理等领域的研究及工程工作。