21st IEEE INTERREGIONAL NEWCAS 2023
Edinburgh, Scotland | June 26–28, 2023

使用伽马分布滑动窗口的容错处理单元自主着陆引导系统

Hossam O. Ahmed，工程与技术学院，
中东美国大学，科威特。

摘要—为应对当今人口密集的大都市地区及其伴随的交通问题，越来越多的城镇开始寻求更先进、更快捷的城市空中出租车无人机。使用此类技术时必须考虑的安全参数，可能是其广泛应用中最重要的因素。近来大多数航空事故都发生在着陆阶段，因此，对于垂直和／或短距起降（V/STOL）无人机而言，这是一项尤为重要的安全考量。

本研究着重提升自主着陆引导辅助系统（ALGAS）前身所用处理器架构的容错能力，进而增强其决策能力。此外，我们提出了一种基于伽马分布滑动窗口单元（GDSWU）的容错处理架构。该 GDSWU 完全采用 VHDL 设计，目标 FPFA 为 Intel Cyclone V 5CGXFC9D6F27C7 芯片。根据 INTEL Quartus Prime 程序的综合结果，GDSWU 的最高工作频率可达 369.96 兆赫。所提出的 GDSWU 核心的动态核心及输入／输出功耗仅为 20.36 mW。

关键词—无人机系统、传感器融合、信息物理系统、模糊逻辑系统、决策支持系统、分布式和去中心化系统、FIR滤波器、现场可编程门阵列。

I. 引言

现有交通基础设施将因世界人口不断增长而不堪重负，因此必须采取重大措施。人们已提出多种方案和构想，试图在不同高度分配空中走廊。依托城市空中交通（UAM）等前景广阔的航空电子技术，被认为是一种合乎逻辑的选择，尤其适用于采用垂直起降（V/STOL）的无人机 [1-3]。鉴于预计不久后大型 UAM 空中出租车无人机将遍布各大都市，集成式垂直／短距起降机制必须能够稳健应对各种意料之中和意料之外的问题 [4-5]。

此外，需要注意的是，每次飞机飞行的最后三个阶段——初始进近、最后进近和着陆——约占现代飞行事故总数的 53.85% [6, 7]。本文提出将伽马分布滑动窗口单元（GDSWU）应用于自主着陆引导辅助系统（ALGAS），以支持现有的容错处理架构。这将提升整体决策能力，具体说明见下文各节。

II. 预备知识

UAM 的成功全球实施需要深入理解并熟练执行安全标准。当前适用于航空运输系统的安全要求，例如单一欧洲天空空中交通管理研究（SESAR）和下一代（NextGen）所提出的要求，应与新的灵活安全标准相结合。近年来，模糊逻辑系统（FLS）日益被视为一种增强型控制方法，用于解决 UAM 面临的诸多问题，例如自动驾驶仪动力学以及无人机系统中的视觉人体跟踪。FLS 还能够处理电气系统信号歧义和噪声 [8-9]。

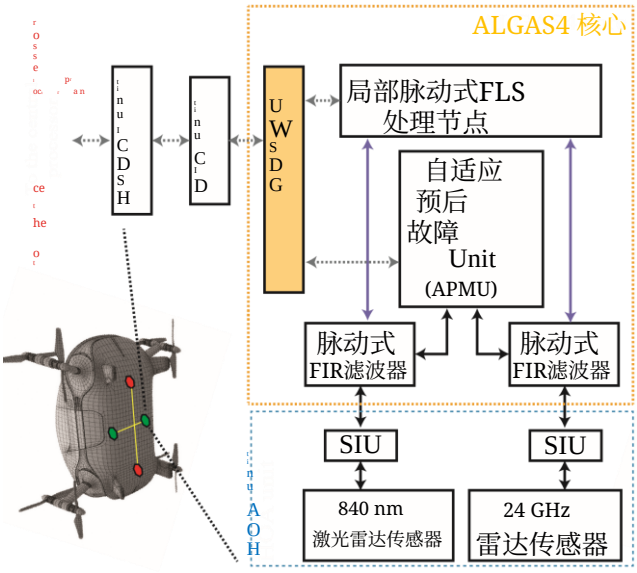

图 1. 所提出的采用 GDSWU 的 ALGAS4 系统中一个空间角的详细结构。

III. 所提出的 GDSWU 处理核心

本文是针对 UAM 无人机提出的 ALGAS 处理系统的后续研究 [8-9]。该系统旨在提升 V/STOL 滑行无人机在着陆任务中的安全性。所提出的 ALGAS 系统由四个 ALGAS 处理核心组成。图 1 展示了每个 ALGAS 处理核心。每个 ALGAS 处理节点的主要任务是通过传感器接口单元（SIU），持续测量短程雷达和激光雷达传感器采集的感测数据。随后，使用两个 FIR 滤波器对这些数据进行滤波，以去除噪声。FIR 滤波器的输出再由自适应预后故障单元（APMU）和 FLS 单元进一步处理。APMU 负责测量两种感测信号读数之间的差异率，以指示二者之间的灵敏度程度。

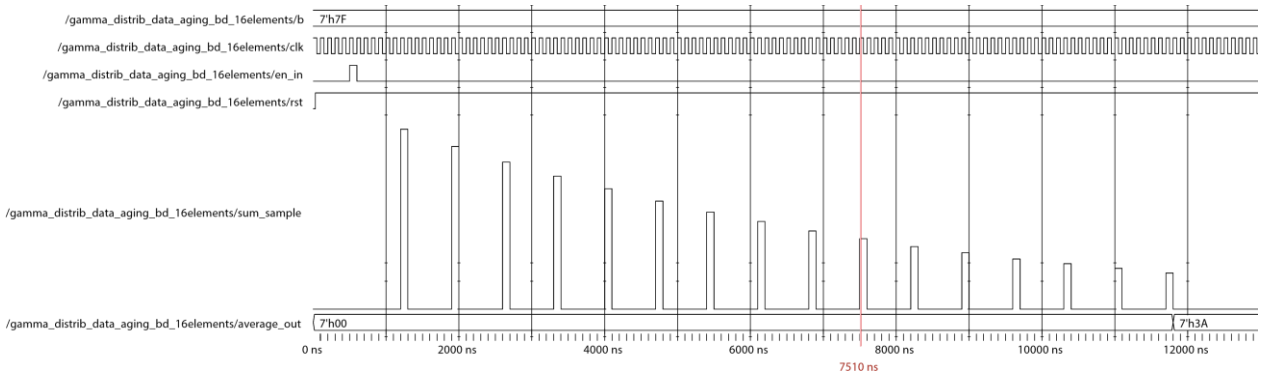

图 2. 所提出的16抽头伽马分布滑动窗口的波形。

FLS 负责测量无人机与着陆面之间的高度。此前的出版物已对所有这些模块作了明确说明 [8-9]。着陆过程中，FLS 的输出信号为整个系统的稳定性提供关键信息。因此，FLS 中的单个错误就可能造成严重的负面后果，而无人机的执行器无法予以纠正。因此，本文提出 GDSWU，以增强所提出 ALGAS 系统的容错能力，并为决策提供方提供可靠的信息。此外，每个 ALGAS 核心的最终决策不仅取决于 FLS 单元的当前响应，也取决于此前连续 16 次输出的累积结果。这些先前输出样本均根据伽马分布函数赋予特定权重，如式（1）所示；其中 Γ(a) 表示伽马函数，在所有正整数 Γ(a)=(a-1)！。

$$f(x;a,b) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)}\, x^{a-1} e^{\frac{-x}{b}} \qquad (1)$$

表 I. 所提出的 16抽头伽马分布滑动窗口计算性能汇总。

	所提出的 16 抽头伽马分布 本文中的滑动窗口
目标 FPGA 器件名称	英特尔 5CGXFC9D6F27C7
嵌入式现场可编程门阵列的数字信号处理器 资源使用情况	None
总动态核心和输入/输出 热功耗散	20.36 毫瓦
外部存储器使用或 ***BRAM***	None
最高工作频率	369.96 兆赫
逻辑单元数量	464 个 ALM
寄存器总数	922 个寄存器
并行数量 每个时钟周期的操作次数	22 次操作/时钟周期
可重构伽马 分布参数	固定，a=1 和 b=10

IV. 结果

所提出的 GDSWU 使用 VHDL 在门级和 RTL 级进行设计，未使用任何 IP，以优化计算性能。我们选择了 a=1 和 b=10。如图 2 所示，Questa 仿真生成的波形展示了 GDSWU 单元的阶跃响应。average_out 信号显示最终累积平均值对应滑动窗口的平均值。如表 I 所示，INTEL Quartus Prime 的综合结果表明，GDSWU 的粗粒度架构最高可在 369.96 兆赫的频率下运行。所提出的 GDSWU 系统的动态核心及输入／输出功耗仅为 20.36 毫瓦。从图 2 可以看出，如果初始种子为 7h'7F，那么经过 16 个抽头后，最终累积平均值将为 7h'3A。Gamma 分布可以根据专家意见和目标应用进行调整。GDSWU 的超低功耗归功于多项优化，以及在所提出的脉动式处理架构中采用可变位宽无符号数表示来处理数据。除了增强容错能力外，所提出的 GDSWU 还将通过每个时钟周期增加 22 次运算，提升 ALGAS 核心的整体计算性能 [9] 。

V. 结论

所提出的 GDSWU 可提供更灵敏的输出信号。这一特性将提升未来垂直和／或短距起降（V/STOL）无人机的整体容错能力。所提出的 GDSWU 的下一版本将能够根据首选着陆场景重新配置参数。

参考文献

[1] S. Bharadwaj、S. Carr、N. Neogi 和 U. Topcu，“分散式城市空中交通空中交通管理的控制综合，载于《IEEE 网络系统控制汇刊》，第 8 卷，第 2 期，2021 年。[2] M. Rimjha、S. Hotle、A. Trani 和 N. Hinze，《空域限制对城市空中交通计算需求潜力的影响》，载于《综合通信、导航与监视会议》（ICNS），美国，2022 年：IEEE。[3] J. Chang、N. Dong、D. Li、W. H. Ip 和 K. L. Yung，《骨架提取与基于贪心算法的路径规划及其在无人机轨迹跟踪中的应用》，《IEEE 航空航天与电子系统汇刊》，第 58 卷，第 6 期，2022 年。[4] A. Savvaris、S. Wang、Y. Xia 和 S. Chai，《无人驾驶飞行器机会约束飞行轨迹的快速生成》，《IEEE 航空航天与电子系统汇刊》，第 57 卷，第 2 期，2021 年。[5] G. Hodell 等，《高密度垂直起降机场环境下机队管理界面的可用性评估》，载于《IEEE/AIAA 第 41 届数字航空电子系统会议》（DASC），美国，2022 年：IEEE。[6] 路透社，《中国波音客机坠毁于山区，机上载有 132 人，暂无幸存者迹象》，中国，2022 年。[7] 空中客车公司，《商用航空事故统计分析（1958—2021 年）》，载于《安全出版物》，2021 年。[8] H. O. Ahmed，《使用现场可编程门阵列实现的 V/STOL 自主着陆引导辅助系统的分离式 FLS 处理核心》，载于《综合通信、导航与监视会议》（ICNS），美国，2021 年：IEEE。[9] H. O. Ahmed，《基于粗粒度 FLS 的处理器：采用现场可编程门阵列实现的城市空中交通无人机预后故障特性》，载于《综合通信、导航与监视会议》（ICNS），美国，2023 年：IEEE。