中文核心期刊 中国科技核心期刊 Scopus CSCD

OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering

CN 51-1781/TN ISSN 1003-501X(印刷版) ISSN 2097-4019(网络版)

美SOSA开放架构解析与我国机载光电系统渐进式开放设计方法

高于山，张菁，黄俊，邓瑛，段一凡

引用本文:

高于山，张菁，黄俊 等. 美SOSA开放架构解析与我国机载光电系统渐进式开放设计方法[J]. 光电工程，2026，**53**(10): 260127.

Gao Y S, Zhang J, Huang J, et al. Analysis of the US SOSA open architecture and a progressive open design method for China's airborne electro-optical systems[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(10): 260127.

https://doi.org/10.12086/oee.2026.260127

收稿日期: 2026-05-06; 修改日期: 2026-09-20; 录用日期: 2026-09-24

相关论文

红外与可见光渐进式融合的矿区道路落石检测

马文宁， 孟彬

光电工程 2026, **53**(2): 250226 doi: 10.12086/oee.2026.250226

渐进式多粒度ResNet车型识别网络

徐胜军， 荆扬， 李海涛， 等

光电工程 2023, **50**(7): 230052 doi: 10.12086/oee.2023.230052

SAR实时成像光学处理器光机系统设计

赵洪强， 张星祥， 王夺， 等

光电工程 2022, **49**(9): 210421 doi: 10.12086/oee.2022.210421

串并混合架构的自适应宽带波束抖动抑制技术

陈胜艺， 冯念， 刘波， 等

光电工程 2025, **52**(10): 250237 doi: 10.12086/oee.2025.250237

更多相关论文见光电期刊集群网站

Opto-Electronic Journals Group

https://www.oejournal.org

OE_Journal @OptoElectronAdv

OEE | 光电工程 Opto-Electronic Engineering

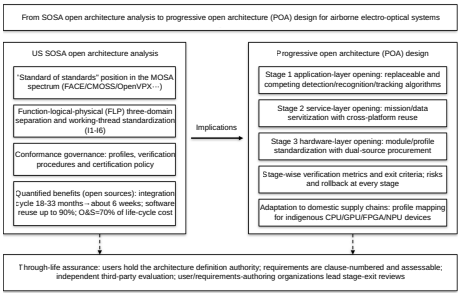
Review

2026 年 10 月, 第 53 卷, 第 10 期

美 SOSA 开放架构解析与我国机载光电系统渐进式开放设计方法

高于山*, 张　菁, 黄　俊, 邓　瑛, 段一凡

复杂航空系统仿真全国重点实验室, 北京 100076



摘要： 为解决指挥、控制、通信、计算机、情报、监视与侦察 (C4ISR) 系统架构紧耦合、装备重用性差、研制周期长、成本攀升等问题，美国国防部自 20 世纪 90 年代起推行以模块化开放系统方法 (modular open systems approach, MOSA) 为顶层指导的开放架构实践，其中传感器开放系统架构 (SOSA) 标准已成为传感器领域权威的开放架构规范。本文系统解析了 SOSA 的体系定位、核心内容与工程实践，并基于公开案例数据，从集成周期、软件复用率与全寿命成本维度量化对比了开放架构与传统封闭架构的效益差异。在此基础上，本文面向我国机载光电系统给出体系化的架构设计启示与方法提炼功能-逻辑-物理 (FLP) 三域分离方法论与覆盖光电探测全链条的工作线程标准化方法，并以框图明确三域与工作线程的耦合映射关系；从硬件模块化、软件服务化、即插即用三方面给出结合典型探测跟踪任务的工程设计启示；进而提出渐进式开放架构 (progressive open architecture，POA) 设计方法，构建应用层开放、服务层开放、硬件层开放的三阶段实施路径，逐阶段给出目标、关键措施、风险回退、验证指标与出口准则，并针对中美工业体系与采办制度差异、国产替代场景开展适配性与风险分析。相关结论可为我国机载光电系统研制及开放架构路径论证提供依据与参考。

关键词： 传感器开放系统架构；机载光电系统；开放架构；渐进式开放架构；模块化开放系统方法

The English title and abstract appear at the end of the paper.

DOI: 10.12086/oee.2026.260127 | CSTR: 32245.14.oee.2026.260127 | 中图分类号：TN216 | 文献标识码：A

高于山，张菁，黄俊，等. 美 SOSA 开放架构解析与我国机载光电系统渐进式开放设计方法 [J]. 光电工程，2026，**53**(10): 260127

Gao Y S, Zhang J, Huang J, et al. Analysis of the US SOSA open architecture and a progressive open design method for China's airborne electro-optical systems[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(10): 260127

1　引　言

在未来空战中，建立态势感知优势更多取决于如何比对手更快、更好地获取和处理传感器数据，实现杀伤链前端的发现、锁定、跟踪能力，并进行连续评估。为此，美军正在构建由空、天、网络空间传感器组成的一体化“杀伤网”，通过将传感器数据与其他数据网络快速整合，确保拒止条件下信息的持续穿透组网能力，以便在更快时间、更广空域内实现发现、锁定、跟踪与评估，从而更高效地制定战术决策、更快地实施打击。随着传感器系统的数量、应用、成本和复杂性持续增加，美军发现以往 C4ISR 系统架构设计不合理，缺乏软硬件重用和模块化设计，导致新装备研制周期过长、改进过程复杂、成本居高不下，直接影响飞机新能力的部署[1]。

开放系统架构 (Open systems approach, OSA) 为解决上述困境提供了根本性思路。美国国防部自 20 世纪 90 年代起即开始探索开放架构实践，逐步形成了以模块化开放系统方法 (modular open systems approach, MOSA)

收稿日期：2026−05−06；修回日期：2026−09−20；录用日期：2026−09−24；网络出版日期：2026−10−15

*通信作者：高于山，1571922388@qq.com

版权所有©2026 中国科学院光电技术研究所

为核心的方法框架[2-3]。在 MOSA 指导下，美军针对航空电子软件、地面车辆电子、海军硬件平台、射频系统、旋翼机航电与传感器等不同应用领域制定了一系列支撑标准并加以应用实践，逐渐将开放系统架构引入论证、设计、采购流程[3-4]。其中，SOSA 标准作为传感器领域的核心开放架构规范，自 2015 年前后发起酝酿、2017 年正式启动编制以来，历经技术快照到正式版的多次迭代，已成为美军传感器系统研制的重要技术基准，并逐步向定向能武器、太空平台等新兴领域扩展。

就国内情况而言，学术界和工业界对 SOSA 标准的研究主要集中在标准内容解读、接口规范分析和 VPX (VITA 46 高速串行交换总线标准) 硬件平台局部应用等方面[4]，多停留在技术翻译和局部功能介绍层面。近年来，面向无人飞行器[5]、机载武器[6]、相控阵雷达[7] 等领域的开放式架构研究已经起步，但针对机载光电系统的开放架构设计方法研究仍属空白。

从研制现状看，我国现役机载光电系统多以转塔或吊舱为物理整体交付，探测器、处理机与显控设备紧耦合，接口协议私有化，功能固化于专用处理硬件[8-9]。对照 SOSA 标准要求，主要存在三方面差距：1) 功能、逻辑、物理三域未分离，算法升级须牵动整机更改，难以适应任务快速迭代；2) 接口未标准化，模块难以跨厂商互换，供应链封闭；3) 缺乏合规验证机制，开放性停留在设计意图层面、不可考核。与此同时，国内在航空光电转塔[8]、分布式光电[9]、红外小目标探测识别[10] 等关键技术方向已有深厚积累，具备向开放架构迁移的技术基础。

针对上述问题，本文在前期研究基础上，从体系视角解析 SOSA 的技术理念、架构生态与工程方法论，并结合美空军部 2026 年发布的敏捷任务套件政府参考架构 (AMS GRA)v14.0 所代表的最新演进[11]，提炼适用于我国机载光电系统的架构设计启示，提出渐进式开放架构 (progressive open architecture，POA) 设计方法及其实施路径、验证指标与风险适配策略，为我国机载光电系统从封闭架构向开放架构的平滑过渡提供参考。

2 SOSA 开放架构解析

2.1 SOSA 在 MOSA 标准谱系中的定位

MOSA 是美国国防部 2019 年确立的武器系统研制方法论，其核心目标是实现装备快速技术迭代、降低全寿命周期成本、打破供应商锁定并促进技术创新[2]，强调在论证与设计早期即融入模块化设计、开放接口、标准化协议三项基本原则。在 MOSA 指导下，美军面向不同应用领域发展了一系列支撑标准，形成覆盖航空、地面、海上与传感器等多域的标准谱系，并在下一代座舱等项目中开展了多种开放架构模型的集成应用[12]。谱系中各标准按应用领域分工并相互引用：未来机载能力环境 (FACE) 聚焦航空电子软件接口标准化，实现软件组件跨平台复用；车载 C4ISR/电子战互操作集成 (VICTORY) 面向地面车辆电子系统的物理集成与信息互操作；硬件开放系统技术 (Hardware open systems technologies, HOST) 定义海军开放式硬件模块与机箱规范；模块化开放射频架构 (Modular open RF architecture, MORA) 将射频系统拆分为标准模块资源，支撑面向任务的多功能射频重构；开放任务系统 (Open mission systems, OMS)/开放无线电架构分别面向多传感器平台数据接口与通信无线电模块化；联合通用架构 (Joint common architecture, JCA) 面向旋翼机航电功能。C4ISR/电子战模块化开放标准套件 (CMOSS) 由美陆军 CERDEC (现 DEVCOM C5ISR 中心，C5ISR 即指挥、控制、通信、计算机、网络、情报、监视与侦察) 于 2013 年发起，是“套件级”集成标准，将 VICTORY、MORA、OpenVPX、REDHAWK 等标准组合为统一的 C5ISR/电子战载荷套件[13]。主要标准的差异化对比见表 1。

不同于 FACE、VICTORY 等标准聚焦特定层面或特定领域，SOSA 统筹兼顾各已有标准，致力于从系统架构层面定义传感器系统的功能模块、模块间接口和互操作机制，内容覆盖硬件平台、中间件服务、应用软件和物理接口等多个维度，属于"标准之标准"[14]：其引用 FACE 数据架构作为上层应用软件的语义互操作基础，引用 OpenVPX/VITA 标准作为硬件平台物理规范，引用 MORA 作为射频模块的补充参考，插卡剖面最初即从 CMOSS 导入[13]。2024 年 10 月公开的 CMOSS 互操作需求规范 (IRS)v1.2 将 VICTORY 更新至 v1.10、MORA 更新至 v2.5，并与 SOSA 标准 Edition 2.0 对齐[13]，跨军种标准呈汇聚态势。这种协同机制避免了重复定义和潜在冲突，形成层次清晰、职责明确的标准体系。SOSA 由 The Open Group 牵头，各军种、政府部门、国防承包商和学术界共同参与制定，并通过治理机制保障持续演进[2,14-15]。

2.2 SOSA 标准核心内容与合规认证体系

SOSA 标准自 2017 年启动编制以来，历经多轮技术

表 1 美军主要开放式架构标准对比

Table 1 Comparison of major US open architecture standards

标准名称	开发机构	应用领域	覆盖层次	典型特征
FACE	The Open Group	航空电子软件	计算环境、数据接口	软件组件跨平台复用
VICTORY	美国陆军CCDC	地面车辆电子	物理集成、信息互操作	车载C4ISR/电子战集成
HOST	美国海军	海军计算平台	硬件模块、机箱规范	海上环境硬件标准化
MORA	美国陆军/工业界	射频系统	射频前端、波形应用	多功能射频共享重构
OMS/ORA	美国空军/各军种	多传感器平台、通信无线电	数据接口、硬件模块	任务数据接口与波形模块化
JCA	美国陆军	垂直起降飞机	应用软件、航电功能	面向旋翼机的航电功能标准
CMOSS	美国陆军CERDEC	C5ISR/电子战载荷	套件级集成(融合VICTORY/MORA/OpenVPX等)	机箱载荷套件化，2013年发起
SOSA	The Open Group	传感器系统	物理接口到软件全栈	传感器全栈开放架构，“标准之标准”
AMS GRA	美空军部AFLCMC/WA	机载任务系统	参考架构＋编号化合规要求	2026年v14.0，完全取代OCS 2.0

快照迭代，先后发布正式版 Edition 1.0 (2021 年 9 月)、Edition 1.1 (2023 年 6 月) 与 Edition 2.0 (2024 年 2 月)，并在 2025 年 6 月发布的 Edition 2.0 Snapshot 3 中新增定向能武器系统 (directed energy weapons，DEWS) 与航天器航电标准内容两个附录[16-17]，应用领域持续扩展，约束力由浅入深，逐步牵引各参研单位打破技术壁垒。

SOSA 参考架构采用基于功能的模块化划分方法，将传感器系统分解为任务层、功能层、服务层三个逻辑层：任务层对传感器子系统实施统一资源管理与任务管理；功能层在任务层调度下由多个功能模块实现具体任务；服务层提供功能实现所需的资源与支撑。三个逻辑层进一步细分为六大功能模块组——传感器管理模块组 (任务层)，发送接收、信号处理、分析、传递模块组 (功能层)，支持系统操作模块组 (服务层)，功能覆盖平台接口、模拟信号调理、数字信号处理、任务处理和后端处理[14,18]。每个功能模块具有明确的输入输出接口、功能边界和性能约束，支持在不改变系统整体架构的前提下对单个模块进行技术升级或供应商替换。

2.3 工程实践与最新发展

SOSA 标准已在美军多个项目中得到实践验证。以最典型的“敏捷秃鹫”吊舱 (Agile Condor) 为例：该吊舱由美国空军研究实验室 (AFRL) 牵头 GA-ASI、SRC 等公司研制，遵循 SOSA 标准开发[19-20]，内置符合 SOSA 标准的 3U VPX 机箱，实现体积与热容量的可扩展管理：14 个插槽中配置 9 个计算模块，含 Intel i7 四核单板计算机 (SBC)、GPU 板 (每处理片 2 张)、Virtex-7 FPGA I/O 板、PEX431 PCIe 交换板和 10 对光纤的收发板，背板为 PCIe Gen3/光纤/以太网混合互连，整舱采用风冷折叠翅片散热[21]。在试验试飞方面，该吊舱已搭载 MQ-9 无人机完成外挂飞行演示[22]，其衍生的定位、导航与授时 (PNT)AgilePod 吊舱在 T-38C 教练机上完成试飞并达成飞行试验目标[23]，适配 Textron Scorpion 轻型攻击机仅用了数周时间[24]；试飞中还于飞行状态下演示了高性能计算与机载机器学习能力[25]，充分体现了开放架构对快速迭代与多平台部署的支撑作用。

2.4 开放架构量化效益分析

针对开放架构效益“定性描述多、定量数据少”的问题，本节基于公开渠道可考的案例数据，从集成周期、软件复用率与全寿命成本三个维度对比开放架构与传统封闭架构的量化差异，每条数据均注明统计口径，结果见表 2。

集成周期方面，传统封闭航电系统每新增一个软件功能块，集成周期约 18 ~ 33 个月 (经验值)[26]；传统单平台吊舱的定制集成通常需 5 ~ 7 年 (经验值)[27]。采用开放架构后，AgilePod 吊舱在 Scorpion 飞机上的适配仅用数周 (工程实测)[24]，OMS 基础设施在 B-2 轰炸机上的集成约 6 周 (演示条件)[28]，集成周期压缩一个数量级以上。

软件复用方面，美陆军通用航电架构系统 (common avionics architecture system，CAAS) 在同族直升机平台间的软件代码复用率最高达 90% (上限值)[29]；美海军基于 FACE 的任务软件实现“一次构建、多型复用”，同一软件组件在 T-45、AV-8B 与 F/A-18 三型机上复用 (工程实践)[30]；2021 年 FACE/SOSA 技术交流会上，19 个来自不同厂商的 FACE 可移植单元 (unit of portability，UoP) 完成混合集成演示 (演示条件)[31]。

全寿命成本方面，运维保障 (operations and support，O&S) 成本约占武器系统全寿命成本的 70% (统计值)[32]，开放架构通过模块级替换与技术插入降低后期升级维护

表 2 开放架构与传统封闭架构量化效益对比

Table 2 Quantitative benefit comparison between open architectures and traditional closed architectures

对比维度	传统封闭架构	开放架构实践	文献来源
新增软件功能块集成周期	18～33个月	OMS基础设施在B-2上集成约6周	[26,28]
吊舱/载荷平台集成周期	单平台定制集成5～7年	AgilePod适配Scorpion飞机仅数周	[24,27]
软件复用率	逐型定制开发，跨平台复用率低	CAAS同族平台代码复用率最高90%；FACE任务软件一次构建、三型机复用	[29−30]
多厂商互操作能力	接口私有，存在供应商锁定	19个FACE可移植单元完成多厂商混合集成演示	[31]
全寿命成本结构	运维保障成本约占全寿命成本70%，升级须整机更改	模块级替换降低后期升级维护成本；但尚无受审项目完成MOSA成本效益正式量化分析	[32−33]

成本，其效益主要在全寿命周期中后段体现。同时应客观指出，美政府问责局 2025 年审查显示，受审的 20 个武器系统项目均未完成 MOSA 成本效益的正式量化分析[33]，即现阶段开放架构的量化效益仍以个案事实与量级估计为主，尚缺系统性统计结论。这一现状从反面印证了 POA 强调分阶段可度量验证指标与出口准则 (见 4.3 节) 的必要性：唯有将效益评估嵌入开放过程本身，量化效益方能由个案经验沉淀为可考核的采办依据。上述证据表明，开放架构对我国机载光电系统具有明确借鉴价值；据此，第 3 节从顶层设计方法论、工程实现与治理机制三个层面给出针对性启示。

3 SOSA 标准对我机载光电系统架构设计的启示

3.1 顶层设计方法论启示

3.1.1 功能-逻辑-物理三域分离

SOSA 标准隐含着功能域、逻辑域、物理域 (function-logical-physical，FLP) 三域分离的产品架构设计方法论[34]。功能域定义系统需要完成的功能任务，应立足作战场景与平台使命定位，与具体实现技术剥离；逻辑域建立功能域到产品内部逻辑模块的映射关系及模块间接口协议；物理域建立逻辑域到物理实体的映射及物理实体技术细节。三域分离使各层可独立演化：功能域随作战需求变化而迭代，逻辑域随接口、算法技术发展而更新，物理域随元器件技术进步而升级。AMS GRA 的最新实践印证了这一方法论：其将逻辑架构与物理实现载体 (通用计算实体) 显式解耦，并将任务处理单元按 Level 1/2/3 三级速率分层，承认不同层级具有不同的演进节奏[11]。

将 FLP 方法应用于我国机载光电系统开放架构设计，可由用户或需求论证单位在征得行业内广泛认可的前提下，面向全行业公开定义成像、检测、识别、跟踪、制导、协同等功能域核心功能，并与研制单位充分交流，逐步深化逻辑域定义，包括光学前后端信息流处理、目标算法、数据融合和接口控制等逻辑模块及其交互协议；研制单位在承接功能域与逻辑域输入的基础上，在物理域自主定义各逻辑模块的硬件实现方案 (如 FPGA、GPU 选型) 与物理布局 (如光路设计)[14,18,34]。由此实现能力、软件、硬件"三解耦"，使功能演进、算法升级和硬件换代可独立进行。

3.1.2 工作线程标准化与特殊信号裁剪

SOSA 标准给出了传感器数据从物理采集到信息产出的完整工作线程。映射至机载光电系统，工作线程可细化为七个环节：光学前端采集目标辐射、模拟前端光电转换与信号调理、数字前端采样量化与预处理、信号处理增强与变换、目标处理检测识别跟踪、决策支持 (光电系统的核心输出)、后端处理记录与分发。工作线程标准化意味着每个环节遵循统一接口规范，数据在线程内流动时格式统一 (或格式转换规则明确)、语义明确、时序可控[14]。对于时延敏感的硬实时特殊信号，按"消息化优先、例外受控"原则实施裁剪，即以标准化消息接口为默认方式，仅对确有必要的高速模拟/同步信号保留专用通道并受控管理。

3.1.3 三域分离与工作线程的耦合映射关系

三域分离与工作线程标准化并非两条孤立主线：工作线程是功能域向逻辑域展开的主线，线程各环节对应逻辑域中的逻辑模块，环节之间的接口 (I1～I6) 则是逻辑域向物理域映射的锚点，二者耦合关系如图 1 所示。功能域由用户/论证单位主导定义并公开；逻辑域的模块划分与接口协议由研制单位承接定义；物理实现方案 (含光路布局、器件选型) 由研制单位在逻辑域约束下自

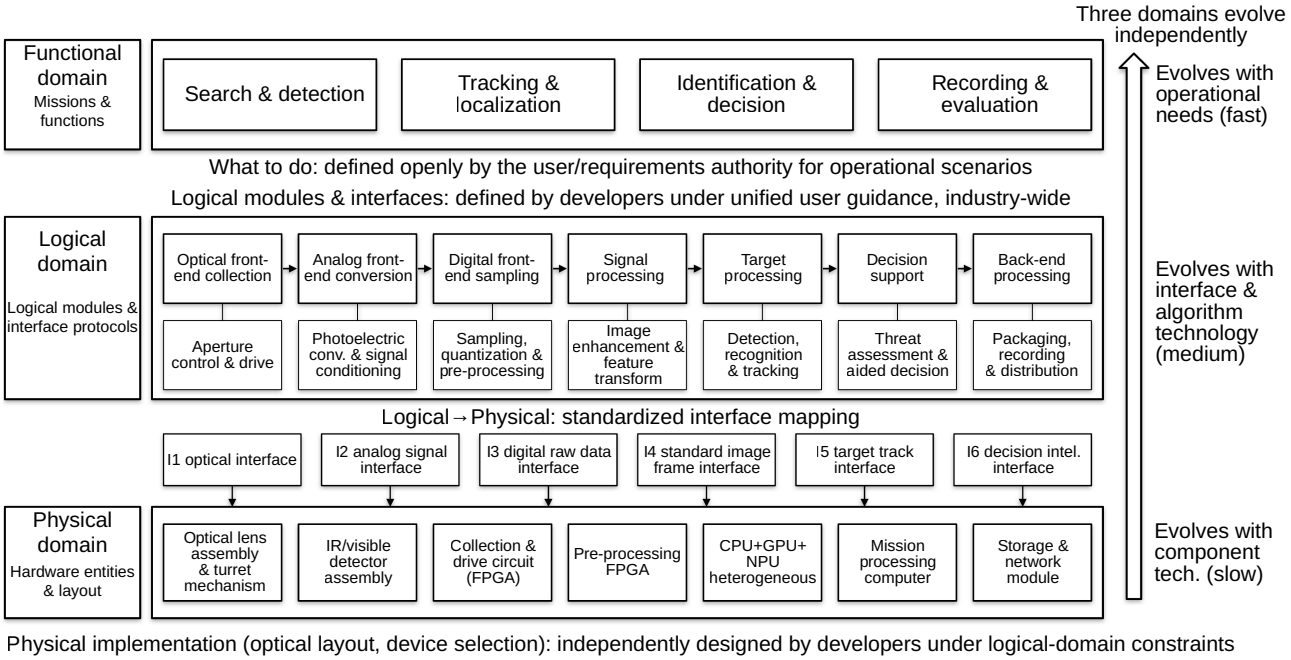


图 1 机载光电系统 FLP 三域与工作线程耦合映射框图

Fig. 1 Coupling and mapping among the FLP three domains and the working thread of airborne electro-optical systems

主设计。三域演进节奏不同——功能域随作战需求快速演化 (任务级)，逻辑域随接口与算法技术中速演化，物理域随元器件技术慢速演化；接口标准化是三域解耦、独立演进的前提。明确这一映射逻辑，可避免“三域分离”被误读为各自为政，也为后文渐进式开放提供了次序依据。

3.2 工程设计启示

3.2.1 开放式硬件架构设计

SOSA 定义的 OpenVPX 硬件平台为机载光电系统开放式硬件架构提供了直接可用的技术基础。OpenVPX 定义了模块机械尺寸、电气接口、散热方式和背板拓扑，支持 3U 和 6U 两种模块尺寸，单槽位可提供百瓦级 (6U 槽位可达数百瓦) 散热能力和数十 Gb/s 数据带宽，满足机载光电系统高带宽、强实时处理需求[35]。工程实践中建议遵循以下原则：计算平台采用 VPX 总线架构，支持多处理器并行；接口模块采用标准化连接器，支持热插拔与快速更换；电源模块冗余设计，支持故障自动切换；散热兼容风冷与导冷，适应不同机型环境条件[4,34]。

典型应用场景示例一 (对空/对地任务快速重构)：载机上午执行对空搜索警戒任务，下午需转为对地高分辨率成像侦察。传统紧耦合架构下须更换整塔并重新联调，周期以周计；采用开放式硬件架构后，外场即可换插 GPU 处理板与光纤收发板、加载对应配置，在小时级任务窗口内完成重构。AgilePod 吊舱适配 Scorpion 飞机仅需数周的实践[24]，证明了该路径的工程可行性。

3.2.2 服务化软件架构重构

SOSA 软件架构采用服务化设计理念，将传感器功能封装为可独立部署和调用的服务组件，通过服务注册、发现和调用机制实现系统动态组合，较传统单体软件具有模块化程度高、耦合度低、可扩展性强、容错性好等优势[35]。应用于机载光电系统，可将光学成像、目标检测、目标跟踪、态势评估等功能封装为独立服务，运行时按任务需求动态加载，闲置服务保持休眠以节省资源；某服务故障时可自动切换备用组件或降级运行。

典型应用场景示例二 (红外小目标探测跟踪链路)：在典型防空预警任务中，“搜索-截获-跟踪-识别”链路以标准化服务编排方式运行。当需引入新型红外图像小目标识别算法[10] 时，可按如下流程实现算法的不停机、不下装迭代：将新算法封装为独立服务并进入“影子模式”，系统原图像采集、目标跟踪与数据记录等服务保持连续运行，任务链路不中断；新算法与原算法并行接收相同的输入数据流，但仅记录其处理结果而不向链路输出；比对阶段持续统计两种算法的检出率与虚警率，当新算法指标达标并经测评确认后，将其切换为主用服务，原算法转为后退备选算法。由此，算法能力可在任务链路

不中断的前提下完成平滑升级，规避了传统模式下“停机-换版试验-回归”的长周期更改流程，实现用户边用边升级敏捷迭代升级。

3.2.3 即插即用机制实现

SOSA 定义的即插即用机制包括模块自动发现、自动配置和能力协商三个环节[14,36]：模块自动发现通过电子标签 (E-Tag) 实现，系统上电或模块插入时经 I2C/SPI 总线读取模块标识、类型、版本与供应商信息；自动配置根据模块类型从配置数据库检索初始化参数与接口绑定信息；能力协商在初始化后查询模块功能能力与性能指标，与任务需求匹配确定工作模式与资源分配。机载环境的振动、冲击、电磁干扰与任务关键性，要求采用硬件看门狗、双冗余配置通道和加密认证等增强措施[35-36]。

典型应用场景示例三 (外场挂飞前快速换装)：试验机挂飞前需将中波红外探测器组件换装为长波组件。具备即插即用能力后，新组件插入即被 E-Tag 自动识别，配置库自动匹配驱动参数与接口绑定，通电自检由小时级压缩至分钟级，显著提升多构型试验效率。

3.3 机制设计启示：合规可考核的开放治理

SOSA 及其后续演进表明，开放架构能否落地，关键不在技术条款本身，而在配套治理机制。SOSA 以剖面快照、x242 验证程序、x215 认证政策、独立验证机构和认证测试工具构成完整合规认证生态[36]；因此，机载光电系统开放架构必须同步建设“用户掌握架构定义权”的合规治理机制。用户/论证单位主导功能域定义与合规分级；行业层面将接口与合规要求条款化、编号化，做到每条可验证、可考核；依托独立第三方机构开展测评，避免研制单位自证合规。缺少这一机制，开放要求将沦为纸面条款，供应商锁定问题无法根除。

4 渐进式开放架构 (POA) 设计方法

4.1 未来作战需求与机载光电系统能力挑战

1) 分布式协同作战要求。未来作战呈多平台、多传感器、多域协同特征，机载光电系统不再作为孤立载荷运行，而是分布式传感器网络的关键节点，须具备网络化接入、数据共享与协同处理能力[6,37]。核心挑战在于接口标准化与数据互操作：传统系统数据格式与接口协议绑定特定平台，难以跨平台共享，架构设计之初即须融入网络化协同要素。2) 智能作战驱动的感知决策一体化要求。智能作战要求光电系统在传感器端完成目标识别、威胁评估与辅助决策，大幅缩短杀伤链闭合时间[37-38]；先进智能算法计算量大，与机载平台资源约束形成矛盾，须通过异构计算、模型压缩与云边协同解决，开放架构为此提供模块化载体。3) 低尺寸、重量与功耗 (Stringent airborne size, weight and power，SWaP) 约束下的性能极致化要求。平台低可观测需求持续压缩光电系统 SWaP 预算[39]，而作战对作用距离、分辨力、响应速度的要求持续提升；开放架构可通过模块化组合实现性能按需配置，并支持新型低 SWaP 高算力器件快速替换，加速技术红利向作战能力转化。

4.2 POA 总体框架与设计原则

考虑我国机载光电系统研制的现实基础与传统架构的历史惯性，全面推行 SOSA 式开放架构面临现有系统改造周期长、成本投入大、技术风险高、模块供应商生态尚不成熟等困难。为此，本文提出渐进式开放架构 (POA) 设计方法，核心思想是在保持系统核心能力稳定的前提下，通过分层解耦、逐步开放，实现从封闭架构向开放架构的平滑过渡，总体框架如图 2 所示。

POA 遵循四项设计原则。1) 兼容并蓄：充分考虑现有系统技术积累与资产复用，避免推倒重来。2) 分层推进：按应用层、服务层、硬件层分阶段实施，优先开放风险低、难度小的层次，积累经验后再推进深层次开放。3) 风险可控：每个开放步骤均设回退机制与验证评估节点，确保系统能力不因架构改造而退化。4) 用户主导：用户/论证单位掌握架构定义权与合规分级权，从使用场景出发做好功能域能力论证，避免对技术细节过度把关；研制单位承接功能域需求与开放架构标准，在用户顶层指导下，做好逻辑域接口协议制定与物理域技术选型[11,14,34]。此外，模块粒度划分可借鉴 AMS GRA“最小可采购单元”思想：以能够独立采购、独立替换、独立验证的最小单元划定开放粒度，避免因划分过细导致集成成本不降反升[11]。

4.3 三阶段实施路径与验证指标

第一阶段为应用层开放，目标是将算法软件与底层平台解耦，实现探测、识别、跟踪算法的可替换、可竞赛。关键措施包括：定义统一的应用软件接口规范，将现有算法封装为符合规范的组件；统一模型与数据格式；建设算法货架与公开测评集，支持组件分类存储、版本管理与按需检索。该阶段风险最低，可在不改变现有硬件平台的前提下实施；主要风险为接口语义不一致，应

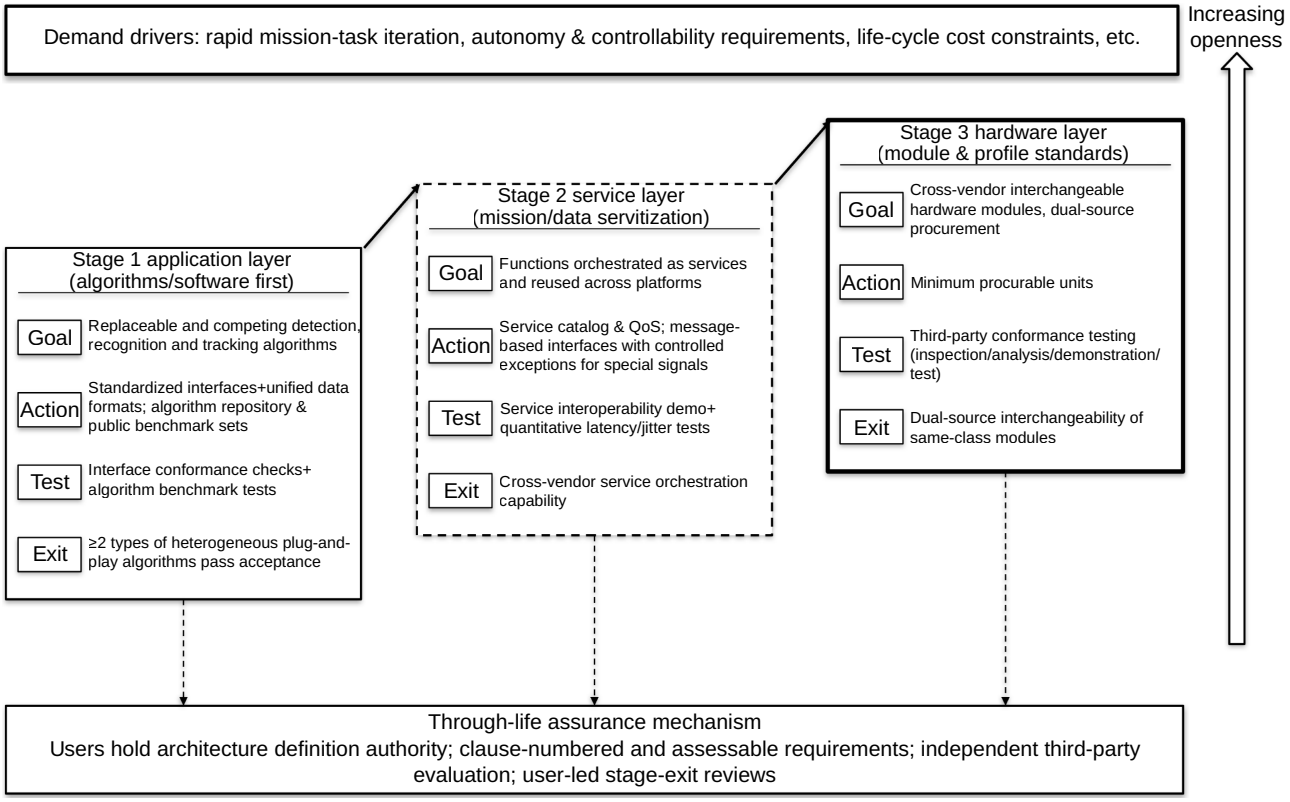


图 2 POA 三阶段实施路径与贯穿保障机制

Fig. 2 Three-stage implementation path of POA and its through-life assurance mechanism

以回归测试集兜底并保留原算法热备回退。

第二阶段为服务层开放，目标是将平台功能封装为标准化服务，实现功能的服务化编排与跨平台复用。关键措施包括：将图像采集、数据存储、通信传输等平台功能封装为服务接口；建立服务目录与服务质量 (quality of service，QoS) 机制；部署服务注册中心与服务总线，支持异步消息传递与事件触发；接口默认消息化，特殊信号按“例外受控”原则管理。该阶段须对现有平台软件重构，主要风险为时序确定性下降，应为关键链路保留直传旁路。

第三阶段为硬件层开放，目标是将硬件平台重构为开放式模块架构，实现硬件模块跨厂商互换与双源采购。关键措施包括：将系统硬件分解为符合 3U VPX 剖面的模块并完成国产器件映射；制定光电特殊接口裁剪规范；按“最小可采购单元”划定模块粒度；建立模块认证与测试体系[4,11,34-35]。该阶段投入大、周期长、风险高，宜在前两阶段积累充分经验后推进。各阶段的验证指标与出口准则按“条款编号化、方法分级化、测评独立”设计，见表 3。

4.4 适配性与风险分析

直接照搬 SOSA 模式存在适配性风险，须立足国情差异开展分析并制定对策。1) 工业体系差异：美国已形成成熟的模块级供应商生态，我国光电整机厂所一体化程度高、模块级供应链尚未形成，开放后可能面临“无第二源可竞争”的风险；对策是以算法货架先行培育生

表 3 POA 三阶段验证指标与出口准则

Table 3 Verification metrics and exit criteria of the three POA stages

阶段	开放对象	关键验证指标	验证方法	出口准则
应用层开放	算法组件	接口一致性；算法性能基准 (检出率、虚警率、跟踪精度)	检查＋试验	不少于2类异构算法“即插即用”通过验收
服务层开放	平台服务	服务互操作性；端到端时延与抖动；QoS达标率	演示＋试验	跨厂商服务编排演练成功且指标达标
硬件层开放	硬件模块	剖面符合性；电气/机械/散热兼容性；模块互换性	检查＋分析＋演示＋试验	同级模块双源互换装机验证通过

态，硬件层开放待生态初步形成后推进。2) 采办制度差异：美国已将 MOSA 纳入法定义务并以模块为采购对象，我国装备采购以整机定型为主；对策是以“最小可采购单元”对接现有定型流程，在定型文件中明确模块级接口与合规要求。3) 机载平台约束差异：国内部分机型 SWaP 与散热条件更为严苛，全面套用 OpenVPX 剖面可能付出体积重量代价；对策是按 3U VPX 优先、按需裁剪的原则确定剖面，并制定光电特殊接口裁剪规范。4) 数据链路与安全差异：现役平台总线体制多样且涉密环境要求严格，直接套用 SOSA 消息模型可能与现役总线冲突；对策是设置总线网关适配层，并按红黑边界实施安全分区与加密认证。

针对国产替代场景，POA 的适配性体现在以下三个方面。1) 器件映射：将国产 CPU/GPU/FPGA/NPU 器件按功能剖面映射入库，形成“剖面不变、器件可换”的国产替代通道。2) 操作系统适配：服务层接口规范与具体操作系统解耦，支持国产实时操作系统部署。3) 边界管理：在进口器件与国产器件混用过渡期，通过隔离器/适配器实施边界管理，将差异封闭在适配层内，保证架构主干稳定。由此，POA 既是开放架构的过渡路径，也是自主可控的落地路径。

5 结　论

本文围绕 SOSA 开放架构及其对我国机载光电系统架构设计的启示开展系统分析，主要结论如下：

1) SOSA 在美军 MOSA 标准谱系中占据“标准之标准”的独特定位，通过引用 FACE、OpenVPX/VITA、MORA 等标准并补充传感器特有内容，形成覆盖物理接口到软件的全栈开放架构规范；其配套的剖面快照、独立验证与合规认证生态，使开放性成为可考核的合同条款。以 AMS GRA v14.0 为代表的最新演进，进一步将开放要求条款化、分级化、可验证化。

2) SOSA 在顶层方法论与工程实现两个层面对我国机载光电系统研制均有借鉴意义。功能-逻辑-物理三域分离与工作线程标准化为敏捷低成本升级和开放供应链生态构建提供方法指导，二者通过 I1 ~ I6 接口形成耦合映射；开放式硬件平台、服务化软件架构与即插即用机制为技术落地提供实现路径；合规可考核的治理机制是开放架构落地的根本保障。公开案例数据表明，开放架构在集成周期与软件复用率维度已形成数量级量化的工程证据，但其全寿命成本效益仍待系统性量化验证，这进一步凸显了建立分阶段可度量效益评估机制的必要性。

3) 面向分布式协同作战、智能作战与低 SWaP 约束三大需求，本文提出的 POA 设计方法，通过应用层、服务层、硬件层三阶段递进开放，辅以逐阶段验证指标、出口准则与风险回退机制，兼顾开放收益与改造风险；针对中美工业体系、采办制度、平台约束与安全差异的适配策略，以及对国产替代场景的器件映射与边界管理设计，使 POA 同时成为自主可控的落地路径。

后续工作将围绕 POA 的功能域定义示范、算法货架建设与验证环境构建展开，推动本文方法在型号论证中的工程应用。

作者贡献

高于山：完成研究资料的收集与分析，负责论文全文写作；张菁：指导论文选题与修改；黄俊：对机载光电系统未来发展方向进行总体把关；邓瑛：对 SOSA 技术谱系定位进行总体把关和论文修改；段一凡：梳理 SOSA 技术数据与模块的交互关系。

利益冲突

所有作者声明无利益冲突

参考文献

1. DAVIDSON S. The Sensor Open Systems Architecture (SOSA) initiative in a nutshell[EB/OL](2018-10-24) [2026-05-06]. https://ndia.dtic.mil/wp-content/uploads/2018/systems/Thurs_21371_Davidson.pdf
2. The Open Group. SOSA® (Sensor Open Systems Architecture) business guide, edition 1.0: G177[EB/OL]. (2022-06-07) [2026-05-06]. https://www.opengroup.org/library/g177.
3. Zhang Q R, Qu K E. Studies on modular open avionics system architecture standard[J]. *Avion Technol*, 2022, **53**(2): 19–26.
张起睿, 曲卡尔. 模块化开放式航空电子系统架构标准研究[J]. 航空电子技术, 2022, **53**(2): 19–26.
4. Qin Q, An S D, Li N F. Review of sensor open systems architecture (SOSA)[J]. *Inf Technol Informatiz*, 2025, (2): 99−102.
秦琪, 安书董, 李念霏. 传感器开放式系统架构 (SOSA) 研究综述[J]. 信息技术与信息化, 2025, (2): 99−102.
5. Fang X L, Zhou X Q, He C, et al. Research on open architecture of new-generation unmanned aerial vehicles for the digital-intelligent era[J]. *Syst Eng Electron*, 2026, **48**(7): 2394–2403.
方学立, 周潇茜, 贺诚, 等. 面向数智时代的新型无人飞行器开放式架构研究[J]. 系统工程与电子技术, 2026, **48**(7): 2394–2403.
6. Guo C, Pan H. Enlightenment on the evolution of US open system architecture for airborne weapon development[J]. *Tact Miss Technol*, 2025, (4): 39–49.
郭超, 潘辉. 美国开放式系统架构演变对机载武器发展的启示[J]. 战术导弹技术, 2025, (4): 39–49.
7. Hu M C. Concept and system architecture of open phased array[J]. *J Radars*, 2023, **12**(4): 684–695.

胡明春. 开放式相控阵概念与系统架构[J]. 雷达学报, 2023, **12**(4): 684–695.

8. Hou W, Li T, Li C L, et al. Overview of the development of aviation electro-optical turret and technology[J]. *Infrared Laser Eng*, 2024, **53**(9): 20240203.
侯旺, 李涛, 李翀伦, 等. 航空光电转塔技术发展综述[J]. 红外与激光工程, 2024, **53**(9): 20240203.
9. Quan Q K, Pan Z F. Application of helicopter-mounted distributed electro-optical system in complex environments[J]. *Dual Use Technol Prod*, 2025, (4): 28–33.
权清科, 潘枝峰. 复杂环境下直升机载分布式光电系统的应用进展[J]. 军民两用技术与产品, 2025, (4): 28–33.
10. Qiu Z, Zhang J L, Wan Z S, et al. An infrared image small target recognition method for airborne optoelectronics[J]. *Laser Infrared*, 2025, **55**(9): 1466–1474.
邱征, 张家利, 万震松, 等. 一种面向机载光电的红外图像小目标识别方法[J]. 激光与红外, 2025, **55**(9): 1466–1474.
11. AFLCMC/WA. Agile mission suite government reference architecture (AMS GRA) v14.0[EB/OL]. (2026-04) [2026-05-06]. https://github.com/open-arsenal/ams-gra.
12. Maier A, Vega B, Powell H, et al. Integrating open systems architecture models for next generation cockpits: a systems engineering approach[C]//*Proceedings of the 2020 Annual General Donald R. Keith Memorial Capstone Conference*, 2020: 8–13.
13. DEVCOM C5ISR Center. C4ISR/EW modular open suite of standards (CMOSS) interoperability requirements specification (IRS) v1.2 / MORA specification v2.5 / VICTORY standard specifications v1.10[EB/OL]. (2025-10) [2026-05-06]. https://sam.gov/opp/fed0b08539ab448c8374cc0de4286470/view.
14. The Open Group. Reference implementation guide for the SOSA® technical standard[EB/OL]. (2022-11-28) [2026-05-06]. https://publications.opengroup.org/g227.
15. Collier C P, Lipkin I, Davidson S A, et al. Sensor Open System Architecture (SOSA) evolution for collaborative standards development[J]. *Proc SPIE*, 2017, **10205**: 1020502.
16. The Open Group. Technical Standard for SOSA Reference Architecture, Edition 2.0 (Snapshot 3): Appendix of Directed Energy Weapon Systems (DEWS)[EB/OL]. (2025-06-03) [2026-05-06]. https://publications.opengroup.org/s251
17. The Open Group. Technical standard for SOSA reference architecture, edition 2.0 (Snapshot 3): appendix of SOSA spacecraft avionics standard content[EB/OL]. (2025-06-03) [2026-05-06]. https://www.opengroup.org/sosa/pubs.
18. Cain J, Stuessy A, Tokar J, et al. Signal processing applications of the Sensor Open Systems Architecture for missile seekers[J]. *Proc SPIE*, 2024, **13048**: 1304808.
19. SRC Inc. Agile Condor high-performance embedded computing [EB/OL]. [2026-05-06]. https://www.srcinc.com/pdf/whitepaper-agilecondor.pdf
20. Barnell M, Raymond C, Capraro C, et al. Agile Condor: a scalable high performance embedded computing architecture[C]//*2015 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*, 2015: 1–5. https://doi.org/10.1109/HPEC.2015.7322447.
21. Liang H, Zhang Z W, Hu J Y, et al. Capabilities analysis and application review of the US military agile pod[J]. *Aero Weaponry*, 2025, **32**(5): 23–30.
梁红, 张志炜, 胡江玉, 等. 美军敏捷吊舱能力分析及应用综述[J]. 航空兵器, 2025, **32**(5): 23–30.
22. GA-ASI. GA-ASI successfully demonstrates high-powered computing at the edge with AFRL's Agile Condor Pod[EB/OL]. (2020-09-03) [2026-05-06]. https://www.ga-asi.com/ga-asi-successfully-demonstrates-high-powered-computing-at-the-edge-with-afrl-s-agile-condor-pod.
23. AFRL. AFRL's PNT AgilePod achieves flight test objectives[EB/OL]. (2021-12-16). https://afresearchlab.com/news/afrls-pnt-agilepod-achieves-flight-test-objectives/.
24. Alia-Novobilski M. AFRL's AgilePod shows ISR versatility during Scorpion fit test[EB/OL]. (2018-01-02) [2026-05-06]. https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/1406999/afrls-agilepod-shows-isr-versatility-during-scorpion-fit-test/.
25. Barnell M, Raymond C, Capraro C, et al. High-performance computing (HPC) and machine learning demonstrated in flight using Agile Condor®[C]//*2018 IEEE High Performance Extreme Computing Conference (HPEC)*, 2018: 1–4. https://doi.org/10.1109/HPEC.2018.8547797.
26. Howington J. FACE conformant software for aircraft survivability [EB/OL]. (2017-11-14) [2026-05-06]. https://www.quad-a.org/images/stories/2017ASECribbinsPresentations/Tues_14Nov_1630_2Howington.pdf
27. Jacobs. Jacobs AgilePod®-26: innovation takes to the skies[EB/OL]. (2023-02-01) [2026-05-06]. https://www.jacobs.com/newsroom/thought-leadership/jacobs-agilepodr-26-innovation-takes-skies.
28. Northrop Grumman Corporation. Northrop Grumman demonstrates open mission systems architecture across manned and unmanned systems[EB/OL]. (2015-07-20) [2026-05-06]. https://www.prnewswire.com/news-releases/northrop-grumman-demonstrates-open-mission-systems-architecture-across-manned-and-unmanned-systems-300114895.html.
29. Jensen D. CAAS: past, present and future[EB/OL]. (2006-10-01) [2026-05-06]. https://www.aviationtoday.com/2006/10/01/caas-past-present-and-future/.
30. Bellamy III W. FACE avionics software reuse expands with NAVAIR[EB/OL]. (2016-01-20) [2026-05-06]. https://www.aviationtoday.com/2016/01/20/face-avionics-software-reuse-expands-with-navair/.
31. Helfrich E. FACE and SOSA aligned avionics demoed by Collins Aerospace[EB/OL]. (2021-11-05) [2026-05-06]. https://militaryembedded.com/avionics/computers/face-and-sosa-aligned-avionics-demoed-by-collins-aerospace.
32. U. S. Government Accountability Office. Defense acquisitions: GAO-25-107569[R/OL]. (2025-06-11) [2026-05-06]. https://www.gao.gov/assets/gao-25-107569.pdf.
33. U. S. Government Accountability Office. Weapon systems acquisition: DOD needs better planning to attain benefits of modular open systems: GAO-25-106931[R/OL]. (2025-01-22) [2026-05-06]. https://www.gao.gov/products/gao-25-106931.
34. Korzekwa B, Meiners B, Srivastava N, et al. MBSE-enabled automation for SOSA™ interface definition and implementation[C]//*MOSA Industry and Government Summit & Expo (FACE/SOSA TIM)*, 2023.
35. Cain J A. SOSA® module integrability: achieving MOSA business capabilities and sensor performance requirements[C]//*The Open Group FACE® and SOSA® Consortia 2025 Technical Interchange Meeting*, 2025.
36. The Open Group. The Open Group® SOSA® conformance certification program: conformance certification policy: X215[EB/OL]. (2024-09-10) [2026-05-06]. https://www.opengroup.org/library/x215.
37. Sang C, Shi X Y, Cheng W, et al. Analysis and trend assessment of

foreign intelligent airborne equipment development in 2025[J]. *Air Space Def*, 2026, **9**(2): 124–134.
桑晨, 施新宇, 成炜, 等. 2025 年国外智能机载装备发展态势分析与趋势研判[J]. 空天防御, 2026, **9**(2): 124–134.

38. Ostler J, Stütz P. Airborne optical sensing: supporting robust electro-optical multi-target tracking with real-time raycasting and cascading data association[C]//*2025 28th International Conference on Information Fusion (FUSION)*, 2025: 1–8. https://doi.org/10.23919/FUSION65864.2025.11123950.
39. Asida N, Lasri K. Empowering UAV EO systems through innovative low-SWaP high-performance IR optical designs[J]. *Proc SPIE*, 2025, **13470**: 134700I.

作者简介

【通信作者】高于山 (1992-)，男，博士，复杂航空系统仿真全国重点实验室工程师，研究方向：开放式架构设计论证与研究。
E-mail：1571922388@qq.com

Analysis of the US SOSA open architecture and a progressive open design method for China's airborne electro-optical systems

Gao Yushan*, Zhang Jing, Huang Jun, Deng Ying, Duan Yifan

National Key Laboratory of Simulation for Complex Aeronautical Systems, Beijing 100076, China

Abstract

Significance Airborne electro-optical (EO) systems are key sensors at the front end of the kill chain, and their ability to iterate rapidly and upgrade at low cost directly affects the operational effectiveness of the platform. Traditional airborne EO systems, however, are mostly delivered as physically integrated turrets or pods, in which detectors, processors and display-control equipment are tightly coupled, interface protocols are proprietary, and functions are solidified in dedicated processing hardware. As a result, capability upgrades are slow, costly and locked to single vendors. To solve such problems of tightly coupled C4ISR architectures, poor equipment reusability, protracted development cycles and escalating costs, the US Department of Defense has pursued open systems architecture initiatives since the 1990s under the top-level guidance of the modular open systems approach (MOSA). Among the resulting standards, the sensor open systems architecture (SOSA) has become the authoritative open architecture specification for sensor systems. Although domestic research on SOSA has accumulated considerable results in standard interpretation, interface specification analysis and local application of VPX hardware platforms, most of it remains at the level of technical translation, and a systematic transition method tailored to China's airborne EO systems is still absent. A systematic analysis of SOSA's technical concept, architecture ecosystem and engineering methodology, together with a feasible open design method for China's airborne EO systems, is therefore of practical significance.

Progress The SOSA open architecture is systematically analyzed. SOSA holds a unique "standard of standards" position within the MOSA spectrum: it references existing standards such as FACE, OpenVPX/VITA and MORA, supplements sensor-specific content, and abstracts a sensor system into mission, functional and service layers with six functional module groups. A complete conformance and certification ecosystem has been established, including Conformance Sets, the x242 verification procedure, the x215 certification policy, independent Verification Authorities and certified test tools. Engineering practices such as the Agile Condor pod have demonstrated SOSA's capability to support rapid iteration and cross-platform adaptation, and the agile mission suite government reference architecture (AMS GRA) v14.0, released by the US Department of the Air Force in April 2026, further transforms openness requirements into numbered, tiered and verifiable compliance provisions. Based on publicly reported case data, the quantitative benefits of open architectures over traditional closed architectures were compared in terms of integration cycle, software reuse rate and life-cycle cost, with the caliber of each figure (empirical value, engineering measurement, demonstration condition, statistical value or upper bound) explicitly annotated. The comparison shows that the integration cycle of a new software block has been reduced from an empirical 18-33 months to about six weeks in open mission system demonstrations, that software code reuse of up to 90% has been achieved among helicopter platforms of the same family, and that operation and support costs account for approximately 70% of the total life-cycle cost, where open architectures mainly

*Correspondence: Gao Y S, E-mail: 1571922388@qq.com

deliver benefits through module-level replacement and technology insertion. Systematic implications for China's airborne EO systems are then distilled. At the methodological level, the function-logical-physical (FLP) three-domain separation methodology is refined: the functional domain is defined openly by the user or the requirements-authoring organization, the logical domain is defined by developers under unified guidance, and the physical domain is independently designed by developers under logical-domain constraints, so that the three domains can evolve independently at different paces. The EO working thread is standardized into seven links, namely optical front-end collection, analog front-end conversion, digital front-end sampling, signal processing, target processing, decision support and back-end processing, and its coupling and mapping relationship with the three domains is clarified through a dedicated block diagram with interface anchors I1-I6. At the engineering level, implications concerning open hardware architecture, service-oriented software architecture and plug-and-play mechanisms are elaborated with concrete application scenarios drawn from typical EO detection and tracking missions. At the mechanism level, a user-led, clause-numbered and assessable conformance governance mechanism is emphasized. Furthermore, a progressive open architecture (POA) design method is proposed. POA follows four principles: compatibility with existing assets, layered progression, controllable risk and user leadership. A three-stage implementation path is constructed: application-layer openness, which decouples algorithms from the platform and makes detection, recognition and tracking algorithms replaceable and competing; service-layer openness, which encapsulates platform functions as standardized services for cross-platform reuse; and hardware-layer openness, which restructures hardware into standardized module profiles and enables cross-vendor interchange and dual-source procurement. For each stage, objectives, key measures, risk fallback strategies, verification metrics and exit criteria are specified. Adaptability and risk analyses are conducted with respect to the differences between Chinese and US industrial systems and acquisition regimes, stringent airborne size, weight and power (SWaP) constraints, data-link and security requirements, and domestic substitution scenarios involving indigenous chips and operating systems, and a "profile unchanged, devices replaceable" substitution channel is established through device mapping.

Conclusions and Prospects The analysis confirms that SOSA, supported by its conformance ecosystem, has evolved from a technical standard into assessable compliance governance, and that open architectures have produced verifiable engineering evidence of order-of-magnitude reductions in integration cycle and substantial improvements in software reuse, while systematic life-cycle cost-benefit quantification remains an open issue. The FLP three-domain separation and the working-thread standardization provide methodological guidance for agile low-cost upgrades and for building an open supply-chain ecology, and the proposed POA method offers a smooth, controllable and stage-wise transition path from closed to open architectures for China's airborne EO systems. The conclusions provide a basis and reference for the development of China's airborne EO systems and for the demonstration of their open architecture roadmap. Future work will focus on functional-domain definition pilots, algorithm repository construction and verification environment development for POA, so as to promote the engineering application of the proposed method in equipment demonstration programs.

Keywords: sensor open systems architecture (SOSA); airborne electro-optical system; open architecture; progressive open architecture (POA); modular open systems approach (MOSA)

Gao Y S, Zhang J, Huang J, et al. Analysis of the US SOSA open architecture and a progressive open design method for China's airborne electro-optical systems[J]. *Opto-Electron Eng*, 2026, **53**(10): 260127; DOI: 10.12086/oee.2026.260127

Opto-Electronic Journals Group
www.oejournal.org

扫描二维码，获取 PDF 全文