

面向切面思想的无线电通信导航监视 系统设计与分析

雷国志

(西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要: 以机载无线电通信导航监视(CNS)领域综合化设计为背景, 解决系统综合后复杂度高、维护性差、适航难度大等问题, 提出了面向切面思想的系统设计方法; 该方法基于软件设计领域的面向切面思想, 首先从系统的领域模型、业务模型、关注点分离三个维度进行机载CNS系统需求分析, 然后从系统架构设计、组件设计、组件编制、运行部署4个过程进行机载CNS系统设计, 最后以真实案例介绍了通过新增功能模块和修改系统蓝图实现需求变更的过程; 面向切面思想的综合化CNS系统从可维护性和适航符合性两个方面进行综合评估, 可以得出文章提出的方法能够提升系统的维护性, 有助与产品适航符合性验证, 可以为射频综合CNS系统适航性研究奠定基础。

关键词: 通信导航监视; 综合射频; 面向切面; 维护性; 关注点分离

Aspect-Oriented Analysis and Design of Airborne Communication Navigation and Surveillance System

LEI Guozhi

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Based on the integrated design in the field of airborne radio communication, navigation and surveillance (CNS), a system design method based on aspect oriented idea is proposed to solve the problems of high complexity, poor maintainability and great airworthiness after system integration. Based on the aspect oriented idea in the field of software design, this method first analyzes the requirements of airborne CNS system from the three dimensions of system domain model, business model and separation of concerns, and then designs airborne CNS system from the four processes of system architecture design, component design, component preparation and operation deployment. Finally, a real case is introduced to realize the process of requirement change through adding functional modules and modifying the system blueprint. Through the comprehensive evaluation of the aspect oriented integrated CNS system from the two aspects of maintainability and airworthiness compliance, it can be concluded that the method proposed in this paper can improve the maintainability of the system, contribute to the verification of product airworthiness compliance, and lay a foundation for the airworthiness research of RF integrated CNS system.

Keywords: CNS (communication navigation and surveillance); integrate RF; aspect-oriented; maintenance; concerns separation

0 引言

机载CNS系统是飞机接入新航行系统所必须的机载系统, 涉及的机上操作与通信导航监视业务关联度高, 其核心的无线电收发信机也有着相似的信号处理架构和相同的发展趋势, 因此机载CNS系统经常作为一个整体进行综合化设计^[1]。机载CNS系统的综合化方法随着电子技术发展阶段而有所变化, 目前综合化方法是通过公用和共用资源在少量硬件模块上集成多个无线电功能。这种方式已经在军机综合射频和军舰综合射频领域取得了一定成果^[2-3], 实现了预期的功能性能, 但由于系统过于复杂, 内部功能的耦合度高, 也会导致系统维护性差, 适航审查困难。

另一方面, 软件工程领域也存在“代码分散”和“代

码纠缠”使得系统变得复杂、难以扩展和难以重用的问题。为解决此类问题, 很多研究者提出采用面向切面的编程技术^[4], 通过“关注点分离”将系统功能划分为功能性需求和非功能性需求两类, 并分别设计实现, 从而保证了系统功能与非功能的独立, 进而实现关注点模块的独立重用^[5-7]。

传统的机载综合射频系统都围绕产品的功能需求进行系统设计^[8], 与非功能需求相关的设计研究都集中在可靠性、维修性、测试性、保障性等专业技术领域^[9], 对于“参数修改功能”这类与系统功能相关但不直接实现功能的非功能性需求研究甚少, 这导致这类非功能性需求的设计分散在不同功能模块中, 成为导致系统内模块功能耦合度

收稿日期: 2021-09-19; 修回日期: 2021-10-27。

作者简介: 雷国志(1982-), 男, 辽宁鞍山人, 硕士, 高级工程师, 主要从事航空电子方向的研究。

引用格式: 雷国志. 面向切面思想的无线电通信导航监视系统设计与分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 204-208, 225.

高，系统维护性差的主要原因。因此本文以典型机载 CNS 系统的综合化设计为背景，提出面向切面思想的设计方法，解决由于资源高度复用、需求交叉依赖、功能模块耦合度高的问题，提高系统的维护性和可扩展性。

1 机载 CNS 设计

1.1 需求分析

为了使系统综合效益最大，系统集成功能的领域模型、业务模型和方法学应尽可能一致，使被综合功能在关注点分离后，各功能之间具有一致的“相关性”和“形式规范性”^[10]。其中，相关性一致能够使得被综合的各功能的业务流图的复杂度基本一致，形式规范性一致使得关注点分离后的功能能够再次编织成功。因此面向切面思想的需求分析，建立领域模型和业务模式是基础，关注点分离是关键。下面重点从领域模型、业务模型以及关注点分离 3 个方面进行机载 CNS 系统需求分析。

1.1.1 领域模型

机载 CNS 系统领域模型分析，主要确定系统的功能、配置、操作和设计约束。领域模型分析过程与飞行器航电系统设计紧密相关，典型 CNS 系统一般有 2 部甚高频电台 (VHF)、2 部仪表着陆设备 (LOC/GS)、1 部无线电测距 (DME) 和 1 部航管应答 (ATC) 设备。无线电收发信机的设计约束如表 1 所示，机载 CNS 系统通过接收和发射无线电信号实现空地双向语音通信，航路辅助导航，机场辅助着陆以及航管监视功能。

表 1 收发信机特性

序号	应用	工作频带	数量	信号特征
1	航向接收机	108~112 MHz	2	50 kHz、调幅接收
2	甚高频电台	118~137 MHz	2	25 kHz、调幅收发
3	下滑接收机	328~336 MHz	2	150 kHz、调幅接收
4	航管应答	1~1.1 GHz	1	宽带、脉冲编码收发
5	测距设备	962~1 213 MHz	1	宽带、脉冲编码收发

1.1.2 业务模型

机载 CNS 系统业务模型分析，主要确定系统的组成、架构、数据流和工作原理，数学建模是进行业务模型分析的有效手段。业务模型分析过程与具体的实现技术相关，在射频数字一体化设计架构下^[11-12]，机载 CNS 系统的数学模型可以表示为若干个时间输入/输出自动机 (TIOA) 的集合^[13]，其中 TIOA 表示为二元组 $M = (B, H)$ ， B 是一个时间自动机 (TA) 可以通过状态转化图进行描述， $H = (I, O)$ 是将 $\sum B$ 分为输入动作和输出动作的一个划分，因 H 是一个典型的线性时不变系统，可以通过信号流图进行描述。因此无线电功能 M 的系统数学模型如图 1 所示，将来自射频前端 (或航电) 的数据经过若干个时间输入/输出自动机的处理后输出至航电 (或射频前端)。

1.1.3 关注点分离

机载 CNS 系统关注点分离过程是面向切面思想的关

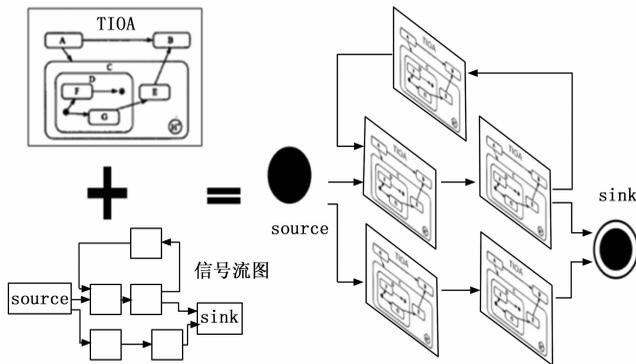


图 1 无线电功能模型

键，其核心是将系统需求分割为相互独立的功能需求和非功能需求。从前文业务模型分析得出机载 CNS 系统数学模型中的 H 和 B 是相互独立的，将 H 和 B 分别映射为核心业务功能和系统横切功能，则通过需求分析得到的功能性需求和非功能性需求也是相互独立的。

因此基于面向切面思想的机载 CNS 系统功能开发由核心业务功能开发和横切系统功能开发两部分组成。核心业务功能开发包括无线电通信、导航和监视等功能的信号处理；横切系统功能开发包括系统集成和系统应用。从图 2 看出机载 CNS 系统的核心业务功能为 VHF 语音发射、VHF 语音接收、LOC 航向接收和 ATC 航管应答等功能，横切系统功能为功能配置、参数调谐、自检维护、安全隔离、日志管理等功能，横切系统功能贯穿于全部业务功能。

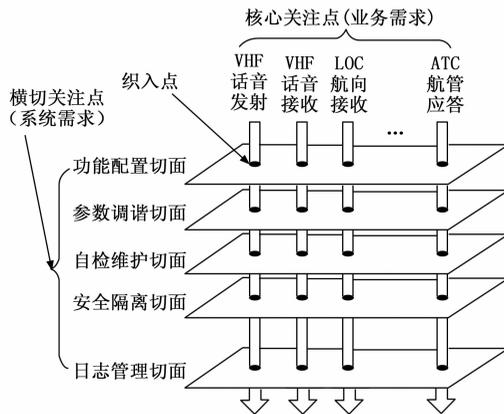


图 2 机载 CNS 系统关注点分离示意图

1.2 系统设计

需求分析确定了机载 CNS 系统的功能、性能、通用质量特性和适航性，系统设计的重点是开展系统架构、组件设计、组件编织、运行部署等设计工作。

1.2.1 系统架构设计

机载综合 CNS 系统的系统架构如图 3 所示，由天线、3 类 6 台 RRU、1 台 CRU 组成，其中 RRU (remote radio units 远端无线电单元) 靠近天线部署完成射频信号的采样并将数字信号生成为射频信号，CRU (central radio units

中央无线电单元) 部署在设备柜完成 VHF/LOC/GS/DME/ATC 等无线电信号的处理实现 CNS 系统功能。

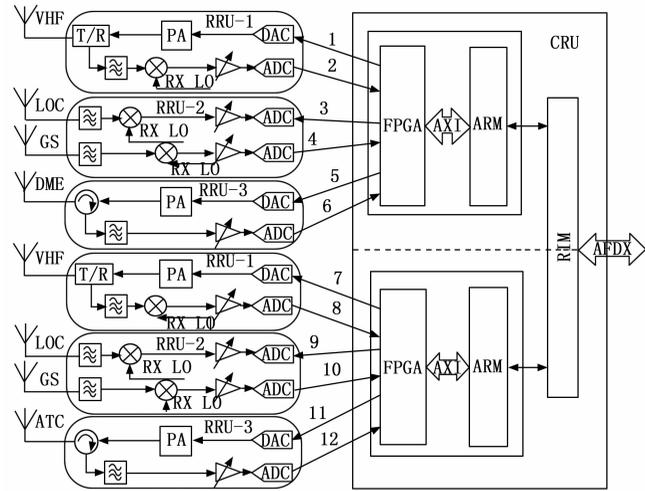


图 3 机载 CNS 系统架构

1.2.2 组件设计

从需求分析得到的数学模型可以看出，机载 CNS 系统由若干个信号处理模块组成，每个信号处理模块都是由信号处理组件加载不同算法（函数）在控制指令和配置参数下实现预期功能，因此组件设计的核心就是设计信号处理模块。

不涉及具体语言，本文采用 (OPM) 系统建模语言描述的组件信号处理模块的结构模型^[14-15]，首先采用关注点分离技术将信号处理模块组件分割为业务功能部分和横切功能两部分（如图 4）。其中左侧为业务功能部分，由业务数据的缓存、处理和封装等构成，不同的信号处理模块通过加载不同的算法实现；右侧为横切功能部分，为信号处理业务执行过程中必须和常见功能的集合，其中调谐功能按照控制指令的要求完成信号处理算法所需参数的调整，重构功能按照系统配置更新算法和重置业务数据流，暂停功能按照自检命令将状态机置于暂停状态，启动异常收集功能完成模块自检上报，状态收集功能完成模块当前工作参数和状态机状态的上报。

1.2.3 组件编织

组件编织将分别实现的业务功能组件和系统功能组件通过依赖的方式与接口进行连接，确保功能组件与横切组件的设计没有相互依赖，实现组件模块独立重用。为避免业务功能组件和横切功能组件在组合过程中产生纠缠，采用如图 5 所示的面向方面连接件组装的模型将模块级横切组件与核心业务组件进行组装。同时参考 AspectJ 利用面向方面的通知机制，在连接件的接口处加入切入点和通知，并按照通知类型在连接点调用通知执行模块级横切组件提供的功能，在面向方面连接件中进行编织^[16]。

1.2.4 集成和部署

系统集成和部署是机载 CNS 系统实现预期功能的主要

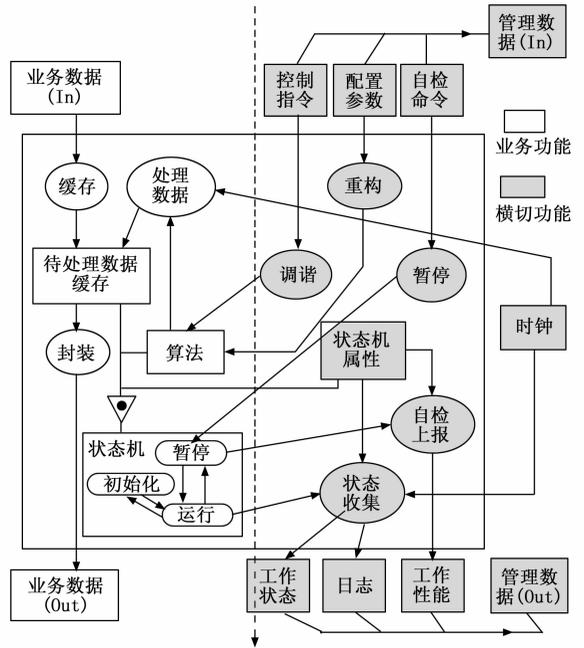


图 4 信号处理模块 OPM 模型

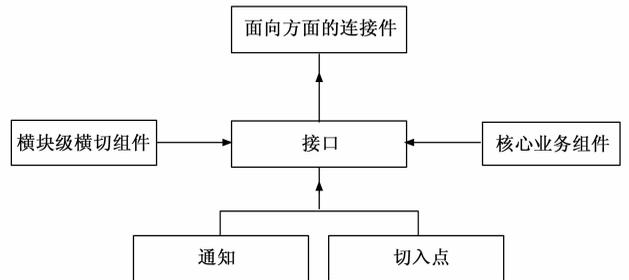


图 5 面向方面连接件组装的模型

活动，本文采用加载蓝图的方式实现功能部署和系统集成。从图 6 系统集成部署模型可以看出，蓝图由功能部署图、信号流图和组件装配图嵌套组成，其中组件装配图描述了组件模型信息和组件编织方式，信号流图描述了组成功能线程的组件模块之间的连接关系和接口定义，功能部署图描述了功能线程所需的计算资源以及资源的物理分布。在系统通过人工（或自动）蓝图加载的方式完成系统模型实例化后，在系统综合模块的统一调度下实现多个无线电信号的处理以及航电系统中业务功能和维护功能的处理。

1.3 系统变更

变更是机载 CNS 系统长期演进过程重要活动，本文以图 3 中的第 2 路 VHF 语音通信功能更改为 ACARS 波形的数据收发功能为例阐述系统变更过程^[17-18]。

根据前面的分析，实现 ACARS 数据通信的信号调制解调，仅需要完成新增编码、解码和系统蓝图修改工作。其中波形编解和波形解码为新开发的信号处理模块，其余信号处理模块直接复用信号模块库，同时将 ACARS 数据接收

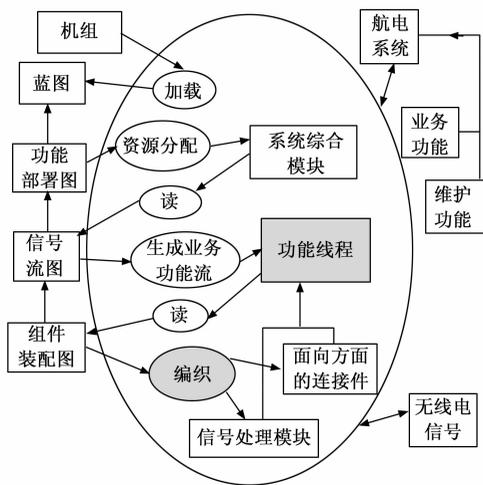


图 6 系统集成和部署过程 OPM 模型

/发射信号流图（见图 7 和图 8）添加到系统蓝图中即可，而不影响其他功能和非功能模块，提高了系统的维护性和健壮性。

新增的 ACARS 数据波形的正确性可通过文献 18 阐述的方法进行验证。

2 实验结果与分析

完成机载 CNS 系统设计后，在实验室借助 Aeroflex IFR4000 导航/通信测试仪和 Aeroflex IFR6000 航空应答机测试仪对系统的功能性能进行测试，实验结果显示采用本文方法研制的机载 CNS 系统功能具备 VHF 话音/数据功能、LOC/GS 着陆功能、DME 测距功能和 ATC 应答功能，

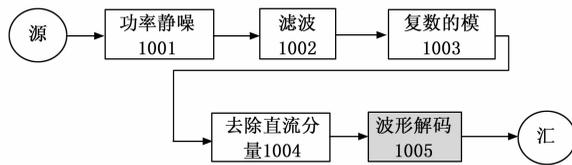


图 7 ACARS 数据接收信号流图

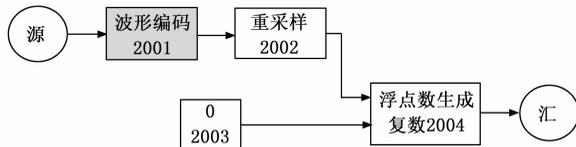


图 8 ACARS 数据发射信号流图

其性能指标满足表 1，达到 ICAO 附件 10 的要求，实验结果满足实际应用需求。

下面从提高维护性和降低适航难度两个方面综合评估采用面向切面思想设计的机载 CNS 系统。

2.1 维护性分析

为了便于定量评估系统维护性，本文按照 GB/T29834 的建议从易分析性、模块化、稳定性、易改变性、可验证性和规范性 6 个方面建立系统可维护性的 3 层指标评估体系（图 9）^[19]。通过采用模糊层次分析法（FAHP）完成系统维护性指标评测权重集 W （结果如表 2 所示），定义评价结论标准集 $U = \{A, B, C\}$ （指标选择见表 3），单因素指标权重 R ，最后采用模糊综合评判模型 $B = W \cdot R * UT = 0.933 1$ ，得出机载 CNS 系统得维护性评价为 $A^{[20]}$ 。

$$R = \{ (0, 1, 0, 0, 0) (0, 1, 0, 0, 0) (1, 0, 0, 0, 0) (0, 1, 0, 0, 0) (0, 1, 0, 0, 0) (1, 0, 0, 0, 0) (1, 0, 0, 0, 0) \}$$

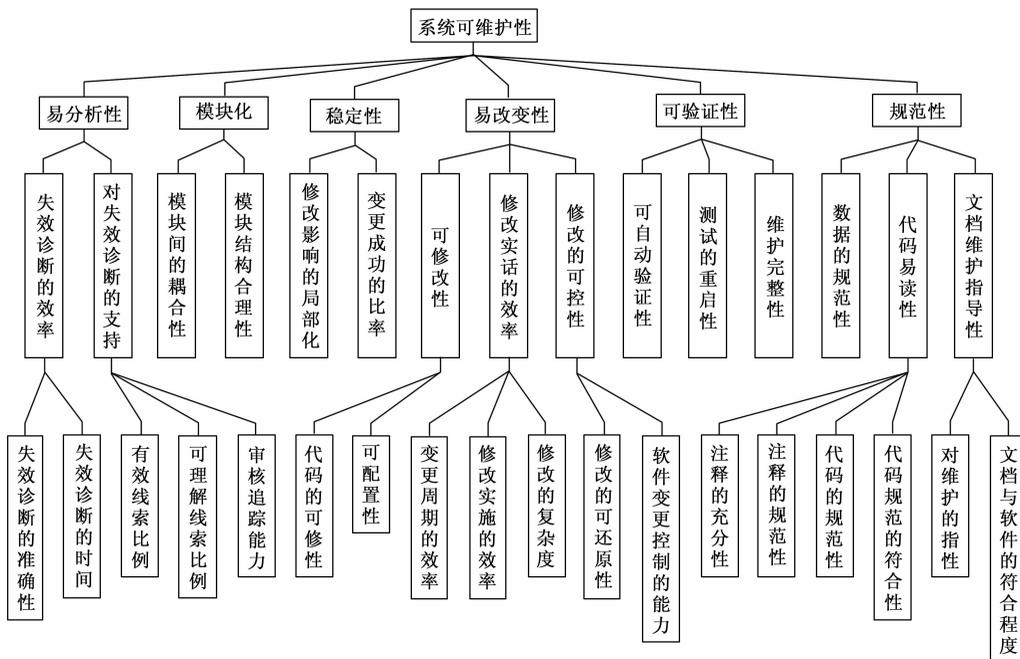


图 9 维护性指标评估体系

