

虚拟机在舰艇编队一体化防御系统中的应用

侯媛媛¹, 李江红¹, 宫巨涛², 吴亚锋¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072; 2. 航天科技九院 200 厂, 北京 100039)

摘要: 面对信息化、远程精确打击的空袭作战, 必须构建网络化、一体化的防空作战体系; 主要针对舰艇编队一体化防御系统中无线网络的不可靠性, 设计了基于嵌入式虚拟机的架构, 提出了任务的动态分配和移植算法; 首先根据作战环境中网络的拓扑条件, 虚拟机动态的将控制任务分配到可靠的无线节点中, 并实时监测网络状态, 当网络结构发生变化时, 将底层不可靠无线节点中的控制任务移植到可靠的无线节点中; 通过这种方法可以解决作战环境恶劣和无线网络本身的不可靠引起的控制的不稳定性问题, 确保防御任务的顺利进行; 仿真结果表明, 当编队一体化防御系统的链路发生故障时, 此方法能够在不改变原有控制算法的基础上, 迅速重建控制构架, 不仅适用于舰艇编队一体化防御系统这种对时间要求和安全性要求高的系统, 而且对基于无线网络的控制系统也有一定的借鉴意义。

关键词: 嵌入式架构; 任务分配; 移植; 拓扑

Application of Virtual Machine in Warship Formation Defense System

Hou Yuanyuan¹, Li Jianghong¹, Gong Jutao¹, Wu Yafeng²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Factory No. 200, Beijing 100039, China)

Abstract: In the face of information technology, long-range precision strike air combat, we must build networked, integrated air defense combat system. Due to unreliability of the wireless links and nodes in the warship formation, an embedded architecture is designed. Based on this architecture, a dynamic allocation and transplantation algorithm is proposed. According to the network topology of the operational environment, control task can be dynamically assigned to the wireless node by the virtual machine, and then network state is monitored. Our approach is to decouple the functionality from the inherently unreliable physical substrate and allow tasks to migrate/adapt to changes in the topology. This method can solve the instability problem caused by the bad environment and the wireless network. The simulation results show that when the links fault, it can reconstruct control architecture based on the same control algorithms. This is not only suitable for the integrated defense system of warship formation which is time-critical and safety-critical, but also for the control system based on wireless network.

Keywords: embedded architecture; task assignment; migrate; topological condition

0 引言

未来信息化条件下的现代海战, 呈现出立体化、多层次、全方位的特点。舰艇编队作为海军作战的主要兵力, 在作战中面临着严重的空中威胁。信息化技术的飞速发展及其在军事领域的广泛应用, 使得舰艇编队的防御表现为以信息网络为中心的体系间的对抗, 协同作战、自适应和自组织能力则显得尤为重要。

舰艇编队防御系统, 是指通过以计算机为核心的信息网络实现作战部队、武器系统、信息系统之间交互, 从而形成一个统一的整体, 充分发挥作战效能, 对来袭目标进行有效抗击的一种作战方式。能够实现信息系统的高度共享和武器资源的协同使用, 作战指挥人员可以高效地综合运用编队内各种火力和作战手段达成编队防御的目的。

由于作战环境多变, 无线网络本身的不可靠性^[1-2], 对任

务的执行效率和完成质量会产生影响, 严重时导致系统失控。针对此现象, 本文提出了一种基于嵌入式虚拟机的架构和算法。即在作战过程中, 编队系统内部结构发生变化, 引起网络的拓扑条件发生变化时, 解耦合出底层的不可靠的无线节点中的控制任务, 对其进行重新分配或移植, 迅速构建控制流, 确保控制任务的顺利进行。

1 虚拟机

针对作战环境中无线网络中的链路, 节点和拓扑条件本身的不可靠性, 本文提出了一个嵌入式的架构, 即不是在设计时将控制任务静态的映射到物理节点中, 而是在运行时将它以一个单一部件的形式分配到传感器、执行器和无线节点中。这种方法可以解耦合底层不可靠物理节点的功能, 将任务移植到可靠的物理节点中从而适应编队一体化防御系统中的网络拓扑条件的变化, 为此引入了虚拟机。

虚拟机 (VM) 与经典的系统虚拟机不同^[3], 虚拟机由多个具有存储和计算能力的无线节点组成, 通过无线节点组来维持其控制特性。它明确定义了无线节点中的控制和数据通讯机制。在防御过程中, 虚拟机实时监测网络中无线节点的状态, 虚拟机根据系统中网络的拓扑条件, 动态的将任务进行分配或移植, 即对主—从控制器及路由进行选择, 将控制任务分配到

收稿日期: 2017-03-16; 修回日期: 2017-04-18。

作者简介: 侯媛媛 (1986-), 女, 西安人, 博士研究生, 主要从事航空宇航科学与技术方向的研究。

李江红 (1970-), 男, 西安人, 硕士生导师, 主要从事嵌入式计算机、控制理论与工程方向的研究。

不同的无线节点中。虚拟机实现了无线控制网络和底层不可靠物理链路的无缝链接。

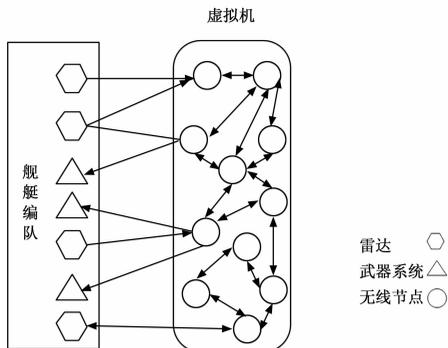


图 1 虚拟机在编队防御系统中的应用

2 虚拟机中无线节点的架构

为了保证任务在无线节点中能够任意分配和移植, 要求无线节点的参考构架如图 2 所示, 无线节点运行系统是构建在实时操作系统之上的^[4], 具体如下:

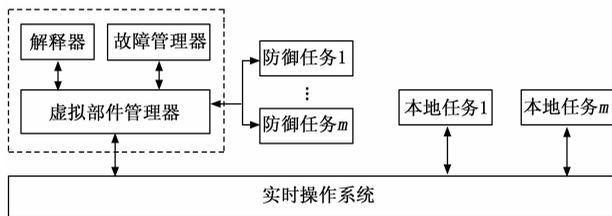


图 2 无线节点的参考架构

此外还对操作系统的功能进行了扩展:

- 1) 支持采样率的动态变化, 可以动态的激活防御任务。
- 2) 支持防御任务的动态分配和移植。

虚拟部件管理器, 管理虚拟任务而非本地任务, 虚拟任务即动态的分配到本地节点上的防御任务。虚拟部件管理器中包含有解释器和故障管理器, 当防御任务分配到无线节点时, 虚拟部件管理器则调用解释器负责对任务进行解析, 它是实时操作系统和防御任务间的接口。故障管理器用于运行时的容错处理。

虚拟部件管理器的主要功能如下:

1) 虚拟任务的移植和激活: 当程序发生故障时, 会展开任务的移植工作。任务在移植的过程中, 虚拟任务描述表以及任务所使用的所有存储块将一同被移植。如果在被移植的节点中已经定义了虚拟任务, 则只需要交换任务参数即可。另外, 在任务移植之前, 调度分析仪将对被移植的节点执行网络和 CPU 的调度分析。如果没有可以移植的节点, 将返回错误并提示系统应添加节点以胜任工作。当任务被定义后, 在激活虚拟任务前, 所在节点将执行一个本地的网络和 CPU 的调度分析, 从而确保当前任务不会影响其它的任务的运行。

2) 虚拟任务的分配: 当新增的或者本地的重新分配故障时, 则激活虚拟任务的分配工作, 虚拟部件管理则根据编队系统中的网络拓扑条件和无线节点初始的通讯和计算调度表对任务进行分配。

3) 提供透明的无线传输接口: 根据包含消息类型的信息头, 虚拟部件管理器则确定了接收消息的任务。接收任务的节点中的虚拟部件管理器首先处理这些消息, 然后再激活解释器, 执行任务。

4) 逻辑到物理地址的映射: 虚拟任务之间是通过虚拟部件管理器进行通讯的。虚拟任务彼此间并不知道其存储的物理地址, 虚拟部件管理器中存储了逻辑到物理地址的映射关系, 当虚拟任务在同一节点上时, 虚拟部件管理器直接向接收任务的缓冲区发送消息即可。

本地任务是无线节点中的静态的任务, 主要负责虚拟任务间的通讯, 对虚拟任务的管理以及维持操作系统的运行等工作。

3 防御任务的分配和移植

作战过程中, 虚拟机实时监测无线节点组的状态, 无线网络的拓扑结构, 一旦结构发生变化, 嵌入式虚拟机则会根据当时的作战情形, 重新部署防御任务。主要包括两个方面: 防御任务的重新分配和移植。

3.1 任务分配

任务分配原则为:

- 1) 确保链路质量最大化的同时使所用的链路总长度最小。
- 2) 尽量避免使用相交的路径。
- 3) 最小化共享链路的成本。以图 3 为例进行说明。

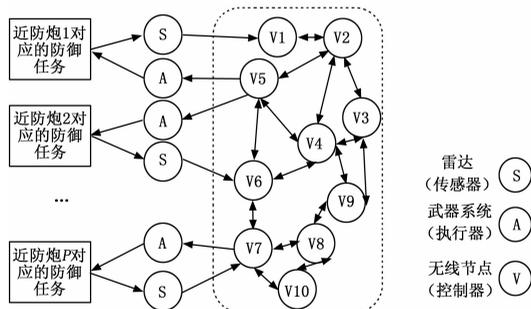


图 3 无线网络控制的参考模型

图 3 中包括 m 个无线节点和 p 个控制过程, 分别用集合 V 和 J 表示。有向边表示无线网络的连通性。无线节点间以及无线节点与传感器和执行器间采用基于 TDMA 的协议进行通讯。设有以下变量:

$$x_{i,j}^a \in \{0,1\} \tag{1}$$

其中: $i \in V, j \in J, s \in \{a,b\}$, 令:

$$x_{i,j}^a = \begin{cases} 1, & \text{无线节点 } v_i \text{ 是第 } j \text{ 个防御任务的主节点} \\ 0, & \text{否} \end{cases} \tag{2}$$

$$x_{i,j}^b = \begin{cases} 1, & \text{无线节点 } v_i \text{ 是第 } j \text{ 个防御任务的从节点} \\ 0, & \text{否} \end{cases}$$

$y_{i,k}^l \in \{0,1\}$, 令:

$$y_{i,k}^l = \begin{cases} 1, & \text{使用无线节点 } v_i \text{ 到雷达 } k \text{ 或} \\ & \text{武器系统 } k \text{ 间的第 } l \text{ 条路径} \\ 0, & \text{否} \end{cases}$$

对应的目标函数为: $f(x,y) = w_1 f_{LN} + w_2 f_{LQ} + w_3 f_{SL}$ 。任务的分配问题即为求目标函数的最小值问题, 其中 w_1, w_2, w_3

分别是对应函数的权重。 f_{LN} 代表链路的总数、 f_{LQ} 代表链路总质量的相反数、 f_{SL} 代表共享链路的成本。具体定义如下：

$$f_{LN}(x, y) = \sum_{j=1}^p (\sum_{l,k,i} y_{l,k}^i \cdot d(\varphi_{i,k}^l))_j d(\varphi_{i,k}^l)$$

代表无线节点 i 到鱼雷或武器系统 k 的长度。

$$f_{LQ}(x, y) = - \sum_{j=1}^p (\sum_{l,k,i} y_{l,k}^i \cdot LQ(\varphi_{i,k}^l))_j LQ(\varphi_{i,k}^l)$$

代表无线节点 i 到鱼雷或武器系统 k 间的链路质量。

$$f_{SL}(x, y) = \sum_{j=1}^p \sum_{\substack{1 \leq i \leq m \\ l_i, l_j, k \in S_j \cup A_j}} y_{l_i, k}^i y_{l_j, k}^j \cdot SH(\varphi_{i,k}^l, \varphi_{j,k}^l) S_j, A_j$$

代表与第 j 个控制过程相关的鱼雷和武器系统, $SH(\varphi_{i,k}^l, \varphi_{j,k}^l)$ 是路径 $\varphi_{i,k}^l, \varphi_{j,k}^l$ 的共享链路的数量。

为了提高舰艇编队一体化防御系统的可靠性和及时响应能力, 在任务分配时要求:

1) 每个防御任务分配到一个主节点和 R 个从节点, 为任务移植提供方便。表达式如下:

$$\sum_{i=1}^m x_{i,j}^a = 1, \sum_{i=1}^m x_{i,j}^b = R, \\ x_{i,j}^a + x_{i,j}^b \leq 1, \forall j \in J, \forall i \in V$$

2) 防御任务的主节点至少与相应的武器系统有两条路径可达, 防御任务主节点和从节点都必须与它相关的雷达相连。 A_j 和 S_j 分别是与第 j 个防御任务相关的雷达和武器系统。表达式如下:

$$\sum_{\forall l} y_{l,k_a}^i = 2x_{i,j}^a, \\ \sum_{\forall l} y_{l,k_s}^i = x_{i,j}^a + x_{i,j}^b, \\ \forall j \in J, k_a \in A_j, k_s \in S_j, \forall i \in V$$

一般将任务分配问题看作是一个二进制整形程序最优化解问题^[5], 可以通过分支界限法解决。但在舰艇编队一体化防御系统中, 由于网络环境相对较为复杂, 用上述方法需要进行大量的计算, 因此, 为了提高系统响应性能, 将约束条件写成合取范式形式^[6], 最优化问题则转化为满足性问题, 可通过 SAT 求解器求解^[7]。

3.2 任务移植

在作战过程中, 无线节点或链路随时可能发生故障, 嵌入式虚拟机则保证在不影响原系统工作的前提下, 将防御任务从不可靠的无线节点或链路中分离出来, 移植到可靠的环境中。移植前, 将对被移植节点进行通讯和计算的调度分析, 确保防御工作的顺利进行。

假设防御任务从节点 V_i 移植到及节点 V_j , S_{VT} 和 A_{VT} 是与防御任务相关的鱼雷和武器系统的集合。 $v_{i,s}^k$ 是相关鱼雷到 i 的路径中与 i 的距离为 k 的节点, $v_{i,a}^k$ 是相关武器系统到 i 的路径中与 i 的距离为 k 的节点。 N_u^i 表示 S_{VT} 将值发送到所有节点 $v_{i,s}^k$ 的时间到至少有一个 $v_{i,a}^k$ 接收到 v_i 值的时间的差值。 $d(v_p, v_q)$ 表示两个节点间的距离。定义通讯余度为:

$$\Delta = \sum_{s \in S_{VT}} d(v_i, v_{i,s}^k) + \sum_{s \in A_{VT}} d(v_i, v_{i,a}^k) + \\ N_u^i - \sum_{s \in S_{VT}} d(v_j, v_{j,s}^k) - \sum_{s \in A_{VT}} d(v_j, v_{j,a}^k)$$

通讯调度分析的原则是在不改变原有通讯调度表的基础

上, 可以动态的分配可用的通讯槽, 即确保通讯余度大于零。

虚拟任务的计算需要消耗时间, 计算调度则在保证不影响节点中的任务执行的前提下, 能够按期完成虚拟任务^[8]。假设 v_i 执行的任务有 $T = \{T_{i1}, \dots, T_{im}, VT_{i1}, \dots, VT_{im}\}$, T_{ij} 为本地的任务, VT_{ij} 为分配到节点上的虚拟任务。其中虚拟任务的优先级按降序排列。 $HP_T(VT)$ 是优先级高于虚拟任务的所有本地任务。 ev_{T_i} 代表虚拟任务的执行时间。则虚拟任务对应的时间要求函数^[8]如下:

$$w_{VT_i}(t) = ev_{T_i} + \sum_{j \in HP_T(VT_i)} \lceil \frac{t}{T_j} \rceil e_{T_j} + \sum_{j=1}^{i-1} ev_{T_j}$$

令 $w_{VT_i}(t) = t$, 若所求的解小于虚拟任务的截止时间, 则虚拟任务满足计算调度要求。

4 虚拟机的设计流

基于虚拟机的架构允许系统在运行时随着自动设计流的设计对其功能进行扩展, 即从 Simulink 到平台无关的相关领域的特定语言, 再到平台相关的代码的产生。三层的设计方案可以使控制工程师专注于控制器的设计, 而不需要考虑底层的硬件平台, 协议和架构等。

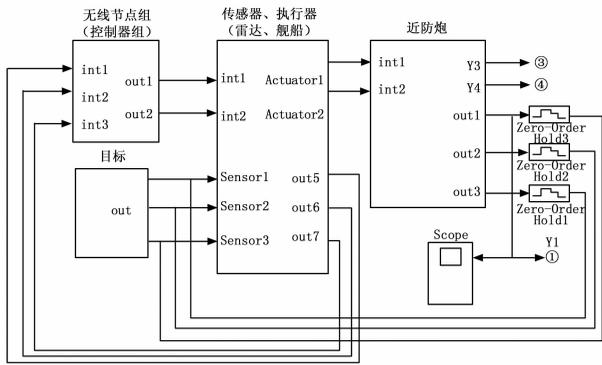
根据 Simulink 中控制系统的描述, 虚拟机能够自动地将其转化为控制系统相对应的功能性的描述, 此描述与平台和节点无关。除了功能性的描述外, 虚拟机设计流还可以从 Simulink 中自动的提取一些辅助的功能属性, 如时间和任务间的相互依赖关系。这些属性以及对控制系统功能性的描述, 共同用来被定义与平台相关的虚拟任务。

5 仿真

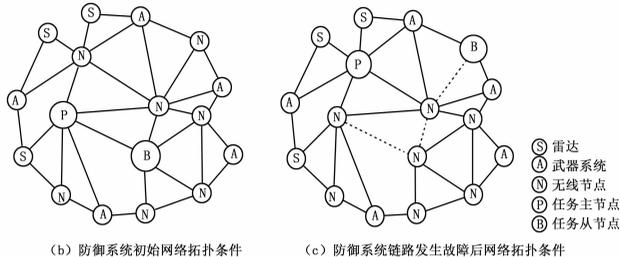
为了证明基于嵌入式虚拟机架构和算法的可行性, 对航母编队一体化防御系统进行了仿真, 假设编队中有 1 艘航母、2 艘护卫舰和 1 艘驱逐舰。护卫舰和驱逐舰上分别装有雷达和近防炮。航母、护卫舰和驱逐舰之间通过无线网络进行通讯, 即在编队中部有无线节点。防御目标是具有蛇形弹道的马斯特弹。如图 4 (a) 所示, 其中雷达的输入为目标位置、航向、速度以及炮筒所在的位置、指向、射速。输出为两者的相对参数差。控制器对雷达输出信息汇总、计算, 将控制量炮口方向、发射时机输出给炮筒执行器, 最终对其控制。

图 (b) 呈现了作战环境中的网络的初始拓扑条件以及对应于此条件下, 控制任务分配的主节点和从节点。图 (d) 初始的拓扑条件下, 系统对于不同的输入的响应 (周期为 60 ms)。图 (c) 是图 (b) 发生链路故障时的拓扑结构, 图中虚线代表故障链路。图 (e) 是在链路发生故障后, 仅仅利用无线网络的自组织能力, 重新选择了路由, 而没有改变主节点和从选节点的位置时的系统响应。由于从所有传感器到主节点再到所有执行器的通讯时间的增加, 导致系统变得不稳定。图 (f) 为图 (b) 在 $t=60$ ms 变为图 (c) 后, 使用式虚拟机 (将任务进行了移植, 重新选择了主从节点和路由) 时系统的响应, 由图可以看出, 系统响应与初始条件下系统的响应基本一致。

结果证明, 通过使用虚拟机, 可以实时监测无线网络中节点和链路的状态, 当其发生变化时, 解耦出底层的不可靠节点中的控制任务, 将其移植到可靠的无线节点中。嵌入式虚拟

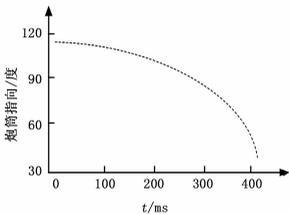


(a) 舰艇编队防御系统的建模

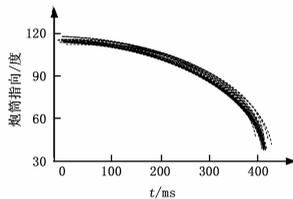


(b) 防御系统初始网络拓扑条件

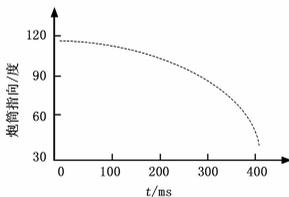
(c) 防御系统链路发生故障后网络拓扑条件



(d) 网络拓扑条件为 (b) 时系统响应



(e) 网络拓扑条件为 (c) 时未用VM系统响应



(f) 网络拓扑条件在60ms

图 4 VM 在编队防御系统中的应用

机实现了底层不可靠物理设备和控制方法的无缝连接。

(上接第 153 页)

7 结论

中国民航规章对航空器的 RVSM 空域实施 300 米 (1000 英尺) 垂直间隔标准运行适航批准有统一的要求。但各型号为达到同样标准而采取的控制策略各有不同。由于不同型号具有各自的重量和气动设计特点, 因此不能简单的根据数据评判各自控制策略的优劣, 也不能生搬硬套地借鉴他人经验。本文的研究成果仅基于少量国外型号在国内运行的 QAR 数据。如能得到更多数据的支持, 分析结论可以得到更充分的验证, 对国产民机制造业的促进意义也将更显著。

参考文献:

[1] 中国民用航空局飞行标准司. 飞行品质监控 (FOQA) 实施与管理 [R]. AC-121/135-FS-2012-45R1, 2012.

[2] 俞力玲. 中国民航飞行品质监控回顾与展望 [J]. 中国民用航

6 总结

编队一体化防御系统的目的是通过网络综合集成各种作战资源, 实现体系内的各种作战要素之间的信息共享和综合运用, 以形成一个体系配套、多武器协调的良好防御体系。将战争从“作战平台中心战”转向“网络中心战”。

然而, 由于作战环境恶劣, 无线网络自身的不可靠, 节点或链路可能发生故障, 最终导致通讯失败, 严重则造成整个系统不可控。

本文提出的基于嵌入式虚拟机的构架及其分配和移植算法, 能够灵活应对作战环境, 根据网络的拓扑结构, 动态的将控制任务移植或分配到可靠的无线节点中。通过系统仿真证明了此方案的可行性, 嵌入式虚拟机实现了控制算法和底层不可靠无线网络的友好连接, 对基于无线网络的控制算法的研究具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] Hespanha J P, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems [A]. Proceedings of the IEEE, Special Issue on Technology of Networked Control Systems [C]. 2007, 95 (1): 138-162.

[2] Jiang Z, Pajic M, Moarref S, et al. Modeling and verification of a dual chamber implantable pacemaker [A]. TACAS' 12: 18th Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems [C]. 2012.

[3] 朱磊, 王宝树. VM 技术在传感器网络中的应用 [A]. 2005 年西电研究生学术年会 [C]. 2005.

[4] nanoRK. Sensor RTOS [EB/OL]. http://www.nanork.org, 2010.

[5] Schrijver A. Theory of Linear and Integer Programming [Z]. John Wiley & sons, 1998.

[6] Pajic M, Mangharam R. Embedded virtual machines. Technical report [R]. University of Pennsylvania, 2009.

[7] Fu Z, Mahajan Y, Malik S. New Features of SAT' 04 version of zChaff [A]. The International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing [C]. 2004.

[8] Liu J. Real-Time Systems [M]. Prentice Hall, Inc., 2000.

空, 2012, 140.

[3] 张杰. 飞行品质监控与飞行安全 [J]. 中国民航飞行学院学报, 2002, 13 (3).

[4] 周百政. QAR 数据处理系统的设计与实现 [D]. 天津: 中国民航大学, 2009.

[5] 耿宏, 李萍萍, 刘家学. 基于压缩感知的 QAR 数据重构 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (5): 1351-1353.

[6] 高飞鹏, 黄加阳, 陈新霞. 基于航后 QAR 数据译码的 APU 故障诊断技术 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 42-45.

[7] 周百政, 曹惠玲. 基于 EHM 软件思路的 QAR 数据处理 [J]. 航空维修与工程, 2010 (4): 60-62.

[8] 杨经焯. 基于 QAR 数据的航班运行安全风险研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2016.

[9] 中国民用航空局航空器适航审定司. 在 RVSM 空域实施 300 米 (1000 英尺) 垂直间隔标准运行的航空器适航批准 [R]. AC-21-13, 2013.