

引用格式:肖皓天,熊华钢,李峭,等.基于 AFDX 网络的综合模块化航电故障注入技术[J].电光与控制,2017,24(10):75-79,84. XIAO H T, XIONG H G, LI Q, et al. AFDX based fault injection technology for integrated modular avionics system[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(10):75-79, 84.

基于 AFDX 网络的综合模块化航电故障注入技术

肖皓天, 熊华钢, 李峭, 李静
(北京航空航天大学,北京 100191)

摘要: 为了对综合模块化航空电子(IMA)系统的健康管理功能进行验证,给出了通过航空电子全双工交换式以太网(AFDX)进行故障注入的技术解决方案。在该方案下,提出了故障数据的配置管理方法,以及一种解决主机数据更新间隔、发送间隔与 AFDX 端系统定时器周期不匹配的发送策略,搭建了相应故障注入装置,开发了故障注入软件,通过实验测试说明了上述方法和策略的有效性。

关键词: 综合模块化航空电子; AFDX; 故障注入技术; 定时器; 数据速率

中图分类号: TP393.03 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2017.10.015

AFDX Based Fault Injection Technology for Integrated Modular Avionics System

XIAO Hao-tian, XIONG Hua-gang, LI Qiao, LI Jing
(Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to verify the function of health management of Integrated Modular Avionics (IMA), a method of fault injection through AFDX network is proposed. This method contains a way to configure fault data and a data transmission strategy to solve the mismatching problem between the data rate and the period of the timer on PC. The environment for fault injection is established and the corresponding software is developed. The experiments conducted verifies the validity of the way and the strategy.

Key words: Integrated Modular Avionics(IMA); AFDX; fault injection; timer; data rate

0 引言

航空电子全双工交换式以太网(AFDX)是综合模块化航空电子体系结构中的骨干网络互连技术,现已被应用于空客 A380 和波音 B787 的航电系统^[1],并配备有健康管理和故障预测(PHM)机制。与分时分区操作系统相适应的典型的健康管理功能包含分区驻留的 PHM 进程和模块驻留的 PHM 分区^[1]。

已有的故障注入方法主要关注于对 AFDX 网络通信本身的故障,如物理层、链路层、虚拟链路(VL)端口故障^[2];或是通过处理器硬件进行接触式或非接触式硬件注入^[2];但是在不破坏 IMA 处理机的运行条件下进行 PHM 本身调试所需的故障注入方法仅限于黑盒、白盒测试^[3]。

然而,PHM 本身的正确性和可信性也需要得到验

证,特别是在航空电子系统的设计阶段,为了检验 PHM 功能本身的正确性和有效性,需要在不破坏 IMA 处理机的运行条件下进行故障注入^[4]。采用软件编程控制,通过综合化网络人为地输入或触发 IMA 处理机的错误是一种可以满足上述要求的故障注入技术解决方案。经过分析研究,这种基于 AFDX 的软件故障注入可分为非法数据输入、特殊信令输入、缓冲区溢出触发、数据结构溢出触发等多种方式^[2]。

本文讨论的故障注入方式主要针对非法数据输入和特殊信令输入。前者根据一定的故障场景构造出异常且明显有悖于物理规律或性能界限的飞行数据,可以包含 AFDX 网络的采样端口和队列端口的传输数据;后者针对无法用软件直接模拟的故障,与驻留在 IMA 中的调试进程或程序段配合使用,通过发送特殊的信令,人为设置故障日志记录,直接引发分区的健康管理功能,以观测 PHM 进程的响应情况。

首先给出故障注入数据配置和管理方案,随后提出并论证一种在 PC 主机环境下使软件定时和 AFDX 端系统卡的硬件定时相配合,提高数据刷新率准确程

收稿日期:2016-09-13 修回日期:2016-11-17

基金项目:国家自然科学基金(61301086)

作者简介:肖皓天(1993—),男,湖北荆门人,硕士,研究方向为航空电子与总线通信。

度的定时发送策略,最后汇报实际的运行结果,并通过对比展示了本发送策略对于近似逼近理想的发送时刻的作用。

1 故障注入系统的组成

基于 AFDX 综合化网络的故障注入系统主要由故障注入功能主机、AFDX 交换机、嵌入式系统 3 部分组成,如图 1 所示。

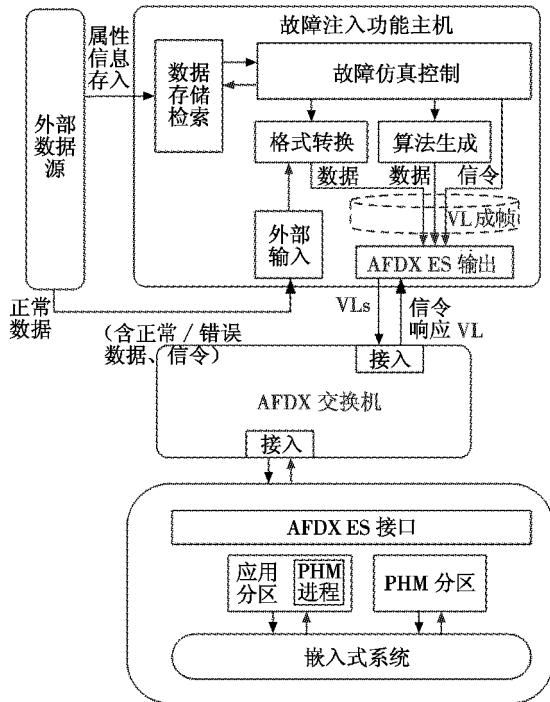


图 1 故障注入系统整体框图

Fig. 1 Structure diagram of fault injection system

为了降低成本并便于编程开发,故障注入功能主机使用 PC 机,采取 Visual C++ 的 MFC 框架开发故障注入软件调用 AFDX 端系统卡 API 的实现形式。所需正常的通信数据和注入的故障数据是根据接口控制文件(ICD)和数据文件离线格式定义和设置的,主机通过定时器控制向 AFDX 端系统板卡写入数据的时间间隔。由于编程环境处于非实时操作系统,不能完全依赖主机的定时功能,必须即时且合理地将离线定义好的数据(包含正常数据和带有错误的的数据)加载到 AFDX 端系统卡的采样或队列端口,使加载的数据根据 AFDX 端系统板卡的协处理和硬件定时保证其带宽分配间隔(BAG)等定时参数,被发送到 AFDX 的物理层,这些数据会根据 AFDX 网络的静态路由和 IMA 处理机上的模块分区设置被发送到嵌入式系统的特定分区的特定模块来驱动应用程序运行。

2 故障数据的配置和管理

在一般情况下,注入的故障数据是在一段连续的

正常数据中模拟偶发的错误,所以故障注入系统必须持续地发送驱动嵌入式系统中应用程序的正常航空电子参数,并根据仿真场景插入预设的故障,为了管理和配置具有不同数据结构的正常数据和故障设置情况,采用轻量化的数据库结合二进制数据文件的方案,其中,前者管理的是接口控制文件的定义和数据帧的结构定义,而后者存储着离线生成的被注入数据。

2.1 数据封装格式

故障数据的配置按照 AFDX 网络协议中的功能数据集的方法把数据封装起来(见图 2),作为 AFDX 帧的载荷。功能数据集(FDS)是一种将消息中数据原语一起聚合成组的办法。为了让计算机更有效率地存储和检索数据,数据的配置要遵循数据对齐原则^[5]。

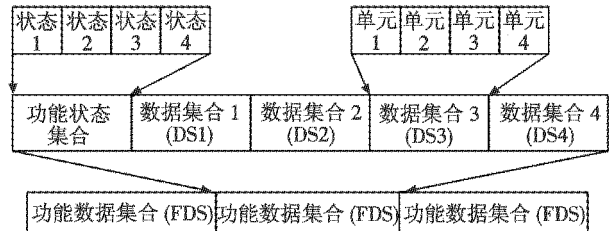


图 2 功能数据集的结构

Fig. 2 Structure of functional dataset

在航电系统的设计过程中,FDS 字段的设置由接口控制文件(ICD)规范说明。故障注入软件需要根据 ICD 的记录定义数据结构,用数据库对 ICD 记录进行管理维护;考虑到本软件面向数据的应用,不用配备全功能的数据库服务器端,而采用轻量化的 SQLite 关系型表格进行管理。

2.2 数据接口控制与管理

故障注入的原始数据包含参数信息或文本信息,例如本机飞行参数信息、邻机飞行信息、数字化通信报文等,把这些数据拆分为一个个数据单元,在 SQLite 数据库存储每个数据单元的属性信息,如图 3 所示。

每个数据单元对应很多数据实例,例如可以通过仿真器生成一段时间内带有一定变化趋势的本机位置数据;为了满足随机存取这些数据实例的需求,将原始的数据实例(有的仿真器是以文本形式输出)统一转换为二进制文件存储。二进制数据已经根据 AFDX 网络规定调整成为连贯的大端(big endian)形式,直接对应于 AFDX 帧载荷的数据位顺序,降低了发送时格式转换的开销。

例如,对于飞机的位置和航向信息,可以利用 FDS 的格式安排各数据元素。首先将本机飞行信息拆分为经度、纬度、高度、东向速度、北向速度、天向速度、俯仰角、横滚角、航向角这 9 个单元,并对它们进行编号(每个单元拥有唯一的 ID),然后将每个原始数据包含的

数据单元 ID、数据格式、单元大小存储到数据库中。为每个数据集 (DS) 预留出 4 个数据单元 (见图 2)，用户只需在数据单元中装填数据单元 ID 就能自由地搭配每个 DS 中的数据。发送时，通过 DS 中数据单元 ID 查询数据库，找到对应数据单元的路径来完成对 FDS 的装填。

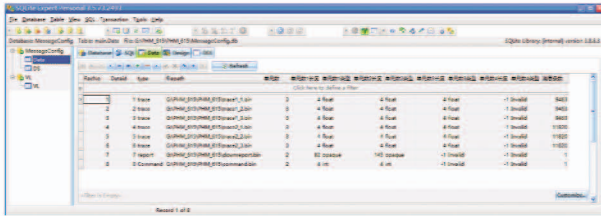


图 3 SQLite 数据库
Fig. 3 SQLite database

2.3 故障数据的设置

故障注入系统的软件包含数据显示界面、数据配置界面和故障注入操作界面。正常和待注入的数据格式和参数含义由 SQLite 数据库中的表格定义，数据内容来自二进制文件，并在数据显示界面中以列表形式显示。

在数据配置界面中，用户通过编辑数据内容、VL 和分区图标之间的连线设定数据流综合和分发的层次，即：数据内容套接于 VL 数据载荷的各个 FDS 中，多条 VL 接入到目的节点的特定分区 (见图 4)，通过各图标的弹出式菜单，并结合左侧的导航，可以对数据内容、VL 和分区的详细参数进行显示和编辑；在配置完成后，设定每条 VL 发送时长与发送速率并进入数据故障注入操作界面。

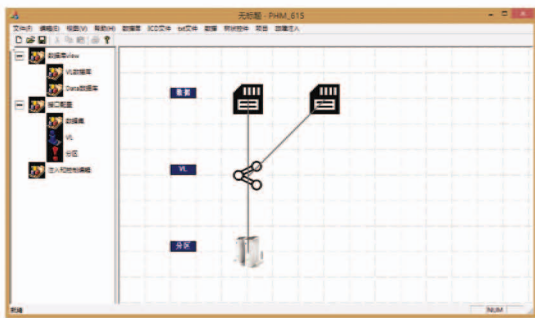


图 4 数据配置界面
Fig. 4 Data configuration interface

故障注入操作界面采用图形化方法将不同应用数据和特殊指令的 VL 数据流以条带的形式显示，并在发送时用游标进行指示。数据配置已经对应于各条带加载了预先存储的正常数据，这时再双击相应的条带，可以于指定的时间点正常数据中设置数值错误、遗漏等不同形式的故障；另外，对应于被测试的各个分区，以及整个被测试系统，分别预留了放置特殊指令的

条带，可以通过故障码的形式注入信令型故障。

3 故障注入的软件定时

为了弥补非实时操作系统定时精度不足的缺陷，使发送时刻近似于理想的数据更新时刻，提出了一种发送策略，解决主机应用数据更新率与 AFDX 端系统定时器周期不匹配的问题，进行故障注入数据帧发送操作的软件定时。

3.1 主机端定时器的选择

数据装配完成之后，故障注入平台需要定时向 AFDX 端系统板卡写入数据，Visual C++ 开发环境下可选的定时器包含 SetTimer 函数和多媒体定时器。

SetTimer 函数是对 ROM BIOS 架构下定时器的简单扩充^[6]，最高分辨率仅约为 55 ms，且其对应的 WM_TIMER 消息传输优先级低，得不到及时处理。

多媒体定时器由 TimeSetEvent 函数单独创建线程，不依赖消息传输机制，中断后操作系统会调用预先设置的回调函数^[6]，可以在回调函数中发出消息触发 MFC 应用程序进行发送操作，其工作原理如图 5 所示。多媒体定时器精度的标称值可以达到 1 ms，但是由于非实时操作系统的不确定性，中断的时间间隔受到当时主机负载的影响，会出现毫秒级时延抖动。

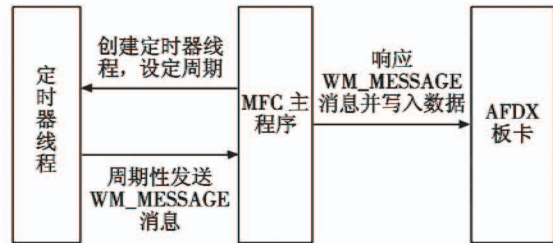


图 5 多媒体定时器工作原理

Fig. 5 Schematic diagram of multimedia timer

如果定时周期设定偏小，线程频繁占用 CPU 时间片，不仅会造成工作效率低下，影响其他线程的运行，而且本身的定时精度也随时延抖动而恶化；反之，则无法与 AFDX 的数据更新间隔较好匹配。经过设计折衷，将多媒体定时器的中断周期设置为 10 ms。

为了降低主机的处理负担，各种 VL 共用一个多媒体定时器，这意味着需要根据多组用户定义的数据更新间隔和发送间隔，制定各次定时器中断时的写入数据的内容和数量，数据更新率与定时器周期不匹配时 (即不呈整数倍关系)，计时次数取整操作会造成实际发送时间与预设时间之间具有一定的偏差，需要一定的发送策略，尽可能避免或减小偏差。

3.2 定时发送策略

AFDX 网络的 VL 被配置为采样或队列端口，且在

发送端口进行流量整形,即同一条 VL 中相邻帧的起始位之间的时间间隔不大于 VL 的 BAG^[5]。

对于发送间隔及其 BAG 小于或接近 10 ms 量级(根据 ARINC 664 P7 的规定,为 1 ms, 2 ms, 4 ms, 8 ms 或 16 ms)的 VL 流量,单纯依靠软件定时器中断会产生很大误差。解决方法是,每次软件定时中断后,可以将一批数据装载入发送队列中,使它们受到低层 AFDX 端系统卡硬件的 BAG 约束,进而保证它们的发送重复频率。值得说明的是,这种解决方案利用了队列模式发送的多缓冲机制,即使对于传输采样数据的 VL,也将其配置为队列模式发送,数据帧一旦接入到交换机,将不区分队列或采样模式,目的端仍可设定为采样端口正常接收。

定时发送操作还要处理好数据更新间隔(或所谓“数据更新率”)的问题。数据更新间隔由应用决定,一般大于发送间隔和 BAG。在定时器中断的时候,通过编程实现相应的数据加载的策略,在发送端向 AFDX 端系统卡的队列 FIFO 缓存区写入一批消息。

定时发送策略的设计使定时中断的时刻先于数据刷新的时刻,这样对于原先为采样模式的数据流,这批消息的前半部分是含有当前数据的若干条重复消息,后面是数据更新之后的第一条消息。为了尽可能接近理想的数据更新和传输间隔,需进行如下模型分析。

设数据传输时的参数为起始时间 t_0 、预设发送间隔 T_u 、定时器定时周期 T_t 、VL 的 BAG 为 T_B ,以及每批发送的消息总数 N 。对于给定的 VL,设某次数据更新后第一条消息的序号为 k ,对应软件定时器中断的次数为 x_k ;相应地设 y_k 代表该条消息之前未更新消息的条数。

消息成批加载的时机,以及缓存区前半部分消息的个数是发送策略设计的关键,则定义发送策略为 (x_k, y_k) ;初始的发送策略为 $(t_0/T_t, 1)$,在运行过程中, (x_k, y_k) 根据前面一次的发送策略 (x_{k-1}, y_{k-1}) 迭代计算得到;采用下列算法求得与理想发送时刻最接近的 x_k 值。

1) $T_t \geq T_B$ 的情形。

第 k 条消息和第 $k-1$ 条消息的发送间隔大于 1 个 BAG,并且在 VL 的占用上不会产生冲突,第 k 条消息的实际发送时间不得超过预定发送时间。

$$\left\lfloor \frac{t_0 + kT_u}{T_t} \right\rfloor \geq x_k > x_{k-1} \quad (1)$$

$$x_k T_t \geq x_{k-1} T_t + (y_{k-1} + 1) T_B \quad (2)$$

$$y = \left\lfloor \frac{t_0 + k \cdot T_u - x \cdot T_t}{T_B} \right\rfloor \quad (3)$$

确定了 x 的范围,对于有限的几个可用的取值,可根据式(3)找到与 x 对应的 y ,遍历 x ,找到时间误差绝对值

$$\delta = |t_0 + kT_u - x_k T_t - y_k T_B| \quad (4)$$

最小的 x 和 y 即 (x_k, y_k) 。对于每条消息,采取的是迭代计算。

2) $T_t < T_B$ 的情形。

在这种情况下,无法通过 AFDX 网络中消息的 BAG 特性准确控制消息。

$$x_k = \left\lfloor \frac{t_0 + kT_t}{T_u} \right\rfloor \quad (5)$$

$$y_k = 1 \quad (6)$$

均方误差分析

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (t_k - T_k)^2} \quad (7)$$

式中: t_k 为第 k 条消息的实际发送时间; T_k 为第 k 条消息的预设发送时间; δ 为实际发送速率的平方误差,这个参数越小说明误差越小,即实际发送速率更加接近预设速率。

$$d = \max\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_N\} \quad (8)$$

式中, d 为 VL 队列端口的深度,在对 AFDX 端系统板卡发送端口进行配置时,VL 队列端口的深度必须大于或者等于 d 。

采用这种定时发送策略,可以在最接近用户定义的数据发送时间间隔的情况下向目的端发送数据,即在理论上达到更加准确的数据发送速率。

4 单元测试实验及结果分析

实验系统是由计算机、AFDX 端系统板卡和 AFDX 交换机组建而成,如图 6 所示。AFDX 端系统板卡包含两个通道。在发送端,采用在 MFC 下编写的故障注入平台对消息进行配置(网络配置、VL 配置和端口配置等),在目的端,采用加拿大 Ballard 公司的 Copilot 软件对消息帧进行监控。

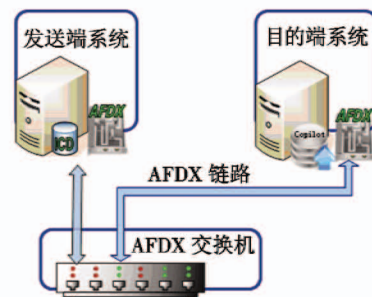


图 6 实验系统

Fig. 6 Experiment system

在上述实验系统下,通过故障注入软件向目的端系统进行故障注入,并在目的端通过 Copilot 软件监控错误帧信息。

4.1 数据帧定时发送

准备发送的数据包的参数配置为： $t_0 = 0 \text{ ms}$, $T_u = 45 \text{ ms}$, $T_t = 10 \text{ ms}$, $T_b = 8 \text{ ms}$, $N = 3$ (在 $N > 3$ 的情形下, 消息传输间隔的模式是前 3 条消息的重复)。分别在对发送策略进行优化和未进行优化的情况下发送消息, 获取消息的接收情况并进行分析, 如图 7 所示。

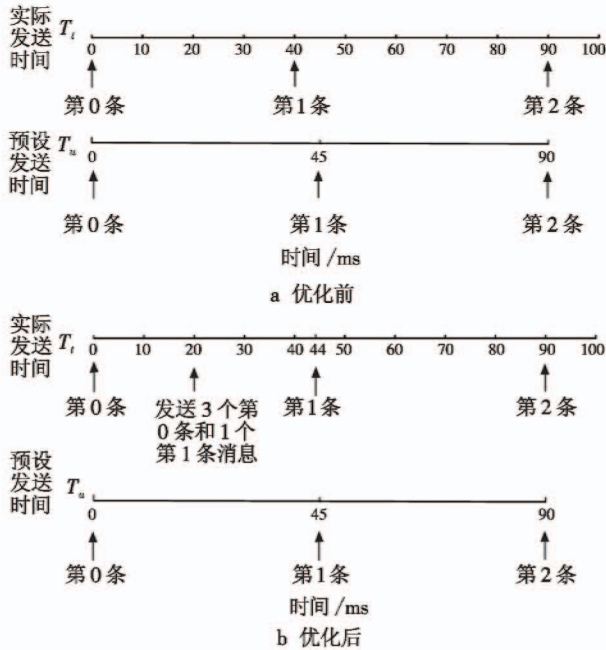


图 7 消息接收情况分析

Fig. 7 Message reception analysis

从图 7 可以看出, 在发送第 2 条消息时, 优化之后的实际发送时间更加接近预设发送时间, 一定程度上减小了时间误差。

4.2 实验结果和对比分析

目的端系统采用 Copilot 软件, 采集并记录接收到的消息。对于给定的 VLID, 监视其中各条消息的循环 SN 标识、绝对发送时间和相邻消息发送时间差。

实际发送过程中, 即使是多媒体定时器也会产生误差。其中, 表 1 为优化前所接收到的前 3 条消息的信息, 有效消息序列号分别为 0, 1, 2。表 2 为优化后相对应的信息。由于优化时, 故障注入软件在发送第 2 条消息时会发送两条重复消息, 故有效消息序列号分别为 0, 3, 4。分别计算出优化之前 3 条消息的发送时间为 0.000 ms, 34.015 ms 和 85.204 ms, 而优化之后 3 条消息的发送时间分别为 0.000 ms, 42.097 ms 和 91.980 ms, 预设发送时间分别为 0.000 ms, 45.000 ms 和 90.000 ms。 $\delta_1 = 6.920 \text{ ms}$, $\delta_2 = 2.029 \text{ ms}$, 数据对比表明, 本发送策略使数据发送间隔的定时精度成倍提高。

表 1 Copilot 软件接收消息内容 (优化前)

Table 1 Data received by Copilot (before optimization)

RSN	时间/s	时间差/s	VLID
0	30.787 556	0.000 000	6
1	30.821 571	0.034 015	6
2	30.872 760	0.051 189	6

表 2 Copilot 软件接收消息内容 (优化后)

Table 2 Data received by Copilot (after optimization)

RSN	时间/s	时间差/s	VLID
0	150.668 10	0.016 690	6
1	150.676 77	0.008 676	6
2	150.684 85	0.008 081	6
3	150.693 51	0.008 655	6
4	150.743 39	0.049 881	6

可见, 出于控制成本的考虑, 不得不采用非实时操作系统和 PC 主机的情况下, 本发送策略充分利用了多媒体定时器的时间确定性不稳定, 而 AFDX 端系统板卡协处理器的定时器高精度硬件定时, 优化应用层数据写入的时机, 减少了消息的发送间隔对 PC 主机定时器的依赖。在民机航电系统中, 如果数据流量的帧间隔不小于 10 ms, 且能与相应 PHM 分区调用响应时间的量级相匹配, 本文所述的故障注入系统的定时精度具有可用性。

5 总结

本文的故障注入方案包含故障数据配置和故障数据发送功能, 使用 PC 主机端和 API 编程对嵌入式平台进行故障注入, 能够在一定程度上解决主机应用数据更新率与 AFDX 端系统定时器周期不匹配的问题, 适用于对嵌入式平台的 IMA 系统健康管理功能进行实验验证。相应的软件界面和数据管理方式, 可以使用户根据 IMA 系统的故障模式设计不同的故障场景, 进行故障注入半物理仿真。

参考文献

- [1] 熊华钢, 王中华. 先进航空电子综合技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [2] 陈冬英, 宋东, 陈杰. 航空电子全双工交换式以太网故障注入方法研究 [J]. 测控技术, 2015, 34(1): 91-94.
- [3] 周庆, 刘斌, 余正伟, 等. 综合模块化航电软件仿真测试环境研究 [J]. 航空学报, 2012, 33(4): 722-733.
- [4] 曾声奎, PECHT M G, 吴际. 故障预测与健康管理的 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626-632.

(下转第 84 页)

在地面定点 4.2 km 距离、转台模拟飞机机动的条件下,通过衰减发射功率的方式,进行了与空中 20 km 距离等效的通信试验验证,实现双向 $1.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 速率的视频通信。并在 $2.5 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速率下,进行多次 60 s 以上的误码测试,误码率在 $1.7 \times 10^{-8}/1.2 \times 10^{-7}$ 以下,满足考核指标要求;同时对跟踪性能进行了测试,粗、精跟踪精度分别为 $20 \mu\text{rad}$ 和 $5 \mu\text{rad}$,满足性能要求。由于激光器为大功率激光器,难以衰减至与 100 km 距离等效的低功率;但实际测试时,20 km 等效衰减通信时接收孔径处光功率约为 -15 dBm ,而通信机接收灵敏度在 -32 dBm 以下,链路余量在 17 dB 以上,理论通信距离大于 100 km,满足系统设计要求。

另外,还进行了外场通信拉距等效试验,受试验条件限制,最终拉距距离约 6.8 km, $1.25 \text{ Gb} \cdot \text{s}^{-1}/155 \text{ Mb} \cdot \text{s}^{-1}$ 速率的通信画面图像清晰,通信效果良好,误码率满足指标要求。

4 结束语

本文结合机载平台特点,分析了机载激光通信系统的关键技术,并通过系统设计研制了一套样机,完成了等效地面试验;未来还需在系统小型化、相干通信体制、自适应光学等新技术方面开展研究,以进一步改进现有系统。随着机载平台重要性的逐渐提高,各国均已开始发展高带宽、高保密、抗干扰的机载激光通信系统,其与射频通信相互配合,将能有效提升战机的通信保障能力和体系对抗下各武器平台的作战效能,发展前景广阔。

参 考 文 献

- [1] 姜会林,刘志刚,佟首峰,等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(s):299-302.
- [2] 赵鑫,王世峰,佟首峰,等. 飞机-地面间激光通信天线的初始对准[J]. 光学精密工程,2008,16(7):1190-1195.
- [3] 刘庭杰,陈玉茹. 机载激光通信特点与应用简介[J]. 硅谷,2012(12):117-118.
- [4] 姜会林,佟首峰. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [5] 付强,姜会林,王晓曼,等. 空间激光通信研究现状及发展趋势[J]. 中国光学,2012,5(2):116-125.
- [6] 曾飞,高世杰,伞晓刚,等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学,2016,9(1):65-73.
- [7] 孟立新. 机载激光通信捕获与跟踪技术研究[D]. 吉林:吉林大学,2014.
- [8] BISWAS A, PAGE N, NEAL J, et al. Airborne optical communications demonstrator design and pre-flight test results[C]//Proceedings of SPIE 5712, 2005:205-216.
- [9] MAYNARD J A, BEGLEY D. Airborne laser communications: past, present and future[C]//Free-Space Laser Communications V, Proceedings of SPIE 5892, 2005. doi:10.1117/12.621222.
- [10] FLETCHER T M, CUNNINGHAM J, BABER D, et al. Observations of atmospheric effects for FALCON laser-communication system flight test[C]//Atmospheric Propagation VIII, Proceedings of SPIE 8038, 2011. doi:10.1117/12.887407.
- [11] 刘红军. 美军机载射频与 FSO 混合通信发展述评[J]. 电讯技术,2014,54(12):1711-1716.
- [12] 孟立新,赵丁选,张立中,等. 机载激光通信稳瞄吊舱设计与跟踪精度测试[J]. 兵工学报,2015,36(10):1916-1923.
- [1] 姜会林,刘志刚,佟首峰,等. 机载激光通信环境适应性及关键技术分析[J]. 红外与激光工程,2007,36(s):299-302.
- [5] ARINC. Aircraft data network. Part 7: Avionics Full-Duplex Switched Ethernet (AFDX) network[S]. Annapolis: Aeronautical Radio, 2005:9-18.
- [6] 洪锡军,陈彩贞,李从心. Windows 下高精度定时的实现[J]. 计算机应用研究,2000,17(3):96-97.

(上接第 79 页)