

AFDX 网络协议及关键技术的研究

李 哲,田 泽,张荣华,杨 峰

(西安航空计算技术研究所 集成电路与微系统设计航空科技重点实验室,陕西 西安 710068)

摘 要:机载通信网络技术是实现航空电子系统间大容量的高速数据交换的枢纽和核心,其性能和功能决定航空电子系统综合化程度的高低,是现代先进飞机航空电子综合化的关键技术之一。源于商用以太网技术、在国际民机中广泛使用的 AFDX 网络技术,具有低成本、高带宽、低延迟、确定性、高可靠性等诸多优点。文中在论述现有总线网络技术的基础上,介绍了 AFDX 技术。重点叙述了 AFDX 网络体系结构,给出了 AFDX 网络工作机制和流程,重点分析研究了 AFDX 网络协议及关键技术,为 AFDX 网络协议处理芯片的设计、实现、验证及系统应用提供了理论基础。

关键词:AFDX;开环;确定性;协议;关键技术

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)04-0046-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.04.010

Research on AFDX Network Protocol and Key Technology

LI Zhe, TIAN Ze, ZHANG Rong-hua, YANG Feng

(Key Laboratory for Aeronautics IC & Microsystem Design, China Aeronautics Computing

Technique Research Institute, Xi'an 710068, China)

Abstract: Airborne communication network technology is the hinge and kernel to implement the high-speed, large-volume data exchanges among the avionics systems. The function and performance of the airborne data bus determines the avionics system integration level. Airborne data bus technology is one of the most significant technologies in the advanced avionics system integration of the modern airplane. Rooted from the commercial Ethernet network technology, with the advantages of low-cost, high-bandwidth, low-latency, high-reliability and so on, the AFDX networks technology has been widely used in the international civil airplanes. On the basis of the available bus network technology, AFDX technology is introduced. The architecture of AFDX network is discussed as a focal point, and working mechanism and working process of AFDX network is provided, and networking protocol and theoretical basis of AFDX is analyzed particularly, which lays the foundation of theoretical basis for design, implementation, verification and system application of AFDX networking protocol processing chip.

Key words: AFDX; open-loop; determinability; protocol; key technology

0 引 言

高度综合化的航空电子系统,对航电子系统间的超高速、大容量数据交互和消息共享的要求日益增长,传统的 ARINC 429、ARINC 629、MIL-STD-1553 等机载总线已不能满足通信需求。航空电子全双工交换式以太网(Avionics Full Duplex Switched Ethernet, AFDX)利用成熟、鲁棒、高速的商用标准以太网 IEEE802.3 通信原理和网络结构,并对通信协议和拓扑结构进行限定,使之满足航空应用要求^[1-2]。

AFDX 标准为航空电子工程委员会(Airlines Elec-

tronic Engineering Committee, AECC)制定的 ARINC664 标准。2005 年,AFDX 协议被民用航空通用标准化机构——美国航空无线电设备通讯公司/美国航空公司电子工程委员会飞机数据网络工作组定义为一种确定性网络标准,正式定名为“航空电子全双工交换式以太网网络”(ARINC Specification 664P7, Avionics Full Duplex Switched Ethernet (AFDX) Network)。ARINC 664 标准维护由 AECC 的航空数据网络工作组负责,主要职责是将商用的数据网络标准用于机载领域,支撑飞机平台与客舱的高速、大数据量传

收稿日期:2015-06-16

修回日期:2015-09-22

网络出版时间:2016-03-22

基金项目:航空科学基金(2015ZC51036)

作者简介:李 哲(1985-),男,工程师,研究方向为集成电路设计;田 泽,博士,研究员,中航首席技术专家,研究方向为 SoC 设计、嵌入式系统设计、VLSI 设计。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160322.1517.004.html>

输的发展需求^[3]。

1 AFDX 网络概述

AFDX 应用于模块化航空电子系统架构中的通用通信系统。ARINC664-Part7 定义了 AFDX 的基本概念,规定了 AFDX 体系架构、功能和通信机制。

1.1 AFDX 网络体系架构

AFDX 采用以交换机为中心的全双工、星型、双余度拓扑结构。AFDX 网络系统主要由端系统(End System, ES)、AFDX 交换机(SWitch, SW)以及通信链路组成,如图 1 所示。

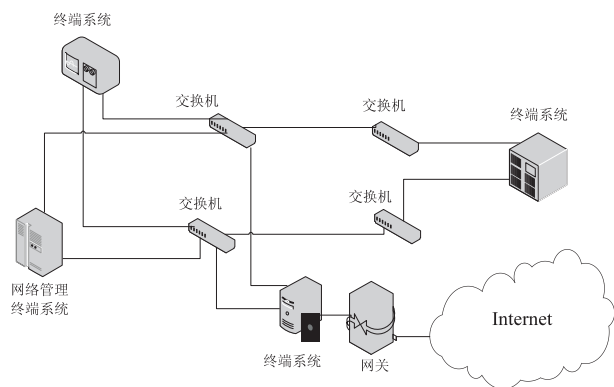


图 1 AFDX 网络拓扑

ES 负责数据的收发,为航空电子子系统与 AFDX 的连接提供安全、可靠的数据交换“接口”;SW 负责数据交换、调度和监控;通信链路提供可靠的物理连接,是子系统间信息交互通道^[4-5]。

如图 1 所示,AFDX 不同于传统以太网,是一种双余度网络,端系统分别通过两组独立的交换机接入网络,相同路径上的交换机通过一根双绞线连接。采取物理连接余度的 AFDX,使每个端系统都可通过独立的两条物理链路访问网络中的其他端系统,提高了网络系统的可靠性^[6]。

在 AFDX 中,某些端系统可通过网关与普通以太网设备相连,用于航电子系统数据配置、下载和记录。

1.2 AFDX 网络工作机制和流程

AFDX 网络的工作流程由上电自检、配置表加载、数据通信、网络管理等构成。AFDX 网络是一种静态配置的确定性网络,工作前将配置表分别固化在 SW\ES 中,配置表规定了端系统和交换机的工作方式、路由转发、警管过滤、端口速率、虚链路优先级、最大抖动、延迟等信息。配置后网络中每个设备均根据自己的配置表进行工作。

上电后,端系统和交换机节点首先进行设备初始化和自检操作,然后加载已经固化好的配置表,并依据网络中 ES 的位置信息在配置表中选择该节点对应的通信表,端系统根据通信表建立通信端口和虚链路,

交换机根据通信表创建路由转发表,在端系统、交换机间构建相互通信的虚拟链路,完成网络初始化。

网络初始化完成后,端系统会创建消息,完成 UDP/IP 协议封装,并将经过流量整形的 AFDX 帧经双余度物理链路发出,帧进入交换机后,交换机根据配置信息完成过滤和流量警管,并根据路由转发表信息将数据帧转发到指定的输出端口,若数据帧在交换机中驻留的时间超过 Maxdelay,将被丢弃。从交换机出来的帧通过物理链路发送到接收端系统,接收端系统对接收到的数据帧进行 CRC 校验、完整性检查和余度处理并经 UDP/IP 协议栈软件处理后将有效数据提交给上层应用^[7]。

若在工作中发生状态更新,端系统或交换机会通过 ES 配置帧格式发送新的配置表到网络中的所有节点,节点接收到新的配置表后,会重新固化,加载配置表,并进行复位操作。

交换机和端系统上所有操作都受到监视。监视模块负责记录帧的到达、CRC 错误等事件信息,创建一个用来记录内部状态的统计表^[8],并与网络管理节点通信,传递操作信息和有关端节点或交换机的健康状况信息。

2 AFDX 网络协议标准及分析

由 AECC 制定的 ARINC664 协议共由 8 部分组成,从不同层次对航空数据网络进行了系统的定义,形成以 AFDX 为核心的下一代航空数据网络的完整标准。

AFDX 的通信协议栈如图 2 所示。左边是标准 OSI 网络协议栈结构,右边对照的是 AFDX 网络协议栈结构及协议间的关系。

AFDX 继承了商用 TCP/IP 的协议栈结构,并做了适应性修改。协议栈分五层,从下到上依次为物理层、链路层、网络层、传输层和应用层。应用层包括航电应用和维护应用两类^[9]。

航电应用主要通过 TFTP(简单文件传输协议)实现,维护应用包括数据加载服务、SNMP 代理服务。网络层采用 IP 协议,传输层采用 UDP 协议(TCP 协议可选)。传输层采用队列,采样和 SAP 三种端口与应用层通信。航空电子应用程序包括普通文件传输服务的 TFTP 协议。航电系统维护的应用程序包括 ARINC615A 中规定的数据加载协议、简单网络管理协议,以及普通文件传输协议。不同应用采用不同的通信端口与端系统下层协议通信。ARINC664-Part3 中对网络通信协议与服务有详细说明。图右边的管理信息实现端系统内部的通信信息管理。端系统覆盖了 ARINC664 协议栈中下四层协议,应用层协议在航电

子系统中实现^[10]。

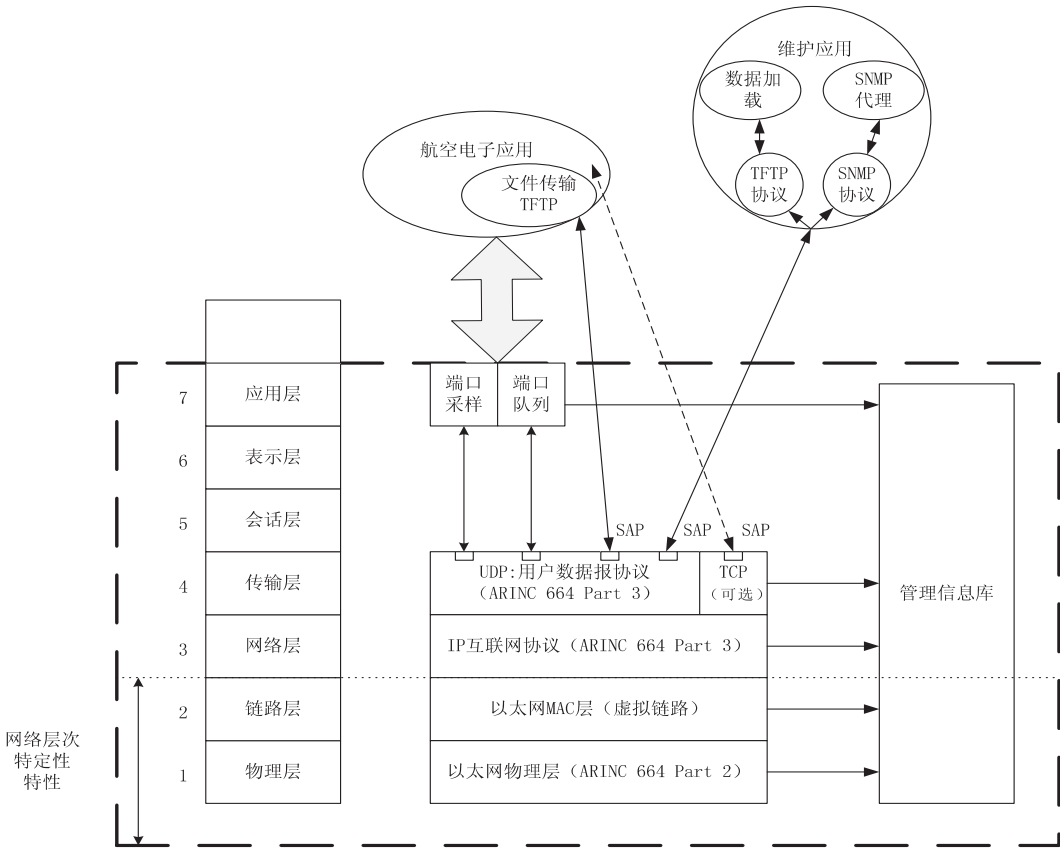


图 2 AFDX 协议栈结构

3 AFDX 网络关键技术

3.1 确定性

航空电子系统包括许多周期性、强实时控制系统,要求设备间的信息交互是低延迟、低抖动和时间确定的。任何功能分系统必须在一定时间内完成信息收发,数据收发不应造成阶跃或瞬态,影响系统的控制效果或作战效能。商用通信网络做到“尽量”准时,就可满足要求。一般采用“尽可能传输”策略,保证网络通信带宽利用率,实时性要求不高。而机载通信网络,必

须满足系统时间确定性要求。

AFDX 是一种“确定性网络”。“确定性”主要指时间和路由的确定性,确定性由以下机制保障:除了配置表中约定的固定路由外,还限定了每条虚链路的带宽,每个端系统的收发延迟,抖动上界及转发延迟。

如图 3 所示,AFDX 网络在端系统中采用虚连路和带宽分配机制保证收发数据的确定性,在交换机中采用流量警管和帧过滤机制保证数据交换的确定性。另外,对不同优先级的任务,通过 BAG 参数配置,分配独立带宽保证任务实时性。

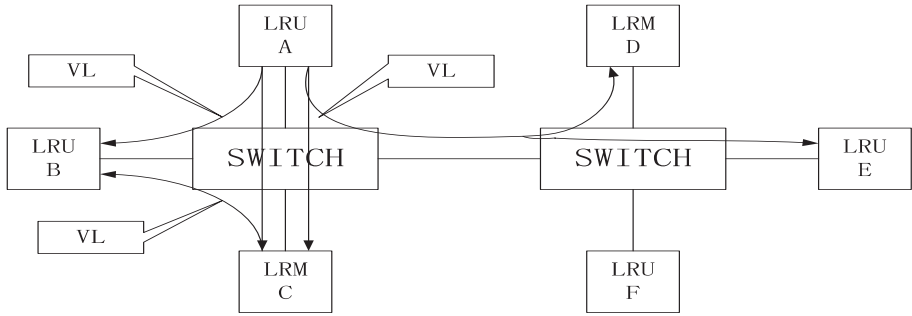


图 3 虚链路示意图

3.2 数据完整性

机载通信网络在保证数据准时到达的同时,还要确保数据正确和完整。在点到点、点到多点,数据的路由是固定的,数据传输是按照先来先传输的原则进行,

数据传输次序不发生变化,数据正确性由通信网络的固有可靠度和纠错措施来保障^[11]。

AFDX 交换机的通信路由采用静态配置,同一条虚链路上的消息经过的路径是固定的,保证了一条虚

链路上不同数据帧的顺序到达。AFDX 网络中数据帧 CRC 及校验和机制,可检查数据传输过程中的正确性,UDP/IP 传输协议负责消息封装与重组,保证数据的完整性。

数据的顺序在 AFDX 中由帧序列号来判定和识别,交换式网络固有可靠度较高,同时又采用完整性检查等纠错策略,可以保证数据完整性。

3.3 可用性

AFDX 采用物理冗余度和消息冗余度两套机制提高其可用性。在冗余配置下,每个端系统对将发送的帧编号,将它复制成两份,分别通过相互独立的交换设备向目的端系统发送。端系统具有冗余管理功能,目的端系统根据编号按顺序接收。若两个备份都被正常接收,则后到的被丢弃;其中一个出现传输故障,则用另一个替代。接收端系统有完整性检查和冗余管理功能,根据“先到先赢”原则进行帧的选择。冗余管理机制包含在链路层中,冗余链路保证了数据报传输的可靠性^[12]。

3.4 安全性

机载通信网络要有足够的安全隔离措施,能抑制

故障蔓延。任何一个终端的故障不能影响系统中的其他终端,也不能造成系统通信能力损失,同样,任何一个终端也不能被其他终端所影响。

AFDX 采用变压器隔离耦合方式,所有端系统都通过两个独立的 MAC 与双余度交换机相连,交换机通过路由转发完成系统通信控制,端系统间完全隔离。网络连接方式如图 1 所示,在端系统内部,通过分区隔离和带宽隔离机制确保虚链路间的独立性。

AFDX 另一项安全性保证机制是两级配置表。AFDX 是一种静态交换式以太网,为获得可预知的确定性行为,配置表静态建立,不支持生成树算法,通过访问控制表机制实现。AFDX 端系统和交换机中都有一张预先设置好的配置表,当交换机接收到 VL 的转发请求,首先查询自身配置表。若表中无该 VL 信息,则不响应转发请求并过滤该消息;若表中有该 VL 信息,则根据配置表将消息转发到预定目的地址。同样,在端系统接收端也有一张配置表,若表中无接收 VL 的信息则丢弃该消息,否则提交给上层应用。

采用在交换机和端系统实现两级配置表可以避免网络中的错误蔓延,提高网络安全性,如图 4 所示。

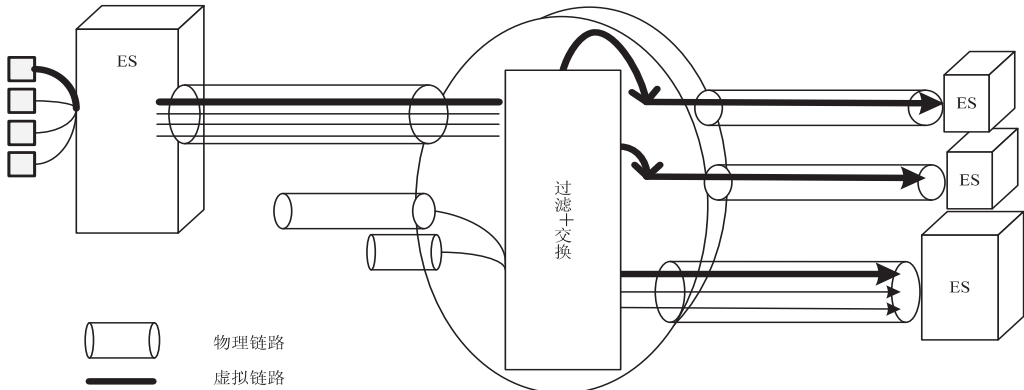


图 4 两级配置表技术示意图

AFDX 的安全性还体现在通信端口上。通信端口是单向的,端口要么是接收端口,要么是发送端口,不能两者兼顾或共享,避免了因端口争用而发生数据冲突。

3.5 QoS 机制

QoS (Quality of Service) 表示网络服务质量。从控制论角度讲,AFDX 是一种开环网络,没有反馈机制。它通过预先设定的配置表控制网络通信过程。基于以太网的 UDP/IP 协议完成数据分片、打包和组装^[5]。网络的数据错误通过网络设定的静态规则,如 CRC 校验、带宽控制、错误过滤、流量警管、完整性检查、冗余管理、最大延迟限定、虚链路分区隔离等过程控制机制来保证。发送方对错误数据包不重传,也不会根据网络错误或故障,自动改变或调节配置,除非工作中发生状态更新,则网络管理端系统将新的配置表通过配置

帧发到网络中所有节点,各个节点根据新配置表重新开始工作。

针对不同类型的应用,AFDX 提供两种通信端口和服务访问点 (Service Access Point, SAP) 端口。采样端口只能缓冲存储一条消息,到达的消息覆盖当前存储区内的消息,并提供刷新标志,表明当前端口缓冲区有新消息。采样端口适用于航电子系统间有较高时延要求的紧急消息、事件消息或状态消息。队列端口具有相对充裕的缓冲区,采用 FIFO 机制进行消息读写。若队列缓冲溢出,收到的帧将被丢弃,并向接收端传送错误消息,队列端口适合航电子系统间有硬性时延要求的周期性消息,如传感器数据传输。SAP 端口可提供 AFDX 与其兼容网络的通信服务,适用于非周期性也无时延要求的数据,如文件传输。简单文件传输协议 (Trivial File Transfer Protocol, TFTP) 通过 SAP 端口

提供网络文件传输服务^[13-14]。

4 AFDX 网络技术的应用

AFDX 主要用于航空飞行器中电子系统互联,包括引擎、飞行控制、导航系统及其他对操作平台至关重要的系统中。目前在大中型运输机航空电子网络的应用中,AFDX 表现出很强的适应性。另外,AFDX 网络

也在舰载、星载、车载、无人机、直升机、公务机中得到广泛应用。

如图 5 所示,AFDX 在 A380 上作为主干网络将飞行控制、驾驶舱、动力系统、电源管理、燃油液压控制和客舱分系统中的 LRU/LRM 连接起来,提供了分布式、高可靠、延时确定的数据通信网络平台,实现分系统间信息共享和通信^[2]。

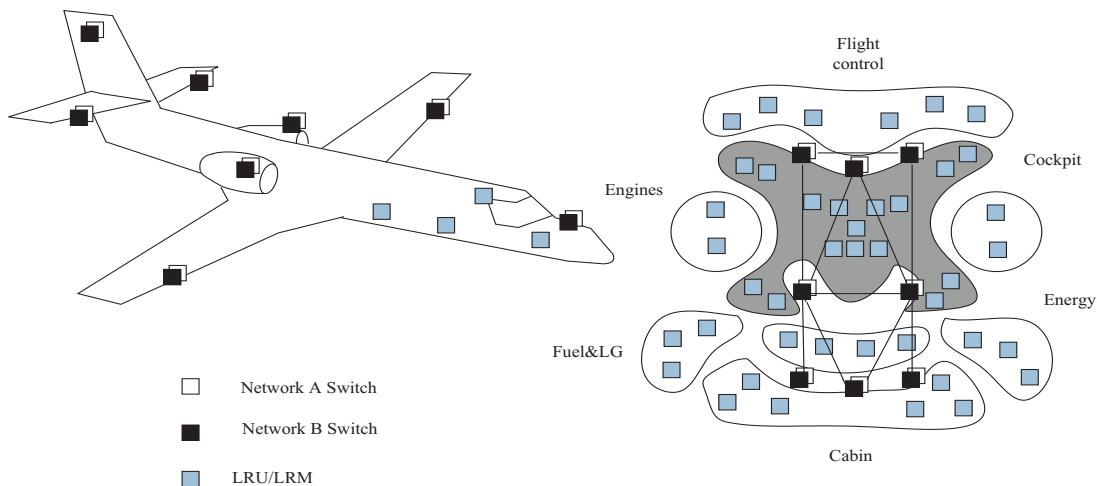


图 5 A380 上应用的 AFDX 网络

5 结束语

AFDX 网络作为新一代大型飞机高速机载网络标准,满足航电系统对高带宽、低延迟、强实时性、确定性、高可靠性的通信服务要求。研究 AFDX 协议关键技术,能为其在我国航空电子系统的应用提供必要的理论支撑,对提高航空电子系统的可靠性和安全性具有重要意义。

参考文献:

[1] Scharbag J L, Ridouard F, Fraboul C. A probabilistic analysis of end-to-end delays on an AFDX avionic network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2009, 5(1): 38-49.

[2] Charara H, Scharbag J L, Ermont J, et al. Methods for bounding end-to-end delays on an AFDX networks[C]//Proc of the 18th Euromicro conference on real-time systems. Dresden: IEEE Press, 2006.

[3] 熊华钢, 周贵荣, 李 峭. 机载总线网络及其发展[J]. 航空学报, 2006, 27(6): 1135-1144.

[4] 田 泽, 王绮卉, 侯 锐. AFDX 网络协议栈分析和设计[J]. 软件导刊, 2010, 9(4): 138-139.

[5] Schuster T, Verma D. Networking concepts comparison for avi-

onics architecture[C]//Proc of IEEE/AIAA 27th digital avionics systems conference. [s. l.]: IEEE Press, 2008.

[6] 宋 东, 曾星星, 丁丽娜, 等. AFDX 网络系统建模与仿真实现[J]. 测控技术, 2012, 31(2): 76-80.

[7] 陈文刚, 卢选民, 单 长, 等. 基于混合策略的 AFDX 分布式网络管理模型研究与实现[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(9): 2266-2268.

[8] 牛仕奇, 严胜刚, 任向隆. AFDX 终端系统实现方案研究[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(12): 2507-2509.

[9] 王 锦, 张奕楠, 熊华钢. AFDX 的分布式仿真[J]. 电光与控制, 2008, 15(8): 76-80.

[10] 李 亮. 浅谈航空电子全双工交换式以太网-AFDX[J]. 飞机工程, 2006(3): 48-50.

[11] 吴海荣, 罗 庆, 陈晓晨. AFDX 交换机测试分析系统设计[J]. 飞机设计, 2014, 34(3): 59-62.

[12] 叶佳宇, 陈晓刚, 张新家. 基于 AFDX 的航空电子通信网络的设计[J]. 测控技术, 2008, 27(6): 56-58.

[13] ARINC. Arinc project paper 664: aircraft data network, part7-avionics full duplex switched Ethernet (AFDX) network[S]. [s. l.]: ARINC, 2005.

[14] 夏大鹏, 田 泽. 基于 AFDX 终端系统测试的研究[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(8): 192-195.