

一种星载强容错 SpaceWire 总线网络拓扑设计与分析

牛跃华*, 赵文彦

(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

(* 通信作者电子邮箱 newjohn@126.com)

摘要:目前 SpaceWire 总线应用主要基于单个路由器上连接数个节点设备, 构成小型星状网络结构, 而对复杂航天器多节点情况下的 SpaceWire 网络系统应用研究较少。针对航天器高可靠要求, 提出一种总线型网络拓扑容错设计方案, 对网络工作方式、多层次冗余容错机制、系统可靠性和网络传输性能进行了分析推导, 结果表明提出的网络拓扑满足星载应用要求。最后根据分析结果提出了 SpaceWire 网络系统中数据包长、链路速率和节点布局的设计指导原则。

关键词:航天器; 路由; 容错; SpaceWire; 网络拓扑

中图分类号: V443.1 **文献标志码:** A

Design and analysis of a strong fault-tolerant on-board SpaceWire bus network

NIU Yuehua*, ZHAO Wenyan

(Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: SpaceWire bus is nowadays mainly used in the way that a few nodes are connected to a central router, forming a small star topology. Research on SpaceWire network with large number of nodes in complicated satellite is rare yet. A bus type topology of SpaceWire network was proposed concerning the high reliability demand of spacecraft. Operation principle and hierarchical fault-tolerant scheme of this network were analyzed, reliability and communication performance were also derived. The results indicate that the network topology satisfies requirements of spacecraft application. Design rules of packet length, link data rate and nodes layout in SpaceWire network were provided to support planning on-board SpaceWire network.

Key words: spacecraft; routing; fault-tolerant; SpaceWire; network topology

0 引言

SpaceWire 总线是由欧洲空间局(European Space Agency, ESA)、美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)等多个宇航机构以及学术组织共同制定, 面向航天器应用的新型高速串行总线标准, 采用了虫孔路由器机制来灵活构建网络, 实现星载设备和分系统之间的互联互通, 相比其他高速总线标准具有运行管理简单可靠的优点, 目前已在 ESA、NASA 等国际宇航机构的火星快车、韦伯望远镜等多个航天任务中得到应用和推广, 并成为空间高速总线领域的研究热点。文献[1-3]分别介绍了 SpaceWire 在系统级、设备级和芯片级的典型应用, 近年 SpaceWire 研究组连续通过国际大会发布最新研究进展^[4-6]。国内中国科学院空间中心最早进行了 SpaceWire 总线跟踪研究^[7], 目前我国航天器在 SpaceWire 总线应用上处于跟踪研究和初步应用阶段, 主要借鉴 NASA 和 ESA 的经验^[8-9]。

SpaceWire 总线目前应用的主要方式是点对点连接或采用单级路由器的小型星状网络^[10-11], 而对于节点较多的应用, 则需要采用多级路由来扩展网络结构。由于航天器的不可维修特性, 要求星载 SpaceWire 网络系统具有强容错能力^[12]。本文提出一种总线型延伸的 SpaceWire 网络容错拓扑, 从传输方式、分层协议和硬件可靠性方面对网络的容错性

能进行了定性和定量分析, 同时给出了容错型拓扑下 SpaceWire 网络传输性能的分析结果。

1 SpaceWire 网络容错拓扑设计

SpaceWire 总线网络由链路、节点和路由器组成, 网络中的信息流以离散数据包的形式在节点设备(或路由器)之间传递, 传输路径根据包头中的地址信息确定。SpaceWire 路由器支持自动组适应功能, 即两个路由器之间的多个链路可构成组适应链路, 同一组内的所有链路在功能上完全对等, 可相互替代或者同时传输不同的数据包。

SpaceWire 标准没有明确网络拓扑的形式, 需要根据工程应用的需求灵活设计, 在进行网络扩展时须采用多级路由器级联, 路由器沿同一方向级联形成的网络拓扑具有一般代表性, 这种网络拓扑与目前航天器上应用较多的 1553B、控制器局域网络(Controller Area Network, CAN)等总线型网络相似。基于以上分析并考虑星载网络冗余容错的要求, 提出总线型 SpaceWire 网络拓扑结构如图 1 所示。SpaceWire 网络中采用的两类基本功能模块包括路由器和节点接口模块。典型的路由器是由 ESA 支持设计的 8 端口 SpW-10X^[13], 节点设备端的 SpaceWire 接口提供设备内部主控模块对 SpaceWire 网络的访问; ESA 设计的典型节点接口芯片 SMCS332SpW 提供三个 SpaceWire 通道, 同时支持三个链路接口间的路由功能^[14]。

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-06-05。

作者简介: 牛跃华(1982-), 男, 陕西扶风人, 高级工程师, 硕士, CCF 会员, 主要研究方向: 空间数据系统、航天器数据管理; 赵文彦(1982-), 男, 河北石家庄人, 工程师, 硕士, 主要研究方向: 航天器数据管理。

图1的网络设计以上述两种功能模块为物理原型,其中Router为路由器,其余为节点设备,SMU代表卫星管理单元,Memory/Formatter代表数据存储与格式化设备,Scientific Instrument代表载荷设备,_N代表主份,_R代表备份。

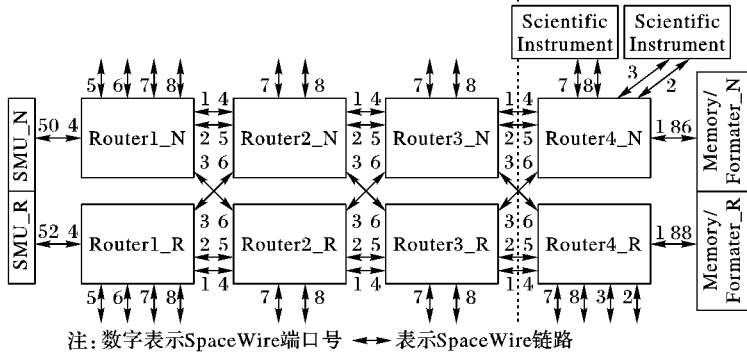


图1 SpaceWire 总线型网络拓扑结构

图1网络拓扑中,由一组主份路由器和双冗余的SpaceWire链路构成了主总线,另一组备份路由器和双冗余的SpaceWire链路构成了备总线,同时主、备总线之间通过交叉连接消除了路由器的单点失效模式,整个网络形成了完全对称的分级结构,便于扩展。图中4台接入网络的节点设备用于进行辅助说明。

SpaceWire网络数据链路层传输的数据包格式如图2所示,数据包头的目标地址用于确定数据包通过每级路由器时的输出口号,数据包尾的结束标识为流控制特征字符,表征数据包的结束。在数据包的装载数据区可以装入各种网络传输层协议定义的复杂数据结构,如远程存储访问协议(Remote Memory Access Protocol, RMAP)和国际空间数据系统咨询委员会(Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)包传输协议等^[15],也可以是用户自定义的状态、指令等数据块,这样实现了对SpaceWire网络数据传输协议的扩展,从而支持多种航天器数据应用业务在同一网络上的综合处理。不同传输协议由数据包内部的协议标识号进行区别,对数据包的解析处理依据协议标识号完成。

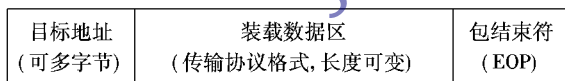


图2 SpaceWire 总线网络数据包格式

2 SpaceWire 网络容错特性

2.1 传输方式容错

每个SpaceWire路由器包含8个物理端口,端口地址取值范围1~8,此地址用于数据包的路径寻址;同时每个连入网络的节点设备的每个接口都会分配一个逻辑地址,取值范围32~255,用于进行逻辑寻址和判断接收数据包的正确性。两种寻址方式在网络中结合使用,数据包的传输方式设计有如下三种,在实际应用中由网络管理设备负责设定当前传输方式。

传输方式1 此方式为总线网络的优先和主要传输方式,所有节点设备和路由器的主份(或备份)工作,每两个路由器之间的组适应链路由两条独立链路共同构成,所有数据包传输采用逻辑寻址,由路由器根据路由表自动确定传输路

径。从卫星管理单元主(SMU_N)向存储复接单元主(Memory/Formatter_N)发送数据包格式为:<86><数据内容><EOP>,相应返回数据包格式为:<50><数据内容><EOP>。各主份路由器中配置了与逻辑寻址相关的路由地址表如表1所示,表中仅给出与上述数据包传输相关的部分。对于组链路的一组端口<1,2>,路由器优先选择1,其次选择2。

传输方式2 当传输方式1中的主干路上发生一个路由器失效或者一个组适应链路失效,如Router2_N失效,或Router2_N与Router1_N之间的组适应链路失效,则网络中的交叉链路和备份路由器启用,即Router2_R将会代替Router2_N工作,此过程由网络自动完成。数据包仍然采用逻辑寻址传递,格式与传输方式1中相同,各备份路由器中要配置与逻辑寻址相关的路由地址表。

表1 主份路由器路由地址表

Router1_N		Router2_N		Router3_N		Router4_N	
逻辑地址	路径地址	逻辑地址	路径地址	逻辑地址	路径地址	逻辑地址	路径地址
86	1	86	1	86	1	86	1
86	2	86	2	86	2		
86	3	86	3				
50	4	50	4	50	4	50	4
		50	5	50	5	50	5

传输方式3 当网络中某路由器的路由配置表发生错误时,网络采用路径寻址方式传输数据包,由于网络中链路级实现了多重冗余,因此两个节点设备间具有多个路径可选,通过静态分配的方式,可以有效避免路径上发生堵塞。如从图1中卫星管理单元主份(SMU_N)向存储复接单元主份(Memory/Formatter_N)发送数据包的路径寻址格式可设定为:<1><3><3><1><数据内容><EOP>。

2.2 协议容错机制

SpaceWire总线网络设计通过采取多层次的容错措施保证网络通信服务质量,如图3所示,协议容错机制包括:①链路冗余:SpaceWire总线网络的所有主(备)路由器之间采用双链路构成组适应链路,组适应链路 with 1553B 总线的双冗余工作机制相同,为完全的热备份模式。通过预先配置路由器的路由地址表,当一条链路失效时,另一链路将自动替代。②路由冗余:网络中的路由器分为主、备两组,按热冗余方式工作。③节点冗余:SpaceWire节点设备按照主备机冗余方式设计,分别通过主份和备份路由器接入网络。当发生链路或者单机失效时,可由备份通道或者备机替代工作。④协议容错:SpaceWire网络协议分为多个层次,每层设有容错措施,物理层和信号层采用屏蔽的低电压差分信号(Low-Voltage Differential Signaling, LVDS)传输、DS(Data-Strobe)编码等措施,保证信号具有很强的抗干扰性能;在数据字符层设置奇偶校验位检错;数据流的传输设置4个控制字实时反馈数据包传输状态,在链路出错后可自动初始化恢复;网络层路由器具有仲裁、看门狗等功能;传输层数据包内容采用循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)、RS(Reed-Solomon)纠错码保护;应用层采取错误检测处理、应答、重试等手段保证通信的可靠性。⑤网络管理:在网络系统中设置网络管理设备负责网络的健康状态维护。网络管理层采用路径寻址的方法周

期性对网络中的所有链路和路由器进行扫描,对于发现的故障进行修复、隔离,或对网络结构重新配置,从而保证系统连续安全可靠运行。

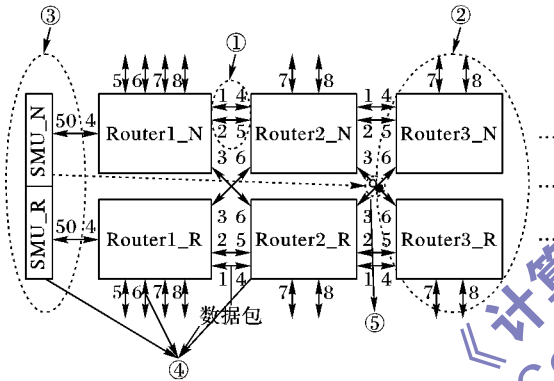
2.3 可靠性

可靠性代表总线网络能够成功进行数据包传输的概率。为便于建立可靠性模型,图1的SpaceWire总线网络简化为图3形式,路由器标记为 A_x ,路由器之间的组适应链路标记为 B_x ,交叉链路标记为 C_x ,所有同类型的模块具有相同的可靠度,每一级路由器和其右侧的链路共同构成网络的1级。根据图4建立整个总线网络的可靠性框图如图5所示,所有SpaceWire连接的失效率可认为相同, B_x 可以看作两条 C_x 并联,电子部件可靠度服从指数模型 $R = e^{-\lambda t}$ (λ 为失效率, t 为时间),所以有 $R_B = 2R_C - R_C^2$,则其中1级网络的可靠度如下:

$$R_{\text{stage}} = 2R_A(3R_C - 3R_C^2 + R_C^3) - R_A^2(3R_C - 3R_C^2 + R_C^3)^2 \quad (1)$$

整个 n 级总线网络的可靠度为:

$$R_S = R_{\text{stage}}^{n-1}(2R_A - R_A^2) \quad (2)$$



注①两条链路构成组适应链路,自动冗余和分担传输任务。

②每级路由器形成主备热冗余,可实时替代。

③支持节点以双机冷备或热备的模式接入网络。

④数据链路与传输协议分层容错:

- 物理层和信号层采用屏蔽的LVDS传输、DS编码等措施;
- 每个传输字符设置1比特奇偶校验位;
- 采用ESC、FCT、EOP等控制字符实时交换数据流传输状态;
- 路由器仲裁与看门狗超时监督;
- 装载数据采用CRC校验、RS纠错码保护;
- 节点检查接口状态、包顺序等。

⑤由可靠的星务计算机周期性对网络各设备健康状态检查,及时恢复或重新配置。

图3 SpaceWire网络协议分层容错机制

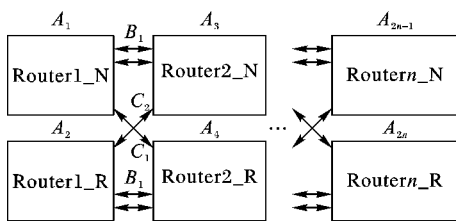


图4 SpaceWire总线网络模型

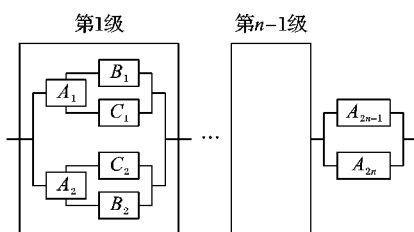


图5 SpaceWire总线网络可靠性框图

根据美国国家军用标准 MIL-HDBK-217F 手册提供的失效率模型,采用应力分析法得到路由器(A)和SpaceWire链路(C)的失效率分别为0.231(失效率数/ 10^6 h)和0.001092(失效率数/ 10^6 h),从而计算出规模为 $n = 4, 6, 11$ 的网络系统可靠度曲线如图6所示。可见通过冗余设计,多重路由的总线型SpaceWire网络在较大规模($n = 11$)和长寿命(15 a)条件下能够达到0.99以上,达到大部分航天器设计要求。

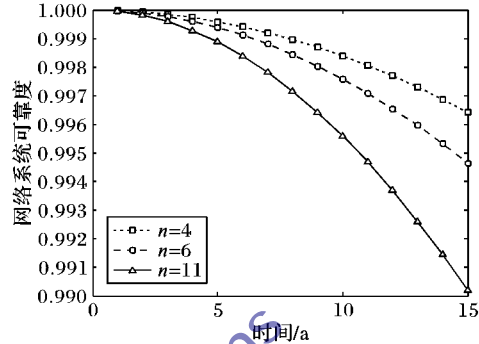


图6 总线网络可靠度曲线

3 网络传输性能分析

SpaceWire网络的主要目标是实现高速数据传输,目前SpaceWire芯片可达到的典型速率为200 Mb/s,容错型网络拓扑可以实现更高的网络吞吐。图1的总线型网络拓扑采用主份(或备份)路由器间的组适应链路以及主备路由器间的交叉链路实现链路级三冗余,因此总线带宽最高可以达到600 Mb/s,但考虑到数据包在传输过程中需要增加包装信息,有效速率会有所降低。相距 n 级路由器的两个节点间传递数据包最多需要增加 n B的地址信息和0.5 B的包尾信息,以RMAP数据包头最长20 B计算,设在总线上传输的整个数据包长为 N B,总线速率按照200 Mb/s计算,则有效传输带宽可表示为:

$$S = \left(1 - \frac{n + 20.5}{N}\right) \times 200 \quad (3)$$

根据式(3)得到节点距离 $n = 5, 10, 20$ 的情况下包长和有效带宽的关系曲线如图7所示。可以看到在包长较短时即使总线传输速率很高,但实际利用的有效带宽却较低,当包长达到200 B以上时,有效带宽可以迅速提高到接近总线传输速率,使总线网络高速率的优势得以发挥,因此在SpaceWire总线的应用中应避免传输大量的短数据包。

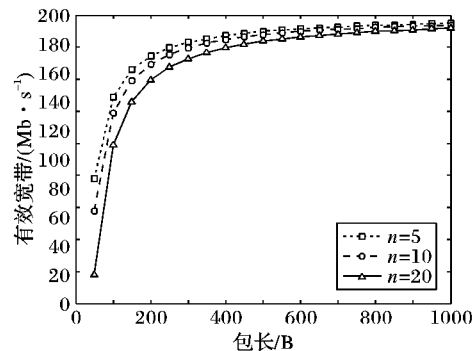


图7 包长与有效带宽关系曲线

SpaceWire总线标准允许速度在2~200 Mb/s的不同速率节点接入同一网络运行,速度过低的节点在网络中传输数据包时会较长时间占用链路,有可能导致堵塞使得其他节点

发送的数据包不能及时通过而产生延时。以下分析典型情况,设定:数据包长 T_p (单位为 B),链路速率 V (单位为 Mb/s),路由器延时 D_{sw} (单位为 μs),在无阻塞情况下,相距 n 级的两个节点间传递数据包耗时为:

$$D_s = T_p/V + nD_{sw} \quad (4)$$

若数据包传输过程中在每一级路由器都遇到堵塞情况,需要等待前一数据包传输完成后才能继续,则得到整个数据包最坏情况下传输耗时为:

$$D_b = (n+1)T_p/V + nD_{sw} \quad (5)$$

路由器延时 D_{sw} 为固定值,约 $0.5 \mu s$ 。图8为不同包长情况下相距 $n=5, 10, 20$ 的两个节点间的网络传输耗时计算结果, D_s 为无阻塞情况, D_b 为阻塞情况,链路速率 $V=200 \text{ Mb/s}$ 。可以看出网络无阻塞情况数据包长对传输延时影响极小,而发生阻塞时长数据包造成的传输延时随网络级数增加迅速增长。图9给出不同链路速率情况下,包长 T_p 分别取 50 和 1024 B 时的网络传输耗时结果,可以看出在速率低于 50 Mb/s 时,无阻塞情况下数据包传输延时受包长影响仍较小;而阻塞情况下的延时随包长增加呈现指数增长,会对实际应用造成严重影响;而当速率在 100 Mb/s 以上时,网络延时基本可稳定在较小的范围内。

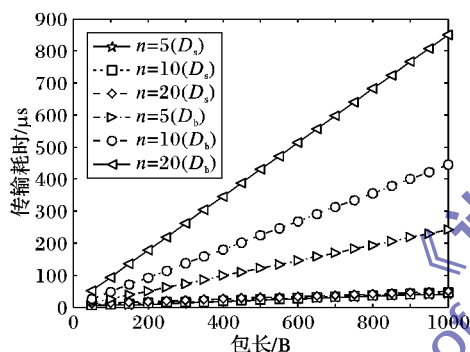


图8 不同包长情况下网络传输耗时曲线

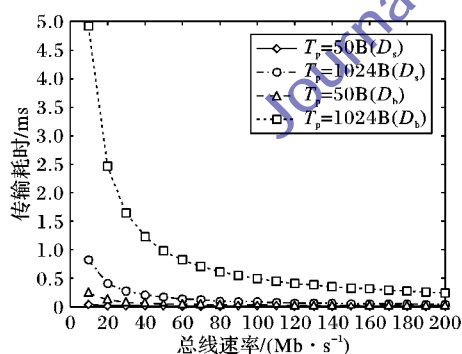


图9 不同链路速率下网络传输耗时

综合以上结果,在 SpaceWire 网络系统的设计中,须优化数据包种类,尽量采用长包传输以提高网络带宽利用率,同时兼顾路由器堵塞带来的延时,需根据系统允许的延时确定包长范围;为提高网络的整体效率所有链路接口可设置较高的发送速率。根据分析结果较优的参数为数据包长取 200 B 以上,链路接口速率取 100 Mb/s 以上。

本文提出的容错型网络中通过冗余链路降低了路由器堵塞的概率,可以更好地控制网络延时。同时通过设置数据包优先级,配置路由器按优先级进行仲裁,可保证具有实时性要求的数据包优先传输。另外对于相互之间有大块数据传输的

节点布置在网络中的相近位置,可以避免发生较长路径的堵塞,降低延时,如图1网络中的载荷仪器(Instrument)和存储复接单元(Memory/Formatter)连接在网络同一级上,载荷仪器产生的大量业务数据可直接快速进入存储器。

4 结语

本文针对 SpaceWire 总线网络在复杂卫星多节点应用环境下的扩展问题,提出单向延伸总线型网络拓扑,可将航天器上大量计算机设备和子系统纳入统一高速网络,实现并发信息传输和信息实时交互。通过网络结构的对称冗余设计提高了网络工作方式的灵活性和系统长期可靠性,在网络系统各层协议采取的容错处理机制保证了传输服务质量,满足星载应用要求。对网络特性分析结果表明,根据数据业务特点对网络数据包长度、链路接口速率和节点设备在网络中的位置布局进行优化设计,才能较好地发挥网络性能。后续可进一步完成网络仿真和验证工作。

参考文献:

- [1] YAMADA T, TAKAHASHI T. Standard onboard data handling architecture based on SpaceWire [C]// Proceedings of the 2nd International SpaceWire Conference. Nara: Space Technology Centre of Dundee University, 2008: 253 - 256.
- [2] DEAN B, WARREN R, BOYES B. RMAP over SpaceWire on the ExoMars rover for direct memory access by instruments to mass memory [C]// Proceedings of the 2nd International SpaceWire Conference. Nara: Space Technology Centre of Dundee University, 2008: 249 - 252.
- [3] MARSHALL J. Evolution and applications of system on a chip SpaceWire components for spaceborne missions [C]// Proceedings of the 2nd International SpaceWire Conference. Dundee: Space Technology Centre, University of Dundee, 2008: 73 - 81.
- [4] PARKES S, SHEYNIN Y, SUESS M, et al. Full proceedings of the 3rd International SpaceWire Conference [C]. Dundee: Space Technology Centre, University of Dundee, 2010.
- [5] PARKES S, BERTRAND A, SUESS M, et al. Full Proceedings of the 4th International SpaceWire Conference [C]. Dundee: Space Technology Centre, University of Dundee, 2011.
- [6] PARKES S, SUESS M, HABINC S, et al. Full Proceedings of the 5th International SpaceWire Conference [C]. Dundee: Space Technology Centre, University of Dundee, 2013.
- [7] LI H, CHEN X, SUN H. Research on SpaceWire network technology and application [C]// Proceedings of the 19th Consultancy Workshop of China Space Science Academy Space Exploration Group. Ningbo: China Space Science Academy, 2006: 586 - 591. (李慧军, 陈小敏, 孙辉先. SpaceWire 网络技术及应用研究[C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十九次学术会议. 宁波: 中国空间科学学会, 2006: 586 - 591.)
- [8] FENG L, LU W, FU P. Analysis of SpaceWire network layer protocol and application research [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2010, 24(6): 522 - 526. (凤雷, 鲁文帅, 付平. SpaceWire 网络层协议分析与应用研究[J]. 测试技术学报, 2010, 24(6): 522 - 526.)
- [9] CHEN X, GUO L, SUN H. The general situation of SpaceWire research in China [C]// Proceedings of the 5th International SpaceWire Conference. Gothenburg: Space Technology Centre of Dundee University, 2013: 184 - 185.

(下转第 2504 页)

$$10 \lg \left(\frac{\varphi_{x_{M-1}, \max}}{\varphi_{x_{M-1}, \min}} \right) + \cdots + 10 \lg \left(\frac{\varphi_{x_0, \max}}{\varphi_{x_0, \min}} \right) = \chi(\mathbf{R}_{x_{M-1}}) + \chi(\mathbf{R}_{x_{M-2}}) + \cdots + \chi(\mathbf{R}_{x_0}) \quad (9)$$

若对信号功率谱幅度取对数后均匀划分时,必然有(功率谱连续时) $\chi(\mathbf{R}_{x_i}) = \chi(\mathbf{R}_{x_j})$, 式(9)可表示为

$$\chi(\mathbf{R}_x) = M\chi(\mathbf{R}_{x_i}) \quad (10)$$

由此可见,可以通过控制子带的数目来控制信号自相关矩阵特征值扩散度,使其分布在合理的范围内。

实验仿真中全带信号的特征值扩散度的统计(100次)平均值为 55.2, 表 1 给出了采用均匀子带分解和基于功率谱的非均匀子带分解的特征值扩散度对比。由表 1 可看出,基于功率谱对信号进行非均匀子带分解,可以更有效地降低特征值扩散度,使特征值扩散度分布在合理范围内(由于实验中功率谱的划分是通过 DFT 求得的离散值,因此不严格满足式(10))。需要指出的是当全带信号功率谱幅度变化范围较大时,采用本文提出的方法与传统方法相比具有较大的优势。

表 1 特征值扩散度(统计 100 次)

子带	均匀子带分解	基于 PSD 的非均匀子带分解
0	34.6	10.7
1	32.8	9.7
2	4.1	9.8
3	48.4	10.6
4	34.1	10.4

4 结语

本文利用 DFT 频谱幅度分组完成的基于功率谱幅度进行非均匀子带信号分解的方法充分利用了信号功率谱幅度的信息,有效降低了信号自相关矩阵的特征值扩散度,使其分布在合理范围内,并且能够较好地实现信号的重构。需要指出的是,本文方法针对频谱变化范围较大的信号具有较大的优势。将该方法应用到子带自适应噪声抵消中将是以后进一步的研究方向。

参考文献:

- [1] MALANI A A, PANHI I M S, LOIZOT P C. A new delayless sub-band adaptive filtering algorithm for active noise control system [J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2009, 17(5): 1038 - 1045.
- [2] AMERE O, PATRICK N. Dynamic structures for non-uniform sub-band adaptive filtering [C]//Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Salt Lake City: IEEE Press, 2001, 6: 3717 - 3720.
- [3] CAI Y, HONG Y, YUAN J, *et al.* Subband adaptive echo cancellation technique in speech system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34, (7): 1448 - 1452. (蔡宇, 洪纛, 原建平, 等. 语音系统中的子带自适应回声消除技术 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1448 - 1452.)
- [4] ZHAO Y. Subband technologies research and its applications in wideband signal processing [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2012. (赵艳. 子带技术研究及其在宽带信号处理中的应用 [D]. 郑州: 信息工程大学, 2012.)
- [5] YANG F, WU M, JI P, *et al.* An improved multiband-structured subband adaptive filter algorithm [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(10): 647 - 650.
- [6] Cox R V. The design of uniformly and nonuniformly spaced speech coding [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, Signal Process, 1986, 34(5): 1090 - 1096.
- [7] ZHANG W, DAI X, XU X. A wideband blind linear equalizer based on non-uniform subband decomposition [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 758 - 765. (张炜, 戴旭初, 许小东. 基于非均匀子带的宽带线性盲均衡器 [J]. 电子学报, 2010, 38(4): 758 - 765.)
- [8] XU X, ZHANG W, DAI X. Power spectrum based non-uniform sub-band adaptive filtering [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 4(2): 112 - 118. (许小东, 张炜, 戴旭初. 基于功率谱幅度的非均匀子带自适应滤波 [J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 4(2): 112 - 118.)
- [9] WANG F, YANG Q. A method of non-uniform sub-band decomposition for wideband equilibrium [J]. Science and Technology Information, 2010(33): 101. (王鹏, 杨庆坤. 一种适用于宽带均衡的非均匀子带分解 [J]. 科技信息, 2010(33): 101.)
- [10] MA L, HUANG J, XIE D. New method for subband decomposition and perfect reconstruction based on DFT [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(6): 808 - 813. (马令坤, 黄建国, 谢达. 基于 DFT 的信号子带分解与准确重构新方法 [J]. 数据采集与处理, 2009, 24(6): 808 - 813.)
- [11] SHYNK J J. Frequency-domain and multirate adaptive filtering [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9(1): 14 - 37.
- [12] YANG L. Advanced digital signal processing [M]. Beijing: Science Press, 2007: 205 - 207. (杨绿溪. 现代数字信号处理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 205 - 207.)
- [13] DENG Z, LIU B, LI Y. Common power spectrum estimation methods and matlab simulation [J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(2): 50 - 52. (邓泽怀, 刘波波, 李彦良. 常见的功率谱估计方法及其 Matlab 仿真 [J]. 电子科技, 2014, 27(2): 50 - 52.)
- [14] CHENG P. Digital signal processing course [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 83 - 85. (程佩清. 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 83 - 85.)
- [15] PARKES S, ARMBRUSTER P. SpaceWire: Spacecraft onboard data-handling network [J]. Acta Astronautica, 2010, 66(1/2): 88 - 95.
- [16] ZHAO J, HE B. Onboard data system based on SpaceWire bus [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2009, 28(2): 13 - 17. (赵俊艺, 何兵哲. 基于 SpaceWire 总线的星载数据系统 [J]. 飞行器测控学报, 2009, 28(2): 13 - 17.)
- [17] WANG G, ZHANG X, GU Y, *et al.* Optimization method of redundant backup for SpaceWire bus [J]. Computer Engineering, 2014, 40(1): 305 - 308. (王国辉, 张晓宇, 关永, 等. SpaceWire 总线冗余备份优化方法 [J]. 计算机工程, 2014, 40(1): 305 - 308.)
- [18] MCCLEMENTS C, PARKES S, KEMPF G. SpW-10X SpaceWire router user manual, 7796G AERO [R]. [S. l.]: Atmel Corporation, 2013.
- [19] LIEBSTRCKEL U, FISCHER S, RASTETTER P, *et al.* SMCS332 SpW user manual, SMCS_ASTD_UM_100 [R]. [S. l.]: EADS Astrium GmbH, 2006.
- [20] ECSS. ECSS-E-ST-50-51C, Space engineering: SpaceWire protocol identification [S]. Noordwijk: European Cooperation for Space Standardization, 2010.

(上接第 2500 页)