

## 解码转发双向中继系统的 ARQ 协议研究 \*

沈泉江 武卓 郑国莘

(上海大学 特种光纤与光接入网省部共建重点实验室 上海 200072)

**摘要:** 研究了结合自动请求重传的解码转发双向中继系统在瑞利衰落信道中的端到端误报率以及频谱效率等性能。双向中继系统的两个源节点及中继节点都有缓冲存储器用来存储重传时不同时隙的接收信号。根据错误发生的节点以及重传情况的不同,为了充分利用不同时隙的接收信号,分别结合使用了最小均方差信号检测或者最大似然比合并算法。仿真结果表明,在解码转发双向中继系统中,相对于传统自动请求重传协议,采用增强 ARQ 协议能显著降低解码转发双向中继系统的误包率,从而提升系统的频谱效率。

**关键词:** 解码转发;自动请求重传;双向中继;误包率;频谱效率

**中图分类号:** TN925 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## Research on ARQ protocol for a decode-and-forward based two-way relay systems

Shen Quanjiang Wu Zhuo Zheng Guoxin

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** In this paper, we investigate the performance of the two-way decode-and-forward (DF) relaying system with automatic repeat request (ARQ) protocol in Rayleigh fading channels. In the proposed ARQ scheme, the ARQ process is carried out by all of the nodes including two source nodes and a relay node which have the buffers to store the signals received from different slots. In order to make full use of the received signals in different slots, MMSE signal detection and maximal ratio combining (MRC) are used in the protocol where retransmission are requested according to different conditions and nodes. In addition, simulation results show that the proposed protocol can improve the packet error rate (PER) and spectral efficiency of the DF based two-way relay system than the conventional ones.

**Keywords:** decode-and-forward (DF); automatic repeat request (ARQ); two-way relaying; packet error rate (PER); spectral efficiency

## 1 引言

在无线网络通信中,协作通信可以提高系统的吞吐率以及扩大网络覆盖范围<sup>[1-2]</sup>,其中采用物理层网络编码的双向中继系统能够有效的提升系统的频谱效率,因而受到了很多的关注<sup>[3-5]</sup>。在一个双向中继系统中,两个源节点通过一个中继节点进行信息的传递。为了保证通信的可靠性或者确保某些服务质量,自动请求重传(ARQ)协议被引入到中继系统来<sup>[6-11]</sup>。在现在通信系统中,ARQ 协议<sup>[12-13]</sup>是一种用来提升系统可靠性的错误控制机制。当信息以数据包的形式在两个节点之间进行通信时,如果目的节点正确的接受了信息,其就会向源节点发送一个确认(ACK)答复,从而源节点发送下一组数据。反之,如果目的节点的接受

数据有误,目的节点发回一个否认(NACK)答复,这时源节点重新发送该组数据。由于双向中继系统中包含 3 个节点,即 2 个源节点和 1 个中继节点,文献[6]中根据重传信息发送的位置不同,提出了 3 种不同的 ARQ 协议,并通过仿真比较了 3 种不同协议的频谱效率。文献[7]通论了基于网络编码的双向中继重传机制。文献[9-10,14]对基于放大转发(amplify-and-forward, AF)的双向中继系统中的 ARQ 协议进行了研究,讨论了系统的中断概率以及吞吐率等。近年来对于基于解码转发(decode-and-forward, DF)双向中继系统的 ARQ 协议研究相对较少,且当双向中继系统采用解码转发方式时分析研究的难度相对较大。

本文从减小系统的误包率以及提高系统的频谱效率的

收稿日期:2016-00

\* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(61132003)、上海市科委重大项目(15511107203)、上海市自然科学基金(14ZR1415100)资助项目

角度,研究了基于 DF 双向中继系统的 ARQ 协议。在中继系统的 3 个节点中,每一个节点都有用于存储不同时隙接收信号的存储器,这是与传统 ARQ 协议所不同的地方。同时根据重传发生的位置分别使用了最小均方误差(MMSE)信号检测算法与最大比合并(MRC)算法。仿真结果证明该方法能够有效的提高系统的频谱效率以及减小系统的误包率(PER)。

## 2 双向中继系统模型

如图 1 所示,双向中继系统包含 2 个源节点( $S_1$  与  $S_2$ )与 1 个中继节点( $R$ ),且每个节点都只有 1 根天线,工作在半双工模式下,即它们不能够同时进行接收信号。

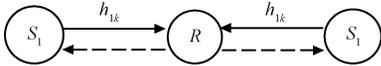


图 1 双向中继系统模型

假设在两个源节点中间无法进行直接通信,  $S_1$  与  $S_2$  的通信必须通过中继节点进行。假设信道系数在每个时隙内恒定,不同时隙内信道系数不相等且相互独立,分别用  $h_{1k}$  和  $h_{2k}$  表示  $S_1$  与  $R$  和  $S_2$  与  $R$  之间在第  $k$  时隙时的信道增益,它们是相互独立的零均值复高斯随机变量,方差分别为  $\sigma_{1k}^2$  和  $\sigma_{2k}^2$ ,即  $h_{ik} \sim CN(0, \sigma_{ik}^2), (i = 1, 2)$ 。此外,假设所有的接收节点均已知信道系数,且噪声在任何节点和任何时隙都是相互独立的、零均值、单位方差的复加性高斯白噪声,即  $n \sim CN(0, \sigma^2)$ 。

在双向中继系统中,传输包含两个阶段,即多址接入(MA)阶段和广播(BC)阶段。在 MA 阶段,  $S_1$  与  $S_2$  同时向中继  $R$  发送各自的信号。因此,中继  $R$  接收到的信号为:

$$y_R = \sqrt{P_1}h_{1k}x_1 + \sqrt{P_2}h_{2k}x_2 + n_{Rk} \quad (1)$$

式中:  $x_1$  和  $x_2$  分别为  $S_1$  与  $S_2$  发送的符号信息,  $P_1$  和  $P_2$  分别为  $S_1$  与  $S_2$  的发送功率,  $n_{Rk}$  为中继  $R$  处的接收噪声。

在 BC 阶段根据不同的转发方式,对于接收到的信号的处理方式也不同。这里中继工作在解码转发模式下,中继节点通过最大似然检测(ML)算法从接收信号  $y_R$  中联合解码出节点  $S_1$  与  $S_2$  发送的信息:

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \underset{\{x_1, x_2\}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \|y_R - (\sqrt{P_1}h_{1k}x_1 + \sqrt{P_2}h_{2k}x_2)\|^2 \right\} \quad (2)$$

在估计出  $\hat{x}_1$  和  $\hat{x}_2$  以后,中继节点采用异或的操作将  $\hat{x}_2$  和  $\hat{x}_1$  映射成信号  $x_R$ 。在 BC 阶段,中继节点将信号  $x_R$  广播至节点  $S_1$  与  $S_2$ ,因此,在节点  $S_1$  与  $S_2$  接收到的信号可表示为:

$$y_i = \sqrt{P_R}h_{i(k+1)}x_R + n_i, \text{ 其中 } i = 1, 2 \quad (3)$$

其中,  $P_R$  为中继节点的发送功率。同样可以通过 ML 检测算法估计出信号  $\hat{x}_R$ ,由于源节点  $S_1$  与  $S_2$  已知各自在 MA 阶段发送的信息,因此可通过异或操作得到对方所发送的信息。

此外,接收端利用循环冗余校验码(CRC)来检验接收的数据包是否正确<sup>[15]</sup>,且不考虑其带来的冗余。每一个节点的缓存大小是无限的。同时,假设反馈信号 ACK 或者 NACK 可以无误的、无时延的被接收端接收。考虑平坦 Rayleigh 衰落信道,任何衰落链路都保持相互独立,每个数据包在传输的过程中信道保持恒定不变,包与包之间相互独立<sup>[14]</sup>。接收端已知信道状态信息,而发射端不知道信达状态信息。另外,每个数据包的最大重传次数为  $N_{\max}$  ( $N_{\max} \geq 1$ )。

## 3 算法实现与分析

本文的目的在于提升双向中继系统传输的可靠性以及频谱效率。在没有 ARQ 协议时,如果接收端检测数据包无误,则接收端成功接收;如果接收端检测到数据包有误,则放弃此包并通知源节点发送下一数据包。这样势必会降低系统的可靠性和频谱效率。本文就是对传统 ARQ 协议在双向中继系统应用的改进。具体方案描述如图 2 所示。

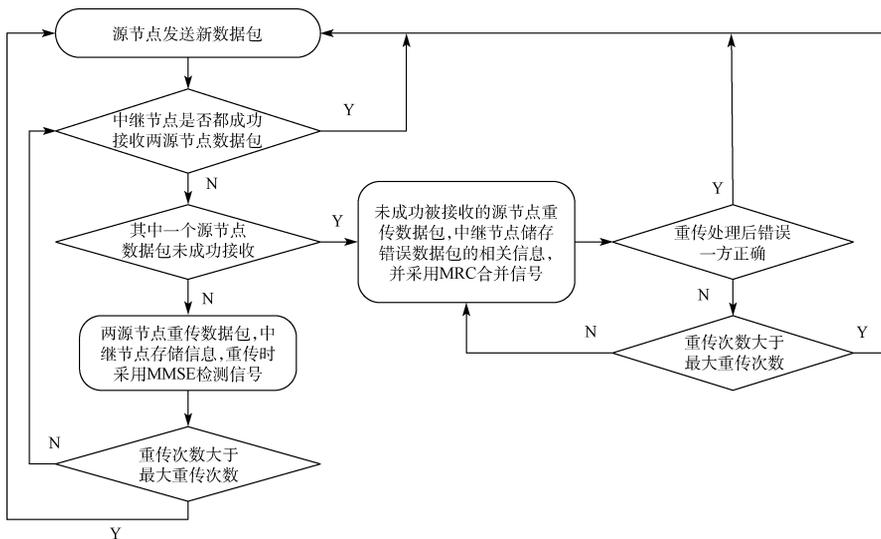


图 2 多址接入阶段跨层设计方案流程

首先,在第 1 时隙,节点  $S_1$  与  $S_2$  同时向中继节点  $R$  发送数据包,通过式(1)接收信号可表示为:  $y_R = \sqrt{P_1}h_{11}x_1 + \sqrt{P_2}h_{21}x_2 + n_{R1}$ , 解码出发送信号,并通过 CRC 判断是否正确接收 2 个源节点的数据包。根据判断结果的不同,中继节点  $R$  将做出如下反馈。

1) 如果  $x_1$  和  $x_2$  都解码正确,则中继节点  $R$  向节点  $S_1$  与  $S_2$  发送 ACK 信号,节点  $S_1$  与  $S_2$  准备发送下一数据包。

2) 如果  $x_1$  判别是正确的,而  $x_2$  判别为错误,则中继节点  $R$  向节点  $S_1$  与  $S_2$  分别发送 ACK 信号与 NACK 信号,此时,节点  $S_1$  准备发送下一数据包,而节点  $S_2$  重发上一个数据包,在节点  $S_2$  重传过程中,节点  $S_1$  保持沉默。由于  $x_1$  被正确接收,于是可以得到  $y_{R1} = y_R - \sqrt{P_1}h_{11}x_1 = \sqrt{P_2}h_{21}x_2 + n_{R1}$ , 并存储下来,节点  $S_2$  重传时中继节点  $R$  的接收信号为  $y_{R2} = \sqrt{P_2}h_{22}x_2 + n_{R2}$ , 于是对于节点  $S_2$  来讲中继节点在 2 个时隙内接收到的信号可表示为:

$$Y_R = \sqrt{P_2}H_2x_2 + N_R \quad (4)$$

式中:  $H_2 = [h_{11}, h_{12}]^T$ ,  $N_R = [n_{R1}, n_{R2}]^T$ 。使用最大比合并(MRC)算法,可以得到  $x_2$  的估计值。通过 CRC 判断是否正确。如果正确,中继节点将节点  $S_1$  与  $S_2$  发送的数据包进行比特异或操作,并经过调制进入 BC 阶段。如果判断的结果仍然错误,则中继继续要求节点  $S_2$  重发数据包,可以得到式(4)那样的结果,而此时  $H_2 = [h_{11}, h_{12}, \dots]^T$ ,  $N_R = [n_{R1}, n_{R2}, \dots]^T$ 。当重传次数达到最大重传次数  $N_{\max}$  时,依然判断错误,则抛弃此数据包,计入丢包,节点  $S_2$  准备发送一下数据包。此时中继将  $x_1$  广播给节点  $S_2$ 。

3) 如果  $x_2$  判别是正确的,而  $x_1$  判别为错误,处理与步骤 2) 相同,只是更换节点  $S_1$  与  $S_2$  角色。

4) 如果  $x_1$  和  $x_2$  都未正确解码出来,那么中继节点  $R$  存储接收信号  $y_R$ , 并向节点  $S_1$  与  $S_2$  发送 NACK 信号,节点  $S_1$  与  $S_2$  都要重发各自的信息。经过两个时隙,中继节点可以得到:

$$Y_R = \sqrt{P_1}H_1x_1 + \sqrt{P_2}H_2x_2 + N_R \quad (5)$$

式中:  $H_1 = [h_{11}, h_{12}]^T$ ,  $H_2 = [h_{21}, h_{22}]^T$ ,  $N_R = [n_{R1}, n_{R2}]^T$ 。利用 MMSE 信号检测算法,可以得到  $x_1$  和  $x_2$  的估计值,并进行判断。根据判断结果的不同处理的方式如上所述,直到达到最大重传次数。

在 BC 阶段,根据 MA 阶段的不同结果,中继节点将不同的信号广播出去。节点  $S_1$  与  $S_2$  分别根据判断的结果要求中继进行重传。发生重传时,节点  $S_1$  与  $S_2$  分别将几个时隙内接收的信号进行最大比合并,并判断是否正确。当重传次数达到最大重传次数时,接收的数据包依然不正确,那么就抛弃此数据包,并计入丢包数中。在节点  $S_1$  与  $S_2$  完成一个数据包的传输后,开始下一数据包的发送。

## 4 仿真与讨论

本节将进行仿真并讨论本文所提 ARQ 方案端到端误包率性能与频谱效率在不同最大重传次数下的性能以及不同调制方式对系统频谱效率的影响。在仿真中,不同的调制方式,前向纠错(FEC)的采用以及数据包的长度( $N_p$ )都会影响仿真结果。因此,本文令  $N_p = 1\ 080$  bit, 采用 QPSK 调制方式,不采用 FEC,并且关注于对称情况,即所有节点的数据发送速率相等为  $R_1 = R_2 = R_R = R$ , 发送功率相等为  $P_1 = P_2 = P_R = P$ 。

首先对系统的端到端误包率进行比较。如图 3 所示,  $N_{\max} = 0$  表示无跨层通信。从图中可以看到,有重传时,系统的误包率性能有很大的提高,且随着信噪比的变大,这种提升的效果更加明显。同样,随着最大重传次数的增加,这种性能的提升效果也更加明显。图中可以清晰的看到本文研究方案要远小于传统的重传方案,本文所提方案在最大重传次数为 2 的情况下,系统端到端误包率要远小于传统方案最大重传次数为 3 的情况。这可以有效地减小系统时延。

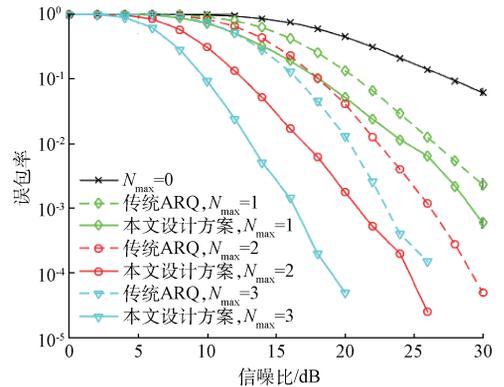


图 3  $N_{\max}$  从 0~3 时传统 ARQ 协议与所提协议端到端误包率性能比较

图 4 给出了对称双向中继系统中传统 ARQ 协议与本文所研究的协议对频谱效率性能的比较。频谱效率(bit/symbol)定义为成功接收的比特与传输这些比特所需时隙与成功接收符号数乘积的比值。

从图 4 中可以看到相对于没有重传技术的情况,两种方案均能有效提高系统的频谱效率,但是本文所研究的方案相对于传统的 ARQ 协议有更好的性能提升,特别是在低信噪比的情况下。在最大重传次数为 2,信噪比为 15 dB 的情况下,在解码转发双向中继系统中相对于传统 ARQ 协议,本文方案可以提高 0.36 bit/symbol,是很有意义的速度提升。同时可以看到,随着重传次数的增加,频谱效率不断提高。然而这种提高随着信噪比的不断增加,提升的速度逐渐减小,这说明重传次数没必要很大。较小的重传次数能够减小系统时延与存储器空间大小,从而提升系

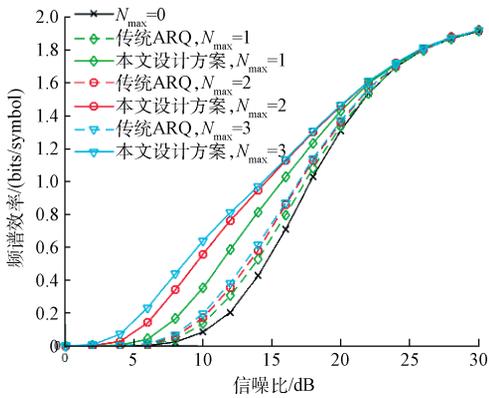


图 4  $N_{\max}$  从 0~3 时传统 ARQ 协议与所提协议端到端频谱效率性能比较

统的时延—吞吐率效率。

图 5 考虑不同调制方式对于频谱效率的影响。在固定调制方式下,利用重传技术能够提升系统性能,但是对于高信噪比的情况,频谱效率却无法得到提升。此时的传输可靠性已经满足了系统的可靠指标,如果继续采用固定的调制方式,势必会造成频谱资源的浪费,通过提高调制阶数可以进一步提升系统的频谱效率。因此,可以在低信噪比的情况下采用低阶调制方式,而高信噪比的情况下采用更高阶的调制方式进行,以此充分利用信道条件,提高系统的频谱效率。

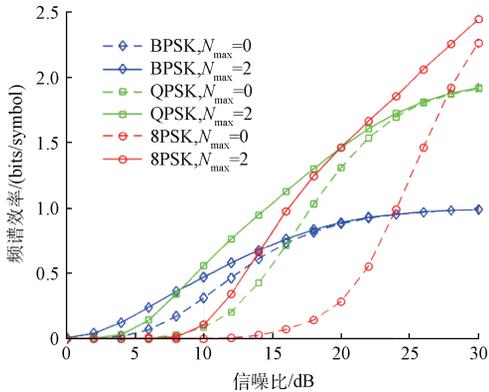


图 5 不同调制方式对于频谱效率的影响

## 5 结 论

本文研究了基于双向中继系统的 ARQ 协议,在不同重传情况下采用了最小均方误差信号检测算法与最大比合并算法。针对衰落无线信道重点研究了信道链路可靠性的提升,包括端到端误包率与频谱效率。通过仿真结果可以看到该研究能够有效地提高系统的频谱效率与降低系统的误包率。随着重传次数的增加,频谱效率的提升效果逐渐降低,这说明在实际应用中不能简单地通过增加重传次数来提高系统的频谱效率。针对图 4 所提出的问

题,未来可以将自动调制编码技术与自动请求重传技术结合进行跨层设计,根据不同信道状况采用不同的调制方式以此来提高系统的频谱效率。对于如何推导解码转发中继系统下的性能表达式还需进一步思考。

## 参考文献

- [1] 吕红芳,张浩. 协作中继网络资源分配控制算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(4): 880-888.
- [2] 谢鲲,谢可欣,文吉刚,等. 面向协作通信的忙音信道接入机制[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(10): 1062-1073.
- [3] POPOVSKI P, YOMO H. Physical network coding in two-way wireless relay channels [C]. IEEE International Conference on Communications (ICC07), IEEE, 2007: 707-712.
- [4] JU M C, KIM I M. Error performance analysis of BPSK modulation in physical-layer network-coded bidirectional relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(10): 2770-2775.
- [5] KIM S J, MITRAN P, TAROKH V. Performance bounds for bidirectional coded cooperation protocols[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(11): 5235-5241.
- [6] CHEN Z, ZHANG C, ZHANG J, et al. ARQ protocols for two-way relay systems [C]. 2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), IEEE, 2010: 1-4.
- [7] VIEN Q T, TRAN L N, NGUYEN H X. Network coding-based ARQ retransmission strategies for two-way wireless relay networks [C]. 2010 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), IEEE, 2010: 180-184.
- [8] CHEN Z, GONG Q, ZHANG C, et al. ARQ Protocols for two-way wireless relay systems: design and performance analysis [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012, 29(2): 165-168.
- [9] WANG C L, CHO T N, LO W C, et al. Efficient ARQ protocols for a two-way amplify-and-forward relaying system [C]. 2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), IEEE, 2013: 1-5.
- [10] XU K, GAO Y, XU Y, et al. Diversity-multiplexing tradeoff analysis of af two-way relaying channel with hybrid ARQ over rayleigh fading channels [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(3): 1504-1510.
- [11] 徐峰,岳殿武. 分布式协作通信网络中一种新的跨

- 层设计方案[J]. 电子学报, 2009, 37(7):1434-1439.
- [12] 王心霖, 许成谦. 无线网络中基于能量有效性的吞吐量跨层控制协议[J]. 电子测量技术, 2010, 33(5): 54-57.
- [13] 黄武. TD-LTE 中 HARQ 进程数据传输流程设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(10): 58-61, 78.
- [14] LUO S, TEH K C. Amplify-and-forward based two-way relay ARQ system with relay combination[J].

Communications Letters, IEEE, 2015, 19(2): 299-302.

- [15] 肖飞, 余子寒, 隋天宇, 等. LTE 中 CRC 算法的研究与实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(7):36-39.

## 作者简介

**沈泉江**, 1990 年出生, 上海大学通信与信息工程学院工学硕士, 主要研究方向为双向中继跨层设计等。

E-mail: qjshen123@shu.edu.cn

(上接第 133 页)

- [7] 杨靖. 一种热释电红外人体动作形态传感器的研究[D]. 北京:清华大学, 2010.
- [8] 郑娱, 鲍楠, 徐礼胜, 等. 跌倒检测系统的研究进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(4): 5071-5076.
- [9] 许继平, 李景涛, 彭森, 等. 基于三轴加速度传感器的老年人摔倒检测系统[J]. 计算机仿真, 2014, 31(12): 434-437.
- [10] 万雪芬, 杨义, 周红伟, 等. 用于煤矿井下安全告警的智能腰带[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 98-103.
- [11] 崔英辉, 詹林. 基于三轴加速度传感器的老人摔倒检测[J]. 现代电子技术, 2013, 36(3): 130-132.
- [12] 黄韬. 超声测距倒车雷达及其车载 CAN 总线智能节点研究[D]. 合肥:安徽大学, 2010.
- [13] 高飞, 王太杰, 吴攀, 等. 双足行走机器人多舵机控

制及动态平衡研究[J]. 高校实验室工作研究, 2012(1): 117-119.

- [14] 余家宝, 赵辉, 李瑞祥, 等. 基于 ZigBee 的可穿戴式跌倒监护系统[J]. 信息技术, 2014(3): 114-116.

- [15] 张军建, 赵捷, 安佰京, 等. 基于三轴加速度传感器的跌倒检测研究[J]. 现代生物医学进展, 2014, 14(18):3585-3588.

## 作者简介

**冯涛**, 桂林电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为智能检测仪器与系统。

E-mail: 1009948379@qq.com

**陈洪波**(通讯作者), 工学博士、教授, 硕士生导师, 主要研究方向为生物医学信息处理与分析、模式识别等。

E-mail: hongbochen@163.com

(上接第 166 页)

- [8] 徐进, 徐蔚, 王桥. 基于 1394b 总线高效率通信的研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9):132-135.
- [9] YUSHENG Y, CHUNXI Z, HAITAO Q. Modeling and performance evaluation of IEEE-1394b isochronous data transfer with DSPN[C]. 2010 2nd International Conference on Advanced Computer Control (ICACC), IEEE, 2010, 5: 152-156.
- [10] QIU P, WANG G, CHEN J, et al. Study on optical fiber bus technology based on IEEE 1394B [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(11): 13.
- [11] SUN Q, WU Y, ZHENG X, et al. Application of fibre channel technology in the united avionics network [J]. Information Security and Communications Privacy, 2009(5): 58.
- [12] 凤雷, 冯收, 乔家庆, 等. FC-AE-1553 设备光纤接口电路的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2012, 35(7):62-65.

- [13] 付平, 张佳宁, 赵辛雨, 等. FC-AE-1553 验证系统结构研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(1): 124-128.

- [14] 张昊, 张春熹. SpaceWire 总线 EMC 设计分析[J]. 电子测量技术, 2014, 37(9): 41-44.

- [15] FERRANDIZ T, FRANCES F, FRABOUL C. Worst-case end-to-end delays evaluation for SpaceWire networks [J]. Discrete Event Dynamic Systems, 2011, 21(3): 339-357.

- [16] 张英静, 熊华钢, 刘志丹. 可用于航空电子系统的时间触发以太网[J]. 电光与控制, 2015, 22(5): 49-53.

## 作者简介

**张杰**, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为数据总线技术、显示与控制技术等。

E-mail: fingertouch@outlook.com