



中國電子學會
CHINESE INSTITUTE OF ELECTRONICS

中国电子学会 第十五届青年学术年会 论文集



张 军 主编

航空工业出版社

中国电子学会第十五届 青年学术年会论文集

张 军 主编

航空工业出版社
北 京

TN/07/4085

内 容 提 要

本书收录了中国电子学会第十五届青年学术年会精选的 62 篇学术论文,集中反映了我国电子领域的现状和青年科研技术人员近年来的学术水平。

本书所选论文涵盖电子信息、自动控制、计算机、通信网络等领域,汇集了大量的新思想、新技术、新成果,具有先进性、创新性和实用性,有较高的学术参考价值,适合从事电子相关领域的科研院所、大专院校师生和企事业单位技术人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国电子学会第十五届青年学术年会论文集 / 张军主编. —北京: 航空工业出版社, 2009. 10
ISBN 978 - 7 - 80243 - 287 - 1

I. 中… II. 张… III. ①电子技术—学术会议—文集
②信息技术—学术会议—文集 IV. TN01 - 53 G202 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 190581 号

中国电子学会第十五届青年学术年会论文集
Zhongguo Dianzi Xuehui Dishiwujie Qingnian Xueshu Nianhui Lunwenji

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2009 年 10 月第 1 版

2009 年 10 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 23 字数: 598 千字

印数: 1—1000

定价: 70.00 元

目 录

利用 Omnet ++ 仿真评估 IEEE 1588 在 C/S 结构中的同步性能	(1)
LDPC 码在卫星通信中的应用研究	(6)
EAP-AOTP 协议设计及其安全性分析	(11)
基于蚁群算法的 8PSK 星座映射	(17)
自适应预约按需传输的多址接入协议	(21)
一种新的基于多播查询的无线传感器网络数据分发协议	(26)
无线传感器网络中的跨层拥塞控制协议	(34)
认知无线网络中的频谱检测	(41)
一种基于移动锚节点的无线传感器网络节点定位方法	(50)
移动 Ad hoc 网络中无冲突按需多址接入协议	(56)
基于三维视图的网上艺术品交易平台研究	(63)
基于时间和事件的一次性口令认证机制的研究	(69)
XML 技术在 AFDX 网络配置中的应用	(73)
实时通信设备任务调度与任务间通信方法研究	(78)
一种用于传播通信的新的 FSK 解调方法	(83)
一种解决网络编码资源优化的改进量子遗传算法	(88)
关于 ADS-B 实际运行中出现问题的分析	(94)
心电信号网络传输设计	(98)
基于 RFID 的学生考勤系统设计	(103)
铜互连的热应力特性研究	(109)
新型多频带平面单极子天线的研究	(114)
航空行李运输 RFID 编码及射频安全风险	(118)
卫星二次电源自动测试系统的设计与实现	(124)
无锁队列在一种遥控指令转发软件中的应用	(129)
一种小型陷波超宽带天线	(135)
卫星测控数据处理系统的平台化设计研究	(140)
卫星测控分系统地面自动测试系统的设计	(145)
LUA 脚本在卫星数管分系统自动化测试中的应用	(150)
应用于 WLAN 的三频带印刷三 T 型单极子天线	(155)
一种多用户调度的多天线 SLNR 波束成形方法	(160)
任意纵向变掺杂体硅横向功率器件二维耐压模型	(167)
基于 DSP 的 FPGA 动态重构系统设计	(173)
一种基于云台控制角反射器的靶标设计	(178)
一种新型的超宽带天线	(184)

超宽带阵列的时域辐射波形特性研究	(189)
广义似然比检验在 APES 相干函数估计的应用研究	(197)
用于声学回声抵消的基于小波变换和快速 QR 分解递归最小 M-估计的新型鲁棒自适应 算法	(203)
基于最优小波包变换的弱信号检测方法	(210)
Spike-sorting 算法与集成化研究现状	(218)
一种基于多点平滑误差的目标自动检测跟踪方法	(224)
应用层析成像技术进行粮仓异物探测	(231)
一种基于复合域运算的 $GF(2^{16})$ 求逆的高效实现方法	(236)
基于贝叶斯分类的实时运动目标跟踪	(245)
基于 ARM&GPS 的城市资源探测分析系统的研究	(252)
基于 MB-LBP 的人脸哈希加密算法	(258)
声像位置控制算法	(264)
网络不良视频信息过滤系统的设计与实现	(268)
一种基于 $GF(2^{16})$ 求逆的 S 盒的复合域算法	(272)
基于多摄像机的虚实匹配注册方法	(279)
基于红外标志点的移动增强现实系统	(286)
基于有先验的曲线演化的目标检测算法	(293)
空心高斯光束聚焦特性研究	(300)
用于大气和水下通信的 421.55nm 法拉第反常色散滤光器	(306)
无线光通信中 Turbo 乘积码的性能分析	(310)
基于激光相位噪声的真随机数发生器的设计规范	(315)
相干态光源含噪声情况下连续变量量子密钥分发的安全性分析	(319)
全景式航空红外相机像移补偿及其误差分析	(325)
基于变分模型的红外/可见光图像配准方法研究	(333)
基于单亲遗传算法的环网光缆路由策略	(338)
基于变长光分组的光缓存器灵活性研究	(344)
利用白光发光二极管实现光无线系统的表现分析	(350)
一维分形结构光子晶体自相似特征研究	(356)

CONTENTS

Synchronization Performance of IEEE 1588 Simulation Using Omnet ++ Based on C/S Structure	(1)
Application of LDPC in Satellite Communication	(6)
EAP-AOTP Protocol's Design and It's Security Analysis	(11)
The Constellation Mapping of 8PSK Based on Ant Colony Algorithm	(17)
Adaptive Reservation On-demand Transmission MAC Protocol	(21)
A New Multicast-query-based Data Dissemination Protocol for Wireless Sensor Networks	(26)
A Congestion Control Protocol Based on Cross-layer Design in Wireless Sensor Networks	(34)
Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks	(41)
A Localization Algorithm with Mobile Anchors for Wireless Sensor Networks	(50)
Collision-free On-demand Multiple Access Protocol for Mobile Ad hoc Networks	(56)
The Works of Art Online Trading Platform Based on Three-dimensional View	(63)
Research on One Time Password Based on Time and Event	(69)
Application of XML Technology in AFDX Network Configuration	(73)
Research on Multi-task Scheduling and Multi-task Communication Method for Real-time Communication Device	(78)
A New FSK Demodulation Method Used for Fax Communication	(83)
An Improved Quantum Genetic Algorithm for Network Coding Resource Optimization Problem	(88)
Analyzing ADS-B Outage Reasons	(94)
The Design of ECG Data Network Transmission	(98)
Based RFID Design for System of Student Attendance	(103)
Thermal Stress Characteristics Study of the Cu Interconnects	(109)
Analysis of a Novel Planar Multi-band Monopole Antenna	(114)
RFID Coding and RF Security Threats in Airline Baggage Transportation	(118)
Design and Realization of Automated Test System for Satellite Secondary Electric Source	(124)
Application of Lock-free Queue in a Fast Command Relay Software	(129)
A Compact Ultra-wideband Antenna Having Band-notch Function	(135)
The Platform Designing of Satellite Telemetry and Telecontrol Data Processing System	(140)
Automatic Test System for TT&C Subsystem of Satellite	(145)

The Application of LUA Script of Automatic Testing in Satellite Data Management Subsystem	(150)
Printed Triple-T Monopole Antenna for Three-band WLAN Operations	(155)
Multi-antenna SLNR Beamforming Method Based on User Scheduling	(160)
A 2-D Breakdown Model of Bulk-silicon Lateral Power Device with Arbitrary Vertical Doping Profile Drift	(167)
Dynamically Reconfigurable System of FPGA Based on DSP	(173)
Target Design of Radar Reflector Controlled by Cloud Platform	(178)
Design and Analysis of a Novel Ultra-wideband Antenna	(184)
Research on Time Domain Radiation Characteristic of UWB Array	(189)
Combination the APES-based Magnitude Squared Coherence Estimator with the GLRT-based Rank Detection	(197)
A New Robust Wavelet-based Fast QRD Recursive Least M-estimate Adaptive Filtering Algorithm for Acoustic Echo Cancellation	(203)
An Approach for Weak Signal Detection Based on Optimal Wavelet Packet Transform	(210)
Spike-sorting Algorithm and Integration Research Situation	(218)
An Improved Smoothing Error Tracking Algorithm Based on Optical Flow Method	(224)
Tomography Technology Detecting Unconventionality Object in Barn	(231)
An Efficient Implementation for $GF(2^{16})$ Inversion Based on Composite Field	(236)
Real-time Object Tracking Based on Bayesian Classification	(245)
Research on Analytic System of the Urban Resources Based on ARM & GPS	(252)
An Improved Face-hashing Algorithm Based on MB-LBP	(258)
Sound Source Image Position Control Algorithm	(264)
The Design and Implementation of Unhealthy Internet Video Information Filtering System	(268)
A Composite Field Algorithm of S-box Based on $GF(2^{16})$ Inverse	(272)
Multi-camera Based Registration for Mixed Reality	(279)
Mobile Augmented Reality System Based on Infrared Markers	(286)
Object Detection Algorithm Based on Curve Evolving with Prior	(293)
Focusing Properties of Hollow Gaussian Beams	(300)
Faraday Anomalous Dispersion Optical Filter at 421.55nm for Atmospheric and Underwater Optical Communications	(306)
Performance Analysis for Turbo Product Codes in Free Space Optical Communication	(310)
Criteria on Designing a Truly Random Number Generator Based on the Measurement of the Phase Noise of Laser	(315)
Security Analysis of CV-QKD with Noisy Coherent States	(319)
Image Motion Compensation and Its Error Analysis for Panoramic Aerial IR Camera	(325)
Research on Infrared/Visible Image Registration Based on Variational Model	(333)

CONTENTS

Application of Partheno-genetic Algorithm for Ring Fiber Routing	(338)
Optical Buffer Flexibility for Variable Length Packets	(344)
Performance Analysis of Indoor Optical Wireless System Using White Light LEDs	(350)
Self-similar Behavior of One-dimension Fractal Photonic Crystal	(356)

利用 Omnet ++ 仿真评估 IEEE 1588 在 C/S 结构中的同步性能

陈孝良 马龙华 程晓斌 李晓东

(中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室, 北京 100190)

Synchronization Performance of IEEE 1588 Simulation Using Omnet ++ Based on C/S Structure

Chen Xiaoliang Ma Longhua Cheng Xiaobin Li Xiaodong

(Key Laboratory of Noise and Vibration, Institute of
Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘 要: 利用 Omnet ++ 的离散事件仿真原理, 建立网络测量和控制系统中的时钟模型、网络模型和精密时钟同步模型 (IEEE 1588), 并且针对 C/S 结构体系, 通过分析影响网络时钟同步性能的两个关键因素——时钟偏移和传播延迟, 仿真和评估网络精确时钟同步的性能, 特别是对交换机在 IEEE 1588 体系中的作用进行了研究, 并提出 C/S 结构下选用交换机的建议。

关键词: 时钟同步; 离散事件仿真; IEEE 1588; Omnet ++; PTP; C/S

1 引言

IEEE 1588 (也称 PTP 协议, Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems), 即网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准, 是目前在分布式测量、工业自动化和通信领域, 利用网络线路实现精确时钟同步的最佳方案^[1]。然而由于 IEEE 1588 不同实现方案的时钟同步精度相差很大, 即使同一方案也可能由于环境的变化造成同步精度的差异, 而网络一直又是不稳定的环境, 因此对于 IEEE 1588 同步性能的评估一直是较为关注的问题。在这方面国外已经作了一些研究, 并且提出了几种测试方法和模型。IEEE 1588 的主要贡献人 John C. Eidson 首先分析论证了影响同步性能的两个关键因素分别是时钟偏移和传播延迟^[1]; 随后 Giorgi 提出了利用 Omnet ++ 仿真评估 Clock Servo 同步性能的方法^[2]; Benetazzo 也提出了利用 PPS (秒脉冲) 触发的方法来评估纯软件 IEEE 1588 的同步性能^[3]; Luca 在 2008 年归纳了测量传播延迟的常用方法和模型^[4]; 在此基础上 Ruxandra 等人利用 Matlab 实现了 P2P 环境下 IEEE 1588 的仿真, 详细分析了时钟偏移和延迟抖动对同步性能的影响^[5]。但是 Ruxandra 等人

的仿真方案仅仅支持两个节点,不能仿真网络环境的不稳定因素,比如流量异常、交换机堵塞等,而且仿真模型非常固定,不能添加更多的仿真元素。

事实上,目前网络测量和控制系统采用的仍然是数据集中式的客户机/服务器(Client/Server, C/S)结构,即分布在不同地理位置的各个传感器将数据汇聚到中心节点进行集中式处理。不同于P2P的对等结构,C/S结构的流量是不对称的,这就造成了整个测量网络的流量不平衡问题。流量不平衡将严重影响网络传播延迟时间的计算,也就制约着网络测量和控制系统中精密时钟同步的性能。因此仿真模型中考虑C/S结构的影响显得尤为重要。本文的主要贡献就是建模并仿真C/S结构下的精密时钟同步协议,特别是交换机对于精密时钟同步的影响。

2 建模与仿真

Omnet++ (Objective modular network testbed in C++) 是一个开源的模块化开放网络仿真平台,是近年来在科学和工业领域里逐渐流行的一种优秀的网络仿真平台。Omnet++可以快速定义网络拓扑结构,具备编程、调试和跟踪支持等功能。通过Omnet++可以建模网络时钟同步模型中的几个关键因素:时钟模型(偏移和调整)、网络模型和IEEE 1588模型,用来验证C/S结构中流量不平衡对于网络时钟同步性能的影响程度。

2.1 时钟模型

时钟会由于各种环境因素的影响而产生时钟偏移,造成时钟的抖动。通常时钟偏移都可以使用特定的数学模型来表示,比如Simple Skew Model模型经常作为时钟偏移的数学模型^[6],其公式如下:

$$\theta(t) = \theta_0 + \lambda t + \omega(t) \quad (1)$$

其中, t 是当前时间, $\theta(t)$ 是时钟偏移, λ 是线性频移系数, $\omega(t)$ 是由于晶振老化、温度变化和机械振动等引起的时钟抖动, $\omega(t)$ 采用Giorgi的方案^[2],即 $\omega(t)$ 认为是高斯噪声。

时钟调整模型采用锁相环PLL(Phase-locked Loops)策略(图1),仿真滤波器的差分方程如下:

$$y(n) = y(n-1) + x(n) - 0.5x(n-1) \quad (2)$$

其中, n 是同步循环次数, x 是误差变量。

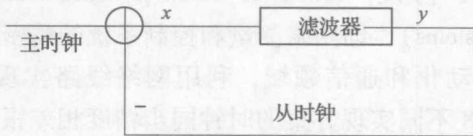


图1 从时钟调整的简单PLL模型

2.2 网络模型

IEEE 1588定义的主时钟/从时钟模型也是一种C/S结构,如图2,网络模型由1台主时钟(即服务器)通过交换机连接5台从时钟(即客户机)组成。主时钟节点拥有多个线程模型,可以同时管理多个从时钟节点的连接和数据交换,但是主时钟节点除了传递IEEE 1588消息,不会向各从时钟节点发送数据。各从时钟节点不仅交换IEEE 1588消息,而且可以主动向主时钟节点通过交换机持续发送数据,这就仿真了网络中的流量不对称现象,即上行到主时钟的流量要远远大于下行到从时钟的流量。

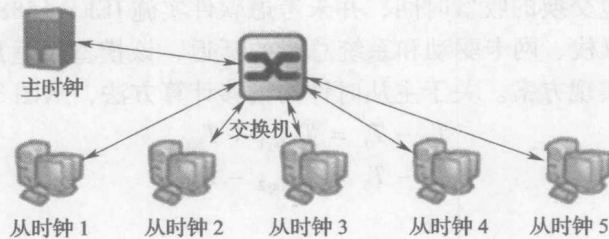


图2 Omnet ++ 仿真模型

交换机常用存储-转发的处理策略，即先缓冲一段数据，稍加分析后再对端口进行转发。这种处理方法破坏了传播延迟对称性的假设，因为通过交换机发送和接收数据的时间会由于存储-转发策略而发生了改变。但是存储-转发策略的实现算法满足一定的约束条件，因此 Omnet ++ 可以采用一个线性缓冲进行仿真^[7]，约束公式定义如下：

$$S_{\text{delay}} = S + \beta \times l_p \tag{3}$$

其中， S_{delay} 是交换机延迟时间， S 是交换机背板的固定延迟， l_p 是数据包的长度， β 是交换机队列延迟系数，一般采用 0.5 ~ 0.8 的随机变量。

2.3 IEEE 1588 模型

IEEE 1588 的实现主要有两个部分：最佳主时钟算法（BMC）和主从时钟偏移测量算法。最佳主时钟算法是从网络中动态选取一个最稳定的时钟作为主时钟提供基准时钟源，这种算法可以实现 IEEE 1588 的动态适应和自动配置，相对 NTP 协议的手工配置方法是一个较大的改进，但是一般网络中的主时钟都是相对固定的，BMC 算法只有在收敛阶段会对同步性能产生明显影响，因此模型中暂时没有考虑 BMC 算法；主从时钟偏移测量算法主要是计算主从时钟之间的时钟偏移和传播延迟，实现主从时钟之间的同步，是决定同步性能的关键部分。在主从时钟偏移测量算法的模型中，建立了四种类型的消息包模型：同步报文模型、跟随报文模型、延时请求报文模型和延时响应报文模型（见图 3）。

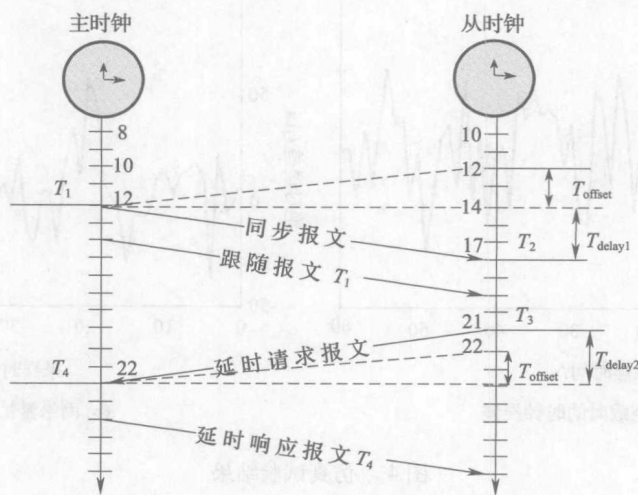


图3 主从时钟偏移测量算法

$T_1 - T_4$ 是消息包交换的收发时间, 并未考虑软件实施 IEEE 1588 的方案, 因此没有仿真操作系统、协议栈、网卡驱动和系统总线的延迟, 该模型仅适用于硬件辅助 (FPGA) 的 IEEE1588 实现方案。关于主从时钟的偏移计算方法, 从图 3 模型中分析可知:

$$T_2 - T_1 = T_{\text{delay1}} + T_{\text{offset}} \quad (4)$$

$$T_4 - T_3 = T_{\text{delay2}} - T_{\text{offset}} \quad (5)$$

假定:

$$T_{\text{delay1}} = T_{\text{delay2}}$$

由式 (4) 和式 (5) 则得到:

$$T_{\text{offset}} = ((T_2 - T_1) - (T_4 - T_3))/2 \quad (6)$$

T_{offset} 即主从时钟之间的偏移量, 用于从时钟的调整, 决定了全系统的同步性能, 而 T_{offset} 却决定于 $T_1 - T_4$ 的精度和 $T_{\text{delay1}} = T_{\text{delay2}}$ 的假设。

C/S 结构中由于流量的不平衡, 根据式 (3) 和式 (6), 交换机的存储-转发策略对于传播延迟时间的影响将会更加明显, 这在后面的试验中得到了验证。

3 结果与评估

仿真过程中默认所有时钟初始是同步的, 主时钟频率为 100MHz, 频率偏移为 10P/MHz, 同步间隔为 1 s, 交换机处理速度为 100Mb/s, 采样长度为 60 s, 输出方式按照秒脉冲 (p/s) 的方法, 通过输出主从时钟变量的值来比较主从时钟的偏移误差。仿真试验结果见图 4, 从中分析可以得出:

在 C/S 的网络结构中, 如果没有网络流量, 可以采用普通交换机得到较好的同步性能。图 4 (a) 所示用普通交换机实现的 IEEE 1588 方案可以达到 300ns 的精度。

但是如果在网络中加入流量, C/S 结构中的不对称性就严重影响了时钟偏移的计算, 造成同步性能的大幅下降。图 4 (b) 所示的同步精度已经下降到了 60μs。

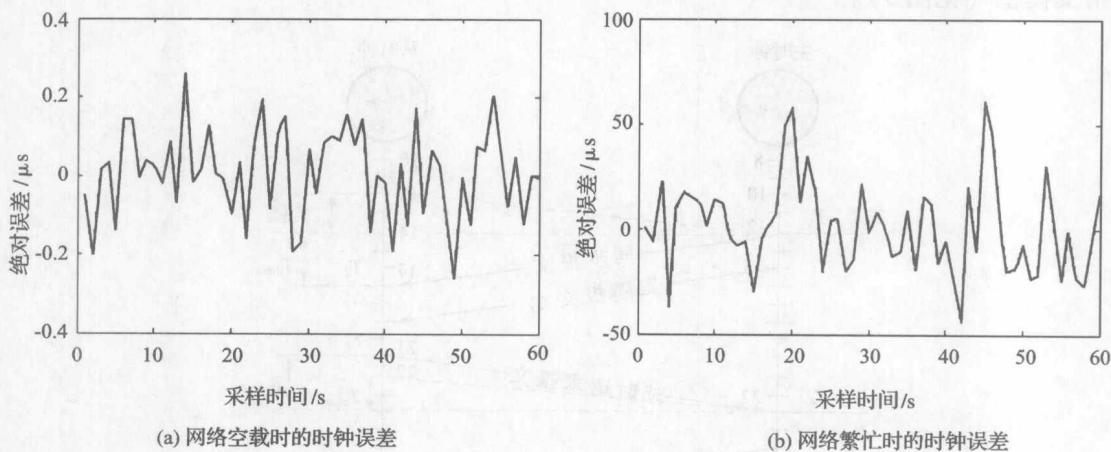


图 4 仿真试验结果

4 结论

IEEE 1588 即便采用精度最高的硬件时钟标记时间戳的实现方式,只要在 C/S 网络结构中存在普通交换机,那么时钟同步的性能就是不稳定的,并且随着网络流量的增大而迅速下降,而且这种下降幅度是数量级的。尽管减小网络流量可以提升时钟同步的平均精度,但是无法保证同步的稳定性,时钟误差仍然会突然出现变大的现象。但是,如果使用普通交换机仅仅完成 IEEE 1588 的包交换,不再发送其他数据或者很少发送其他数据,那么 IEEE 1588 的时钟同步性能是可以保证的,并且能够达到 $0.3\mu\text{s}$ 的精度。

参考文献

- [1] John C Eidson. Measurement, control and communication using IEEE 1588 [M]. [S. I.]: Springer, 2006: 133-177.
- [2] Giorgi G, Narduzzi C. Modeling and simulation analysis of PTP clock servo: proceedings of the 2007 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization (ISPCS) for Measurement [C]. Austria, 2007.
- [3] Benetazzo L, Narduzzi C, Stellini M. Analysis of clock tracking performances for a software-only IEEE 1588 implementation: proceedings of the 2007 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization (ISPCS) for Measurement [C]. Austria, 2007.
- [4] Luca De Vito, Sergio Rapuano, Laura Tomaciello. One-way delay measurement: state of the art [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57 (12).
- [5] Ruxandra Lupas Scheiterer, Chongning Na, Dragan Obradovic, et al. Synchronization performance of the precision time protocol in industrial automation networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58 (6).
- [6] IEEE 1588. IEEE 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems [S]. IEEE, 2008.
- [7] Omnet ++ Community: <http://www.omnetpp.org/>.

LDPC 码在卫星通信中的应用研究

宫晓妍 刘建伟 杨友福

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

Application of LDPC in Satellite Communication

Gong Xiaoyan Liu Jianwei Yang Youfu

(School of Electronics and Information Engineering,

Beihang University, Beijing 100191, China)

摘要: 随着卫星通信的发展, 纠错编码在卫星通信中起着重要的作用。本文介绍了 LDPC 码的编码方案和译码方案, 并对 LDPC 码在高斯信道和卫星信道中的纠错性能进行了仿真。结果表明, LDPC 码在卫星信道中表现出了较好的纠错性能。

关键词: 无线通信技术; LDPC 码; BP 译码; 莱斯信道; 卫星通信

1 引言

卫星通信系统以很大的传输距离传送数据, 但是由于衰落、噪声和干扰等影响, 信号在传输过程中会产生很严重的畸变, 因此要求信号有更大的传输能量。在卫星通信中采用差错控制编码, 可以给系统提供高可靠性和传输的稳定性, 同时, 随着编码增益的提高, 系统传输信息所需要的能量可大大降低, 这对于功率受限的卫星通信来说具有重要意义。

低密度奇偶校验码 (Low Density Parity Check, LDPC) 是近年来兴起的并且以其优异性能得到了广泛关注的纠错编码方法。本文对 LDPC 码的编译码方案进行了介绍, 然后对其在高斯和莱斯信道下分别进行了性能仿真。

2 LDPC 码介绍

LDPC 码是一种特殊的线性分组码, 它可以实现对长码的编译码。一般来说, H 矩阵相对较大, 并且是一个稀疏矩阵, 即 H 矩阵的行和列中只有很少部分为 1, 大部分为 0。通常情况下用 (n, c, r) 来表示。其中, n 为输入码元的长度, c 为校验矩阵中每一列中所包含 1 的个数, r 为每一行中包含 1 的个数。基于校验矩阵的低密度稀疏特性, r 和 c 都要远小于 n 。当 c, r 为固定值时, 称其为规则的 LDPC 码; 而 c, r 不固定时, 称其为非规则的 LDPC。

2.1 LDPC 码的编码实现

LDPC 码编码的关键是构造满足性质的稀疏矩阵 H 。由线性分组码可知^[1], H 是一

个 $n \times (n - k)$ 矩阵, 只有 n 足够大时, LDPC 码的性能才能接近香农极限。反之, n 越大, 编码的复杂度就越高。因此, 在编码的过程中, 不但要考虑编码和译码的性能, 还要考虑计算的复杂度。

通常的 LDPC 码的构造思路如下。

随机产生重量为 c 的列和行为 r 的 H 矩阵, 并且任意两列重叠为 1 的数目尽量小。

H 矩阵要求为满秩。通过高斯消去法, 将矩阵 H 变换为 $H = [P^T | I]$, 由校验矩阵与生成矩阵的关系可以得到生成矩阵 $G = [I | P]$ 。

$v^T = Gx^T$ 可以得到编码后的码字。

上述的编码方法由于用到高斯消去法, 破坏了校验矩阵的稀疏特性。Richardson 等人通过研究提出了一个有效的编码方案, 其思路是: 将矩阵 H 的列重排, 得到一个近似下的三角矩阵, 将其分成六个分块的稀疏矩阵^[2], 如图 1 所示。

设输出码元 $v^T = (x^T, p_1^T, p_2^T)$, 其中, x 为输入码元序列, 由分块矩阵的计算方法, 并且 $Hv^T = 0$ 可以得到:

$$Ax^T + Bp_1^T + Cp_2^T = 0 \quad (1)$$

$$Dx^T + Ep_1^T + Fp_2^T = 0 \quad (2)$$

因为 x 已知, 通过解二元二次方程, 可以得到:

$$p_1^T = FC^{-1}(Ax^T) + Dx^T \quad (3)$$

$$p_2^T = C^{-1}(Ax^T + Bp_1^T) \quad (4)$$

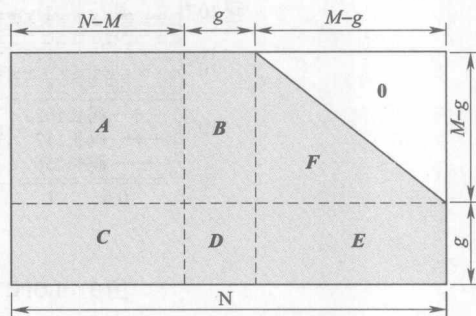


图 1 分块的稀疏矩阵

根据方程, 得到 Richardson 的编码方案的电路实现, 如图 2 所示。

与传统的编码思路相比, Richardson 的编码方案中对矩阵的重排并不改变矩阵的稀疏性, p_1 和 p_2 的计算复杂度分别为 $o(N + g^2)$ 和 $o(N)$, 因此只要 g 足够小, 计算复杂度都可以达到线性。上述的编码方案可以具有一般性, 即首先对于 H 矩阵进行变换, 然后编码。而对于一些有特殊性质的矩阵, 可以利用矩阵自身的特性进行编码。

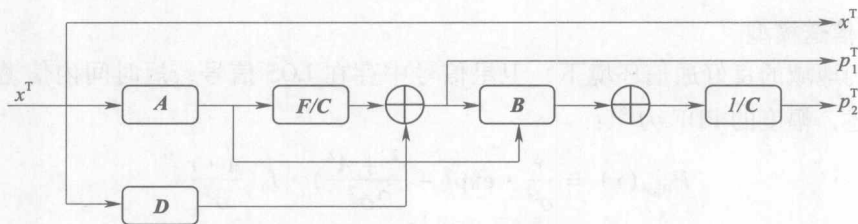


图 2 Richardson 的编码方案电路

2.2 LDPC 译码概述

LDPC 的译码算法属于并行算法, 硬件实现简单, 有较小的译码延迟。同时, 译码算法的复杂度很低, 运算量不会因码长的增加而急速增加, 这相对于其他的分组码有明显的优势。目前的译码方法一般采用软判决译码中的信度传播 (Belief-propagation, BP) 译码^[3,4]。所谓软判决译码, 其译码过程中传送的消息与后验概率相关。在 BP 译码算法中, 消息的传递形式是对数似然比 (Log-likelihood Rate, LLR), 经过数次迭代, 变量节点和

校验节点以 $\tanh$ 规则更新节点，直至满足校验方程。

LDPC 码在高斯信道中的仿真如图 3 所示。其中，码率为 $1/2$ ，对应的校验矩阵为 128×256 、 256×512 、 512×1024 ，构造矩阵时消除了周长为 4 的圈，调制方式采用 BPSK 调制。其中码的校验矩阵构造方法采用 Mackay 随机法，译码采用了 LLR-BP 译码算法进行译码，迭代次数为 30 次。

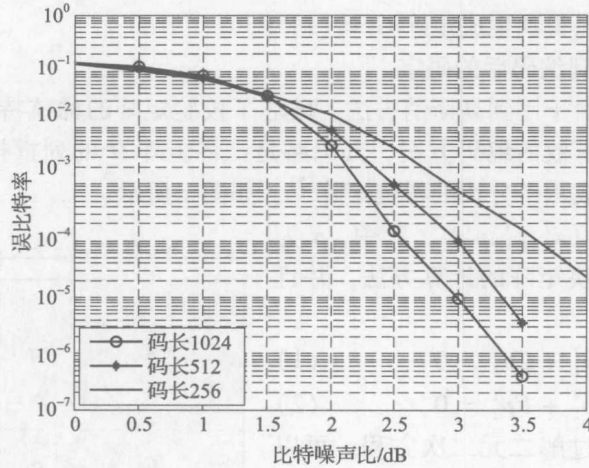


图3 LDPC 码在高斯信道的仿真

从图 3 可以看出：(1) 在 AWGN 信道中，码长为 1024 的 LDPC 码，在比特噪声比为 3dB 的时候，误比特率就可以达到 10^{-5} 以下，显示了 LDPC 码优秀的纠错性能；(2) 采用相同校验矩阵方法构造的 LDPC 码，相同码率、不同码长的码 BER 性能各不相同，码长越长，BER 性能越好。

3 LDPC 码在卫星通信中的应用

3.1 卫星信道模型

在宽阔地域的良好通信环境下，卫星信号中存在 LOS 信号，短时间内信道特性用莱斯过程描述，幅度的 PDF 为^[5]：

$$P_{\text{Rice}}(r) = \frac{r}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{A \cdot r}{\sigma^2}\right) \quad r \geq 0 \quad (5)$$

其中， I_0 为第一类修正的零阶贝塞尔函数， $2\sigma^2$ 为散射成分的功率， A 是直射信号的强度。莱斯过程相位的概率密度函数为：

$$P_{\text{Rice}}(\theta) = \frac{1}{2\pi} \cdot \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) \cdot [1 + G \cdot \sqrt{\pi} \cdot \exp(G^2) \cdot (1 + \text{erf}(G))] \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (6)$$

其中， $G = A \frac{\cos \theta}{\sqrt{2\sigma^2}}$ ， $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数。

3.2 性能仿真

LDPC 码用于卫星通信的系统框图如图 4 所示。

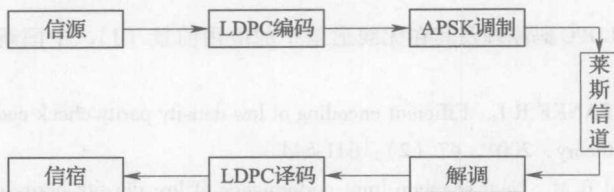


图 4 LDPC 应用于卫星通信整体系统框图

其中, 编码采用 LDPC 编码, 调制为基于幅度和相位的 APSK 调制, 既提高了频谱利用率, 又可以有效降低非线性的影响。仿真参数设置: LDPC 选择 Gallager 提出的规则 LDPC 码构造方法实现的码长为 504 的 (6, 12) 规则 LDPC 码, 码率为 1/2, 译码算法采用 BP 算法。APSK 选用 DVB-S. 2 标准中提供的 (4 + 12) 的 16APSK 方案。仿真结果如图 5 所示, 其中 LDPC 译码迭代 20 次。

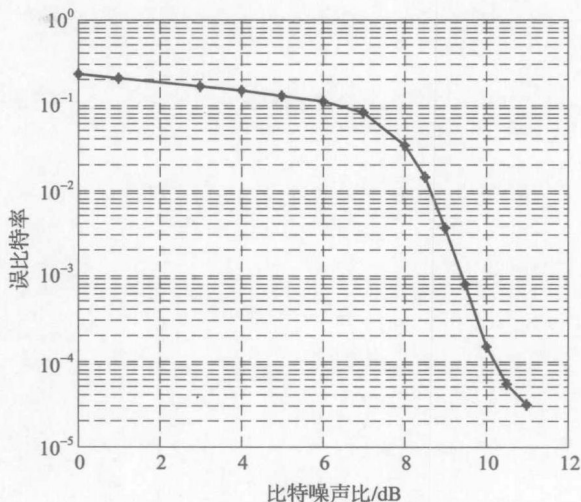


图 5 LDPC 在莱斯信道的 BER 性能曲线

4 结论

本文总结了 LDPC 码的编译码方案, 仿真结果也表明, 无论在高斯信道还是莱斯信道中, LDPC 码都表现出了良好的纠错性能。此外, LDPC 码还具有描述简单、有较大的灵活性、译码复杂度低等优点。这是因为:

LDPC 校验矩阵的稀疏性使得在线性时间内实现译码成为可能。

LDPC 的编码中, 没有使用交织器, 因而时延较小。

LDPC 码的译码算法本质上是一种并行算法, 硬件实现后将有很短的译码时延, 有利于短时延条件的应用。

LDPC 码已经得到国际上的普遍重视, 其编码方案已经被下一代卫星数字视频广播标准 DVB-S2 采纳。相信随着编译码方案的不断优化以及与不同调制的进一步匹配, LDPC