



基于 10 Gbit/s-PON 接收机 25 Gbit/s 双二进制检测传输性能

印永嘉, 郭勇, 马壮

(中兴通讯股份有限公司, 上海 201203)

摘要: IEEE 已经成立了 100 Gbit/s 以太无源光网络 (100 Gbit/s-EPON) 任务组研究下一代 100 Gbit/s PON 标准, 双二进制检测技术是基带技术选择之一。对基于 10 Gbit/s-PON 接收机的 25 Gbit/s 双二进制 (DB) 检测传输性能进行了实验验证。由于 10 Gbit/s-PON 接收机带宽受限明显, 10 Gbit/s-PON 接收机输出的 25 Gbit/s 双二进制信号会受到码间干扰 (ISI) 影响。实验结果表明, 基于直接判决法的系统接收灵敏度只有 -22 dBm, 采用最简最大似然序列估计 (MLSE) 软判决法的系统接收灵敏度能提升到 -24.5 dBm。

关键词: 100 Gbit/s 以太无源光网络; 双二进制检测; 接收灵敏度; 最大似然序列估计

中图分类号: TN929.18

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018048

25 Gbit/s transmission performance using duo-binary detection with 10 Gbit/s-PON receiver

YIN Yongjia, GUO Yong, MA Zhuang

ZTE Corporation, Shanghai 201203, China

Abstract: IEEE has formed the 100 Gbit/s-EPON Task Force to develop next 100 Gbit/s-PON standards, and the duo-binary(DB) detection is one of the baseband technology options. 25 Gbit/s DB detection transmission performance with 10 Gbit/s-PON receiver was been experimentally demonstrated. Because the bandwidth of 10 Gbit/s-PON receiver is obviously limited, the 25 Gbit/s DB output signal from 10 Gbit/s-PON receiver will be affected by the inter-symbol interference(ISI). The experiment results show that the system receiving sensitivity based on direct decision method is only -22 dBm. However, the system receiving sensitivity can be up to -24.5 dBm by using the most simplified maximum likelihood sequence estimation(MLSE) soft decision method.

Key words: 100 Gbit/s-EPON, duo-binary detection, receiving sensitivity, MLSE

1 引言

随着大数据、大视频业务的快速增长, 下一

代无源光接入网络 (passive optical network, PON) 至少要达到 25 Gbit/s 线路速率。2016 年标准组织 IEEE 启动了 100 Gbit/s-EPON 任务组 IEEE 802.3ca,

收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2018-01-15

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划基金资助项目 (No.16511104100)

Foundation Item: Transformation and Industrialization of Scientific and Technological Achievements in Shanghai (No.16511104100)



目标是到 2018 年完成 25 Gbit/s、50 Gbit/s 以及 100 Gbit/s 的 PON 接入速率标准,基本要求是每个波长的线路速率达到 25 Gbit/s 以及 PON 光功率预算达到 29 dB^[1]。与此同时, ITU-T SG15 Q2 工作组开始了对 PON 领域单波 25 Gbit/s 速率的应用范围、需求定义等的研究工作。

基带技术选项是 25 Gbit/s PON 传输的研究热点。传统 PON 系统采用非归零 (NRZ) 码作为基带码型。由于线路速率为 25 Gbit/s 的物理层器件价格高昂,标准组织考虑 25 Gbit/s 传输采用新型基带技术,重用 10 Gbit/s-PON 物理层器件。当前新型基带技术研究热点包括双二进制检测、四电平脉冲调制 (PAM4) 技术以及基于 MLSE 的均衡技术等^[2]。

本文首先介绍了 PON 领域 25 Gbit/s 传输的基带技术研究进展。接下来本文研究了双二进制检测技术的性能,提出了一种基于最简 MLSE 软判决法的 25 Gbit/s 双二进制检测技术,并与双二进制检测直接判决法进行了实验比对。实验结果表明:直接判决法的 25 Gbit/s 传输系统接收灵敏度只有 -22 dBm,要实现 PON 系统 29 dB 光功率预算挑战很大;而采用最简 MLSE 软判决法的系统接收灵敏度能达到 -24.5 dBm。

2 25 Gbit/s 传输的基带技术研究进展

PON 技术发展到 25 Gbit/s 阶段,系统成本和光功率预算需要同时兼顾。新型基带技术可以降低物理层器件成本,但是也会造成信噪比损伤,影响 PON 系统光功率预算。现阶段基带技术研究主要聚焦在 NRZ、双二进制检测、PAM4 以及基

于 MLSE 的均衡技术。

2.1 新型基带技术的信噪比代价

根据参考文献[3],多电平脉冲幅度调制信号存在信噪比调制代价。调制代价等于 $10 \times \log_{10}(M-1)$,其中 M 为调制电平数。NRZ 信号的电平数为 2,调制代价为 0。双二进制信号的电平数为 3,调制代价约为 3 dB。同理,PAM4 的调制代价约为 4.8 dB。考虑到带宽影响因素,理想情况下 25 Gbit/s 传输的基带技术信噪比代价见表 1。由于 PAM4 的调制电平数量最多,信噪比代价也最大。

表 1 新型基带技术的光信噪比损伤

调制技术	调制代价/ dB	带宽/ GHz	带宽影响/ dB	信噪比 代价/dB
25 Gbit/s NRZ	0	12.5	0	0
25 Gbit/s 双二进制	3	6.25	-1.5	1.5
25 Gbit/s PAM4	4.8	6.25	-1.5	3.3

2.2 NRZ 技术研究进展

NRZ 技术是 PON 主流基带技术选项,系统架构如图 1 所示。其中,发送侧二进制数据经过 NRZ 编码后,经过 25 Gbit/s 光源强度调制后输入光纤。光信号经过光纤和分光器,输入 25 Gbit/s APD (avalanche photo diode, 雪崩二极管)/TIA (trans-impedance amplifier, 跨阻抗放大器) 进行直接检测,输出电信号经过时钟数据恢复,输出二进制数据。根据参考文献[4],在 10^{-3} 的误码率门限下,基于 NRZ 技术的 25 Gbit/s-PON 接收灵敏度能够达到 -28.5 dBm。

2.3 PAM4 技术研究进展

PAM4 系统架构如图 2 所示。其中,发送侧

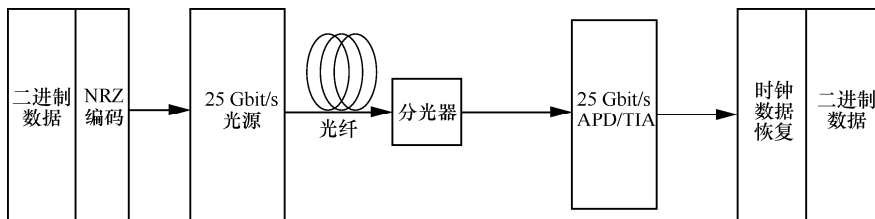


图 1 基于 NRZ 技术的 25 Gbit/s 传输系统架构

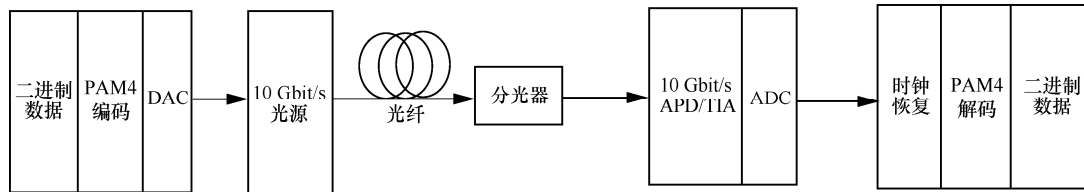


图2 基于PAM4技术的25 Gbit/s传输系统架构

二进制数据流经过PAM4编码后进入数字模拟转换器(DAC)进行数模转换,输出PAM4信号,信号经过10 Gbit/s光源强度调制后输入光纤。光信号经过光纤和分光器后输入10 Gbit/s APD/TIA进行直接检测,输出电信号进入模数转换器(ADC)转换为数字信号,然后经过时钟恢复后进行PAM4解码并恢复为二进制数据。根据参考文献[5],在 10^{-3} 的误码率门限下,基于PAM4技术的25 Gbit/s-PON接收灵敏度为 -20.8 dBm。PAM4方案的系统接收性能比NRZ方案劣化严重,要想增加光功率预算必须通过增加光放大器的方法来实现,这对成本、功耗是巨大考验。

2.4 双二进制技术研究进展

双二进制编码属于第1类部分响应编码,实现方法之一是将二进制数据流经过抽头系数相等的2抽头FIR滤波器。基于双二进制技术的25 Gbit/s系统如图3所示。其中,发送侧二进制数据流首先进行双二进制预编码,预编码信号经过25 Gbit/s光

源强度调制后输入光纤。光信号经过光纤和分光器后输入10 Gbit/s APD/TIA进行直接检测,由于10 Gbit/s APD/TIA的带宽特性接近25 Gbit/s双二进制成形FIR滤波器,所以输出的信号接近双二进制调制信号。输出的信号经过时钟恢复后再进行双二进制判决就可以恢复出二进制数据。参考文献[6]采用了双二进制直接判决方法,在 10^{-3} 的误码率门限下,系统背靠背接收灵敏度约为 -23 dBm。

2.5 FTN技术研究进展

FTN(faster-than-Nyquist)是基于MLSE均衡技术的一种,系统架构如图4所示。其中,发送侧二进制数据流经过NRZ编码后,经过10 Gbit/s光源强度调制后输入光纤。光信号经过光纤和分光器,输入10 Gbit/s APD/TIA进行直接检测,输出电信号被ADC转换为数字信号,时钟恢复后的数字信号依次进行基于最小均方误差的FFE、后置滤波器(post filter)、MLSE后,恢复

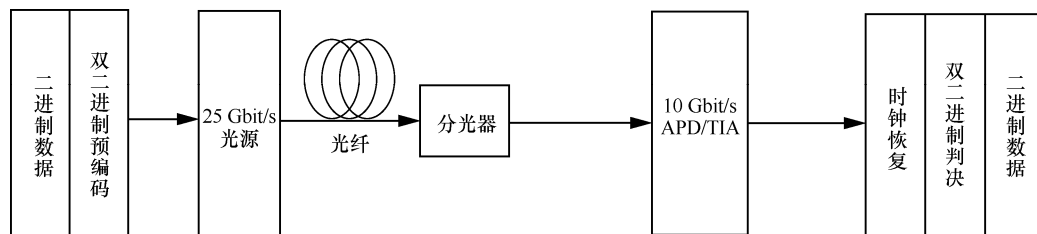


图3 基于双二进制技术的25 Gbit/s传输系统架构

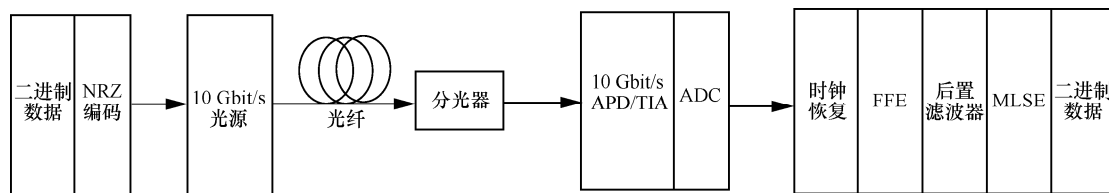


图4 基于FTN技术的25 Gbit/s传输系统架构



出二进制数据。根据参考文献[7], 在 10^{-3} 的误码率门限下, 系统接收灵敏度能达到 -26 dBm。FTN 方案的性能优良, 而且物理层器件的带宽要求不高。但是 FTN 技术在接收侧需要复杂数字信号处理, 这增加了系统成本和功耗。

3 25 Gbit/s 双二进制检测传输性能的实验

与 NRZ 技术相比, 理想 25 Gbit/s 双二进制检测技术的传输信噪比代价为 1.5 dB, 正常情况下基于 APD 的系统接收灵敏度应该下降 3 dB 左右。然而参考文献[4,6]的实验数据表明实际系统接收灵敏度差距达到了 5.5 dB。本文通过 25 Gbit/s 双二进制检测传输性能的实验研究, 找出了 10 Gbit/s-PON 接收机的带宽性能是恶化 25 Gbit/s 双二进制传输性能的主要因素, 并提出一种双二进制检测软判决方法可以经济地满足系统 29 dB 光功率预算。

3.1 实验系统

25 Gbit/s 双二进制传输实验系统如图 5 所示, 在发送侧, 数据源是离线产生的 15 阶伪随机二进制序列 (PRBS) 码流, 经过双二进制预编码后生成数据 Data_Tx。其中, 预编码采用的是差分编码, 用于防止接收侧进行双二进制检测时出现误码传递情况。接下来 Data_Tx 输入任意波形发生器 (AWG), AWG 将 Data_Tx 转换为 25 Gbit/s NRZ

信号并循环输出, 输出信号被外调制激光器 (EML) 调制为光强信号后进入 G.652 光纤传输, 其中, 激光器工作波长为 1 310 nm, 输出光功率为 +5 dBm, 消光比为 8 dB。

在接收侧, 接收光功率通过可调光衰减器 (OATT) 调整, 接收光信号如图 5 中 a 处所示。商用 10 Gbit/s-PON 接收机的 APD/TIA 组件直接检测光信号, 输出的 DB 电信号如图 5 中 b 处所示。实时数字示波器 (TDS) 对 DB 信号进行采样, 生成采样数据 Data_Rx。在离线信号处理部分, Data_Rx 会依次进行下采样、时钟恢复、双二进制判决以及误码统计。其中, 下采样的作用是将 Data_Rx 插值为 50 Gbit/s 采样率的数据。时钟恢复的作用是从接收数据中提取同步时钟, 获取数据的最佳判决点。双二进制判决是将 DB 信号恢复为二进制序列, 本实验分别采用了两种方法进行判决, 一种是直接判决法, 另一种是基于最简 MLSE 的软判决法。

3.2 10 Gbit/s-PON 接收机的带宽性能

双二进制信号是 NRZ 信号通过 10 Gbit/s-PON 接收机生成的, 10 Gbit/s-PON 接收机带宽性能对系统性能影响很大。理想双二进制成形滤波器应该是抽头系数相等的 2 抽头 FIR 滤波器 [...0,1,1,0,...], 10 Gbit/s-PON 接收机的幅频响应曲线如图 6 所示, 3 dB 带宽小于 6 GHz, 近似为 4 抽头 FIR 滤波器 [...0.21,0.96,1,0.23,...]。生成的双二

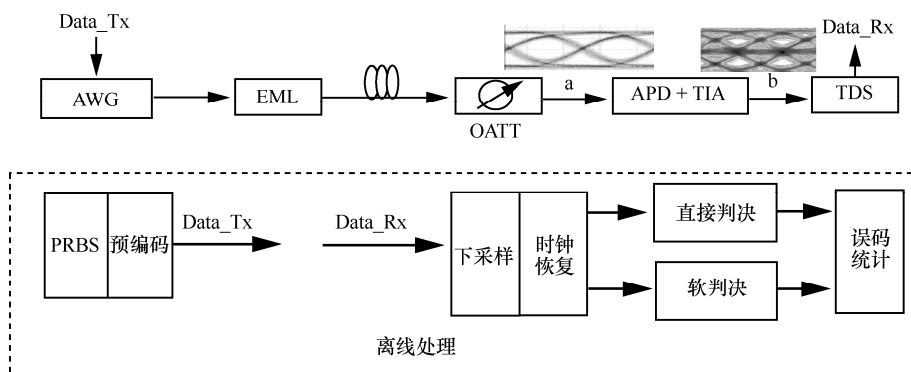


图 5 25 Gbit/s 双二进制检测技术的实验系统

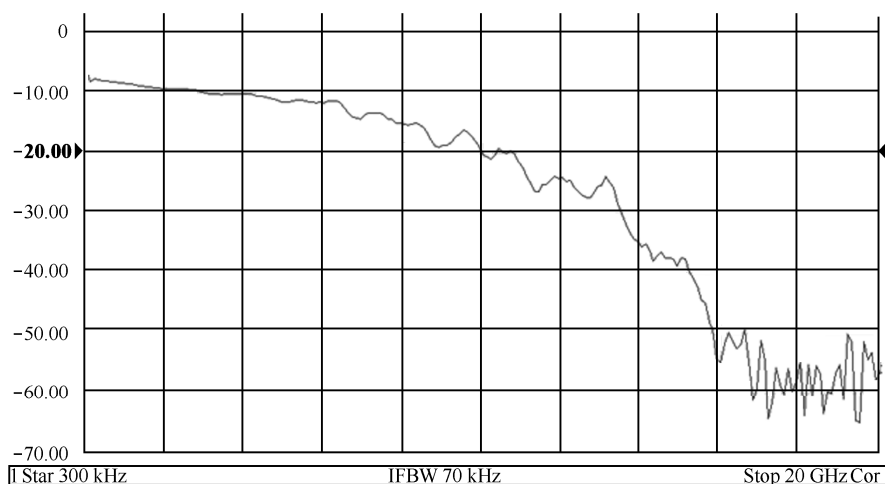


图6 10 Gbit/s-PON接收机的幅频响应

进制信号存在明显码间干扰,采用直接判决法,系统接收性能会显著下降。

3.3 双二进制检测判决方法

3.3.1 双二进制检测直接判决法

双二进制检测直接判决法可以采用两门限硬判决实现,实现原理如图7所示,包括两个高、低门限比较器以及一个异或器。本实验接收的双二进制信号来自示波器采样离线数据,对接收的离线双二进制数据分别采用高、低固定门限值进行判决比较,并对比较结果进行异或运算,就可以恢复出二进制数据。

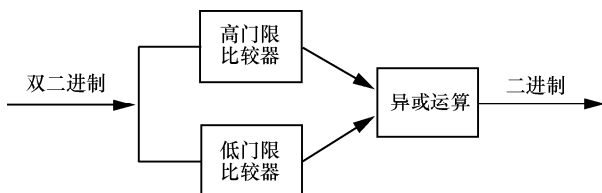


图7 双二进制检测直接判决法实现原理

3.3.2 双二进制检测软判决法

双二进制检测软判决法基于均衡技术实现,常用均衡技术包括前向均衡技术(FFE)、基于MLSE的FTN技术等。根据参考文献[8],采用FFE技术进行软判决恢复,只有当抽头数量超过7个,系统接收灵敏度才能达到-23 dBm。采用FTN技术,系统接收灵敏度能提升到-26 dBm,

然而算法实现更复杂。

本实验采用的判决方法仍然基于MLSE,包括信道脉冲响应估计模块以及最简MLSE模块,实现原理如图8所示。其中,信道脉冲响应估计模块用于获取MLSE估计需要的信道参数,最简MLSE模块用于将接收的双二进制离线数据估计为二进制数据。由于实测信道脉冲响应影响主要分布在4个抽头,所以相应设置MLSE的信道参数为4抽头。同时为了进一步降低算法复杂度,MLSE的状态判决深度设为1。

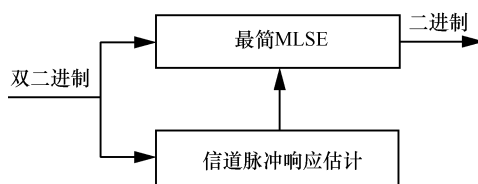


图8 采用最简MLSE的双二进制检测软判决法实现原理

4 实验结果

100 Gbit/s-EPON的工作波段标准定在O波段,光纤传输色散代价可以忽略,本实验测试了光背靠背情况下25 Gbit/s双二进制检测技术的误码统计特性。在发射侧采用EML、出光功率为+5 dBm、消光比为8 dB的情况下,系统接收性能如图9所示。

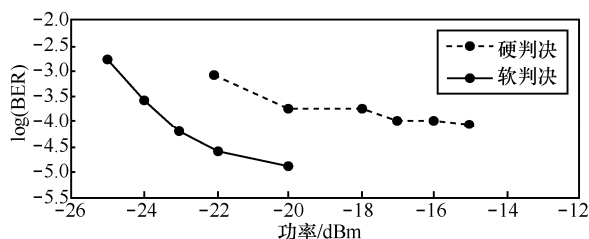


图9 光背靠背 25 Gbit/s 双二进制检测接收灵敏度的实验结果

采用两门限直接判决法, 1×10^{-3} 比特误码率 (BER) 门限对应的系统接收灵敏度约为 -22 dBm, 光功率预算只有 27 dB。而且由于码间干扰存在, 系统始终存在背景噪声, 即使提升接收光功率, BER 性能也很难优于 1×10^{-4} 水平。采用最简 MLSE 软判决, 1×10^{-3} BER 门限对应的系统接收灵敏度约为 -24.5 dBm, 光功率预算达到 29 dB。实验中, 由于实验仪表内存有限, BER 性能只能测试到 1×10^{-5} 水平, 更好的误码性能无法直接测量。

5 结束语

本文实验验证了基于 10 Gbit/s-PON 接收机的 25 Gbit/s 双二进制检测传输性能。采用直接判决法系统实现简单, 但是由于 10 Gbit/s-PON 器件带宽受限导致的码间干扰, 系统接收灵敏度只有 -22 dBm, 不采用光放大器很难达到 29 dB 光功率预算。采用最简 MLSE 软判决技术解决了码间干扰问题, 接收灵敏度提升至 -24.5 dBm, +5 dBm 的发光功率可以实现 29 dB 光功率预算。而且标准组织近期在讨论纠错能力更强的 LDPC 技术^[9], 如果该技术得以应用, 不采用光放大器, 系统光功率预算可以提升至 31 dB。

参考文献:

- [1] 张成良, 王庆, 余景文, 等. 10/40/100 Gbit/s PON 技术的发展和展望[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 1-8.
ZHANG C L, WANG Q, YU J W, et al. Development and forecast of 10/40/100 Gbit/s PON technology[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 1-8.
- [2] 耿丹, 郭勇, 印永嘉, 等. 25 Gbit/s 无源光网络技术进展和

实验研究[J]. 电信科学, 2017, 33(2): 128-132.

GENG D, GUO Y, YIN Y J, et al. Development and experiment research of 25 Gbit/s passive optical network[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(2): 128-132.

- [3] Ideal SNR penalties[EB/OL]. (2014-09-14)[2017-10-10]. http://www.ieee802.org/3/bs/public/14_09/cole_3bs_01_0914.pdf.
- [4] GUO Y, YIN Y J, SONG Y X, et al. Demonstration of 25 Gbit/s per channel NRZ transmission with 35 dB power budget using 25 Gbit/s Ge/Si APD for next generation 100 Gbit/s-PON[C]//2017 Optical Fiber Communication Conf. and the Nat. Fiber Optic Engineers Conf., Mar 19-23, 2017, Los Angeles, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-3.
- [5] DOUTJE V V, V HOUTSMA, CHOW H, et al. Demonstration of symmetrical 25 Gbit/s quaternary PAM/duobinary TDM-PON with multilevel interleaving of users[C]//2015 ECOC, Sept 27-Oct 1, 2015, Valencia, Spain. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-3.
- [6] DOUTJE V V, HOUTSMA V, WINZER P, et al. 26-Gbits/s-PON transmission over 40-km using duobinary detection with a low cost 7-GHz APD-based receiver[C]//2012 ECOC, Sept 16-20, 2012, Amsterdam, Netherlands. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-3.
- [7] MAN J W, FU S M, ZHANG H G, et al. Downstream transmission of pre-distorted 25-Gb/s faster-than-Nyquist PON with 10 Gbit/s-class optics achieving over 31 dB link budget without optical amplification[C]//2016 OFC, Mar 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [8] XIA J, XU T, LI Z, et al. Investigation on adaptive equalization techniques for 10 Gbit/s-class optics based 100 Gbit/s-PON system[C]//2017 Proceedings of OptoElectronics and Communications Conference (OECC), Jun 31-Aug 4, 2017, Singapore. [S. l.: s.n.], 2017.
- [9] FEC Proposal for NGE-PON-update(rev1a) [EB/OL]. (2017-10-01)[2017-10-10]. http://www.ieee802.org/3/ca/public/meeting_archive/2017/11/laubach_3ca_1a_1117.pdf.

[作者简介]



印永嘉 (1978-), 男, 中兴通讯股份有限公司高级工程师、预研系统工程师, 主要从事光通信技术的研究工作。

郭勇 (1976-), 男, 博士, 中兴通讯股份有限公司高级工程师、预研系统工程师, 主要从事通信技术的研究工作。

马壮 (1970-), 男, 博士, 中兴通讯股份有限公司高级工程师、预研总工程师, 主要从事通信技术的研究工作。