

LVDS 长距离传输电缆模型参数计算

韩冰 文丰 袁小康

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室 太原 030051)

摘要: 针对双绞线在信号高速长距离传输过程中,百米以上信号衰减损耗就会加剧的情况,设计了百米电缆参数模型,以RLCG参数模型为研究对象,并且在其基础上估计电缆的衰减特性,结果通过对两种常用型号电缆在相同的实验条件下测试的数据,与模型仿真结果进行对比,发现在10~200 MHz的频率范围内,两者的误差不超过0.5 dB,这表明在一定的频率范围内,参数模型上估计的电缆损耗特性与实际测试结果基本一致。该模型为研究双绞线快速、远距离可靠地传输低电压差分信号(LVDS)提供理论依据。

关键词: LVDS;电缆模型;RLCG;数据传输

中图分类号: TN919.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

LVDS long-distance transmission cable model parameter calculation

Han Bing Wen Feng Yuan Xiaokang

(State Key Laboratory of Electronic Testing Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For twisted pair in the process of signal transmission with high speed over long distances, hundred meters above the signal attenuation loss will aggravate the situation, designed the hundred meters cable parameter model, RLCG parameter model as the research object, and on the basis of its estimated attenuation characteristic of cable, the results of two common types cable test data under the same experimental conditions, compared with the simulation results of the model, it is found that the error between the two is less than 0.5 dB in the frequency range of 10~200 MHz, which indicates that the cable loss characteristics estimated by the parameter model are basically consistent with the actual test results within a certain frequency range. This model provides a theoretical basis for the study of twisted-pair fast and long distance reliable transmission of low voltage differential signaling(LVDS).

Keywords: LVDS; cable model; RLCG; data transmission

0 引言

在信息化这个时代发展大环境中,数据传输的研究是现今科研的重要部分。高性能数据传输方式的快速发展,促使对数据传输的质量,尤其在传输的速度和距离等方面,进一步提出了更高的要求。在数据传输问距相差较大的情况下,多数选择串行传输的通信方式,其中比较有代表性的就是RS-232和RS-485。与并行传输相比,串行传输最大的优势就是布线方便快捷,花费成本小,可靠性能高。但是其也存在很大的不足,比如信号摆动幅度较大,导致信号传输速度会比较慢,速率最快也只有10 Mbit/s,远达不到现代数据传输对速率日益增加的需求^[1]。而低电压差分信号(low voltage differential signaling, LVDS)信号正好克服这一不足。LVDS信号属于差分信号,设备之间使用LVDS通信,能有效降低功耗、误码率、串扰和辐射等。其传输材

料或者是印制电路板上布置的铜线,或者是平衡电缆,信号在传输时速率能达到数千兆比特每秒。同时LVDS信号也有自己的局限性,它不适用于数据远距离传输^[2]。

光纤、同轴电缆以及双绞线缆在有线传输体系中是常用的传输材料,与同轴电缆和光纤相比,铜质双绞线质地轻,抗干扰性能好,价格低廉,是一种良好的平衡线缆。但双绞线缆属于有损耗介质,传输距离超过一百米,就会使信号的衰减情况变得严重^[3]。

为此,世界各国的学者在研究线缆建模方面投入大量的精力。文献[4]中Acatauassu和他的团队通过泰勒级数展开和希尔伯特变换进行建模,设计只有两个参数的电缆模型,并对爱立信公司的ELQXBE进行分析研究;文献[5]中Lafata曾建议以双曲函数为基础,搭建LN模型,然后对不同的金属电缆进行比较,通过分析其传输性能,以此证明LN模型的准确度。虽然两者的研究都只需要考虑两个变

量,但是当频率超过 30 MHz 时,就会产生较大的误差。所以在测量数据高速长距离传输过程中,建立精确的电缆参数模型对传输损耗特性的研究以及传输的可靠性有着关键作用。

本文针对百米传输指标,构建双绞线缆数学参数模型,并通过对现有电缆的衰减特性进行仿真和实际测试,剖析影响双绞线缆衰减的因素,验证该模型的准确度,以此作为 LVDS 信号实现长距离高速传输的支撑依据。

1 双绞线数学模型

双绞线数学模型一般划分为两类:1)RLCG 参数模型,研究的主要内容是传递函数及其参数和信号频率之间的联系;2)两端口参数模型,也就是 ABCD 模型,主要研究内容是信号在双绞线上的输入输出关系。研究在多对双绞线间的电磁兼容性,以及外部激励作用于多对线缆时的影响也经常使用此模型。因为本文讨论的是单对双绞线,故选择 RLCG 模型。

依据传输线原理,双绞线铜电缆模型的传输特性由串联的电阻 $R(f)$ 和电感 $L(f)$,以及并联的电导 $G(f)$ 和电容 $C(f)$ 这些与频率相关的一次参数决定^[6]。所以串联阻抗可用 $Z(f) = R(f) + j2\pi fL(f)$ 表示,并联导纳可用 $Y(f) = G(f) + j2\pi fC(f)$ 表示。线缆等效 RLCG 电路模型如图 1 所示。

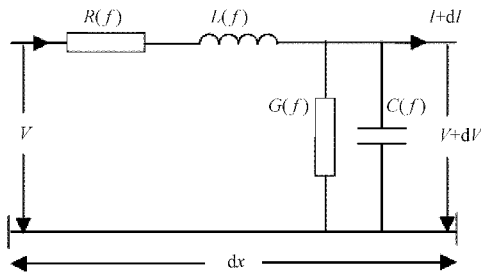


图1 RLCG 电路模型

一次参数经过传输线方程,即电报方程,就可求得二次参数:特性阻抗 $Z_0(f) = \sqrt{Z(f)/Y(f)}$ 以及传播常数 $\gamma(f) = \sqrt{Z(f)Y(f)}$ 。传播常数一般情况下是一个复数^[7],因此它可以改写为 $\gamma(f) = \alpha(f) + j\beta(f)$ 这种形式,这里 $\alpha(f)$ 表示衰减常数, $\beta(f)$ 表示相移常数。

$\gamma(f)$ 又可以表示为:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = j\omega \sqrt{LC} \sqrt{1 + \frac{R}{j\omega L}} \sqrt{1 + \frac{G}{j\omega C}} \quad (1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 。

在无损耗传输情况下, $\alpha = 0, \beta = \omega \sqrt{LC}$, 这里传播常数表示为:

$$\gamma = j\omega \sqrt{LC} \quad (2)$$

而在有损耗传输情况下,当使用损耗较低的传输介质,

如铜或铝等材料,并且加入绝缘层^[8],那么在较高频率条件下,可以达到 $R \ll \omega L, G \ll \omega C$, 这时特性阻抗就简单表示成 $Z_0 = \sqrt{L/C}$ 。利用泰勒公式将式(1)展开得:

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} + \dots \quad (3)$$

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \frac{x}{2} + \frac{3x^2}{8} - \frac{5x^3}{16} + \dots \quad (4)$$

$$\gamma^{(1st)} \approx \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} + j\omega \sqrt{LC} \quad (5)$$

由上式即可得到传播常数 γ 的实部:

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (6)$$

虚部:

$$\beta = \omega \sqrt{LC} \quad (7)$$

衰减损耗可通过传播常数 γ 的实部表示。所以,特性阻抗 Z_0 可表示为:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (8)$$

通常情况下,当 LC 工作频率不断升高,特征阻抗一般不会随着频率发生改变,相当于一个常数;然而此时,一部分高频性能就会凸显出来,趋肤深度 δ ^[9] 一方面反比于 $R(f)$,另一方面和频率的二次方根存在反比例关系,等效并联电导 G 也逐渐随着频率升高而增大,二者形成正比关系,所以有如下公式:

$$R = \rho_{cV} \frac{1}{\omega \delta} \quad (9)$$

$$G = \omega \sigma_{cV} \quad (10)$$

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{cV} \pi \mu_0 \mu_r f}} \quad (11)$$

$$\sigma_{cV} = \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \quad (12)$$

其中, ρ_{cV} 为铜介质的电阻率,20 °C 时,取值 $0.017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; ω 为传输线的直径,即线宽; σ_{cV} 表示铜的电导率,取 $\sigma_{cV} = 58.824 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2)$; μ_0 表示真空状态下磁导率,取值为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; μ_r 表示导体的相对磁导率; ϵ_0 表示真空状态下介电常数,取值 $8.89 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$; ϵ_r 表示相对介电常数; $\tan \delta$ 为介质损耗角正切。总结得到: $R \propto \sqrt{f}, G \propto f^{[10]}$ 。

由此看来,电缆的衰减损耗一部分是趋肤损耗 α_q , 通过趋肤常数表示,正比于频率的二次方根,即 f 升高, α_q 增大。另一部分是介质损耗 α_j , 通过介质损耗角表示,与频率成正比例关系,即频率 f 上升的同时 α_j 升高,这就造成衰减更为严重^[11]。由此得出,总衰减表达式为:

$$\alpha_{\text{衰减}} = \alpha_q + \alpha_j = k_1 \sqrt{f} + k_2 f \quad (13)$$

式中: $\alpha_{\text{衰减}}$ 表示衰减常数, dB; k_1 表示趋肤损耗参数, dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$; k_2 表示介质损耗参数, dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

2 线缆参数估计

在式(13)中参数 k_1 、 k_2 的值利用最小二乘法进行估算,定义 $E^{[12]}$ 为 $\alpha_{\text{衰减}}$ 的误差平方和,则 E 可表示为:

$$E = \sum_{i=1}^N [k_1 \sqrt{f_i} + k_2 f_i - \alpha_{\text{衰减}}(f_i)] \quad (14)$$

针对不同的频率点对 E 的所有参数分别求偏导数并使其为 0,便可得到:

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{f_i} \alpha(f_i) - k_2 \sum_{i=1}^N f_i^{1.5}}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (15)$$

$$k_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{f_i} \alpha(f_i) - k_1 \sum_{i=1}^N f_i^{1.5}}{\sum_{i=1}^N f_i^2} \quad (16)$$

3 实验结果与分析

搭建的测试平台如图 2 所示,其中两条被测线缆的长度为 100 m,通过长度为 0.5 m 的线缆连接仪器与测试线缆。线缆测试平台搭建完成后,利用参考文献[13]中提及的测量方法,在室温条件下完成参数 S 的测量。使用安捷伦矢量网络分析仪,在校准后对两种 100 m 双绞线线缆(CAT5E 和 CAT6)分别进行测量,测量范围选择在 10 MHz~1 GHz 频率之间,联立式(15)和(16),解方程组得:

$$k_1 = 2.965 \times 10^{-6} \frac{\text{dB}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

$$k_2 = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{dB}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

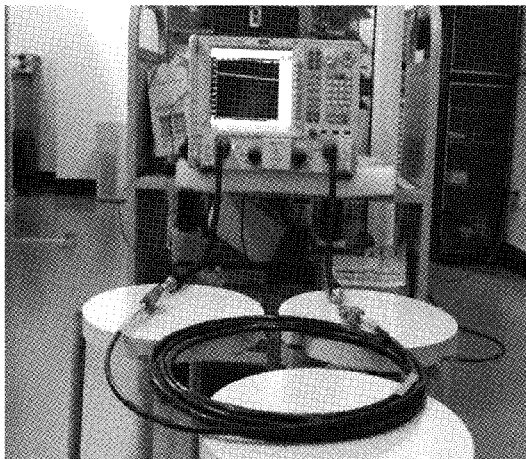


图 2 搭建的实验测试平台

把求得的参数 K 的值代入式(13)便可以得到相应电缆在所选范畴内的损耗性能。实验测试和 MATLAB 仿真拟合分别得到的 CAT6 线缆衰减曲线,如图 3 所示,可以看出,在 10~300 MHz 的频率范围内误差小于 0.5 dB,具有较好的贴合度。

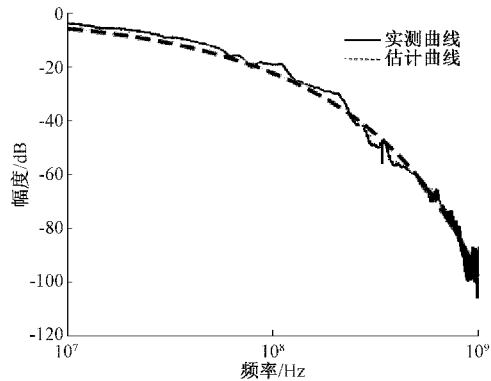


图 3 线缆衰减图

在测量频率 10 MHz~1 GHz 条件下,通过对比实际测试结果与软件仿真得到的衰减曲线的贴合程度,从而验证仿真结果的可靠性。在校准状态下,把网络测试仪测试的试验数据存储下来,实测曲线(A:CAT6;B:CAT5E)如图 4 所示。

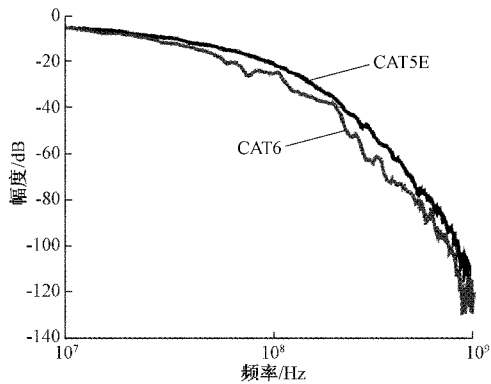


图 4 实测曲线对比图

通过图 4 两种电缆对比可以看出^[14],当线缆长度大小一样时,若工作在频率较低条件下,两者看不出有明显的差别,但当频率不断增大,因为两者在原材料和制作工艺等方面存在差别,传输线上的感抗增大也因此不一样,从而电流在传输线上的重新分布量也就不相同,因此衰减量就会不一样。

如图 5 所示,将两种电缆试验测得的衰减曲线与仿真估计曲线分别比较。从中可以看出,当频率在 10~200 MHz 之间时,误差不超过 ± 0.5 dB,两种线缆的测试曲线与建模仿真曲线基本一致。当频率超过 300 MHz 时,电缆的衰减量开始逐渐变得不同,而且两者的不同越来越大,这是因为不同双绞线电缆参数会有所差异导致的^[15]。当频率超过 500 MHz 时,CAT6 型号线缆的模型与实测结果的误差绝对值不超过 1.5 dB,CAT5E 型号电缆误差绝对值范围大概在 0.7 dB 以内。

通过以上测量频率选择在 10 MHz~1 GHz 范围内,RLCG 模型预测结果可得出,在频率 0~300 MHz 范围以内,电缆的衰减在可接受范围,且可以保证较高的预测结果精度。实测与模型仿真绝对误差图如图 6 所示。

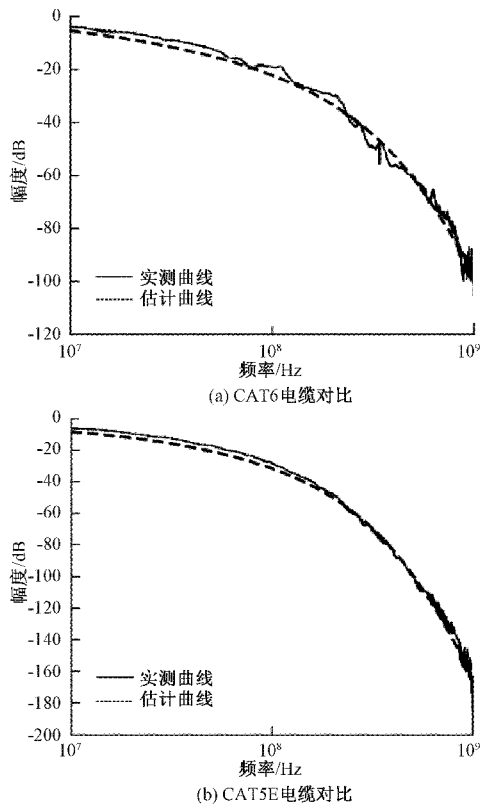


图5 实测与模型仿真对比图

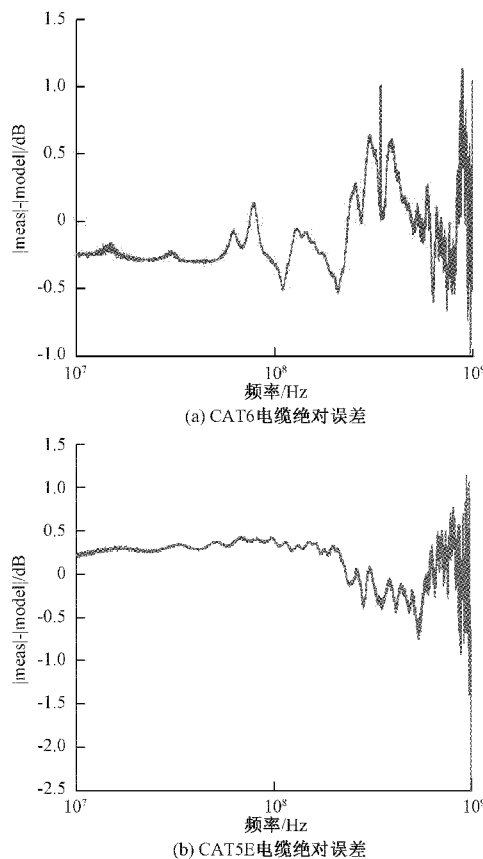


图6 实测与模型仿真绝对误差图

4 结 论

本文首先利用RLCG理论展开对信号传输过程中衰减情况的讨论,并且用公式说明了衰减信号与频率两者间的联系,提出的模型分析方法只需要考虑K和S这两个参数,其中,参数K通过最小二乘法进行估计,参数S应用网络分析仪进行测量,最后通过将拟合得到的电缆衰减特性曲线与实验结果进行比较,可以发现,在0~200 MHz范围内,两者结果基本保持一致,该模型可以准确地表示出传输线的衰减特性,因此在双绞线高速、远距离可靠传输LVDS信号方面具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 李力厚,程磊.基于自适应纠错功能需求的通信射频模块控制电路设计[J].自动化与仪器仪表,2019(7):127-129,132.
- [2] 吴爱华,刘晨,陈锋,等.矢网中噪声选件的校准方法研究[J].中国测试,2017,43(8):6-10.
- [3] ASROKIN A, RAHIM M, ABIDIN A, et al. Cable modelling comparison for twisted pair copper plant in Malaysia[C]. 2015 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering, George Town, Malaysia, IEEE, 2016:359-364.
- [4] ACATAUASSU D, HÖST S, LU C, et al. Simple and causal copper cable model suitable for G. fast frequencies[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(11): 4040-4051.
- [5] LAFATA P. Simple attenuation models of metallic cables suitable for G. fast frequencies[J]. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2015, 13(2): 147-155.
- [6] 李鹭.基于MIMO的双绞线高速传输仿真平台研发[D].成都:电子科技大学,2014.
- [7] FANG W, REN Y, LIU X, et al. Parameter extraction method for the twisted pair cable with rectangular connectors[J]. Public Library of Science, 2018, 13(10): 10.1371.
- [8] 衡科尹.有源多线对信道仿真方法及实现[D].成都:电子科技大学,2016.
- [9] 方炜,任勇峰,储成群,等.低电压差分信号远距离通信电缆参数估计[J].科学技术与工程,2018,18(19):209-212.
- [10] 张义鑫,张果.水下回路通信电信号传输特性仿真研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(4):204-210.
- [11] 李俊晖,石守东,谢志军,等.基于边缘重建的双绞线绞距实时检测方法[J].仪器仪表学报,2019,40(6):86-95.
- [12] XU J, LU J, KUMAGAI S, et al. Validation of a

- deplasticizer-ball milling method for separating Cu and PVC from thin electric cables: A simulation and experimental approach[J]. Waste Management, 2018, 82: 220-230.
- [13] TANG X, SUN S, XIE G, et al. Long-distance transmission of the multi-channel high speed space camera data [J]. Journal of Information and Computational Science, 2014, 11(15): 5641-5652.
- [14] 刘士兴,李隆,雷淑芳,等. 米量级电缆反射问题的研究[J]. 国外电子测量技术,2020,39(1):123-126.
- [15] 朱泽琿,任勇峰,贾兴中. 基于 LVDS 长距离高可靠性传输的优化设计[J]. 电子测量技术,2020,43(20): 150-154.

作者简介

韩冰,硕士研究生,主要研究方向为电路与系统设计、测试测量技术及仪器。

E-mail:937972189@qq.com

文丰,教授,主要研究方向为微系统集成技术、传感器测量技术。

E-mail: nucwcnfeng@163.com

袁小康,硕士研究生,主要研究方向为电路与系统设计。

E-mail:1024762413@qq.com