

引用格式:黄倩,项伟,王彤,等.考虑传输衰减的航空数据总线误码率研究[J].电光与控制,2018,25(11):67-72. HUANG Q, XIANG W, WANG T, et al. Research on bit error rate of avionic data bus considering transmission attenuation[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(11):67-72.

考虑传输衰减的航空数据总线误码率研究

黄倩, 项伟, 王彤, 何锋
(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

摘要: 在航空电子系统中,为机载电子设备提供高效可靠的实时通信是航空数据总线的基本要求,而传输线是航空数据总线进行数据传输的重要载体。通过分析传输线结构、分布参数及集总参数模型,得出了其状态转移函数、频谱特性和衰减特性。结合传输线电气特性,进一步分析了信号在传输中由于衰减而引起的传输错误,获得了传输线电气参数和误码率关系的理论数值模型。利用所推导的数值模型对 ARINC429 总线性能进行深入研究,在考虑传输中所允许的最小信噪比情况下,计算了不同线径传输线的误码率值。计算结果表明:传输线径的微小变化有可能会导致数据总线误码率数量级的变化。该研究工作为航空数据总线以物理指标选择传输线提供了参考依据。

关键词: 航空电子系统; 航空数据总线; 误码率; 传输线; 传输衰减

中图分类号: V243; TP393.1 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.11.013

Research on Bit Error Rate of Avionic Data Bus Considering Transmission Attenuation

HUANG Qian, XIANG Wei, WANG Tong, HE Feng
(School of Electrical and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In avionics systems, it is a basic requirement for the avionic data bus to provide efficient and reliable real-time communication for airborne electronic equipment, and the transmission line is an important carrier for transferring data over the avionic data bus. The state transition function, spectral characteristics and attenuation characteristics are obtained by analyzing the structure, the distributed parameter and lumped parameter model of the transmission line. The transmission error caused by signal attenuation during transmission is further analyzed considering the electrical characteristics of the transmission line, and the theoretical numerical model of the relationship between the electrical parameter and the bit error rate is obtained. By using the numerical model deduced from the study, the performance of the ARINC429 bus is studied in detail. Meanwhile, the bit error rates of the transmission lines with different diameters are calculated considering the permitted minimum signal-to-noise ratio in transmission. The results show that even slight changes in the diameter of the transmission line may lead to order-of-magnitude changes in the bit error rate of the data bus. The study provides a reference for selecting the transmission line by means of physical data for the aviation data bus.

Key words: avionics; avionic data bus; bit error rate; transmission line; transmission attenuation

0 引言

随着航空电子系统(Avionics System)不断向智能化、小型化、综合化和模块化的方向发展,航空数据总线作为其关键支撑技术,也不断进行着相应的升级和

改进。由于机载电子设备越来越多,电子系统的交联也越来越复杂,传输线作为航空数据总线的基础组成部分,它的电气性能直接影响了各航电设备之间数据通信和信息交换的正确性和有效性。

在传输线研究方面,文献[1]中对几种典型航空数据总线所用传输线进行了归总,如 ARINC429 总线、MIL-STD-1553B 总线多采用屏蔽双绞线作为传输线,一些新型数据总线如 FC, SCI 采用光纤作为传输线。屏蔽双绞线由于较强的抗干扰性、低廉的价格、多类多

收稿日期:2017-12-13 修回日期:2017-12-29

基金项目:国家自然科学基金(61301086)

作者简介:黄倩(1993—),女,河北邢台人,硕士生,研究方向为航空电子总线与通信。

路信号同步传输等特点,目前仍是民用飞机数据总线的主要传输线。在传输线电气性能研究方面,主要有两种方法:一种是采用电磁场数值模拟方法,如文献[2-3]中采用的时域有限差分法;另一种是利用传输线理论采用电路模型,以有限元法对传输线电气参数进行分析^[4-5]。

在航空数据总线传输性能研究方面,文献[6]通过介绍 1553B 总线系统各模块如收发器、双绞线、变压器等,以及对整个总线系统建模,从时间抖动和幅度噪声角度对总线系统误码率的影响进行总结;文献[7-8]利用多导体传输线理论对双绞线受到的外界串扰进行分析,进一步评估了 ARINC429 总线数据传输的正确性;文献[9]从高速通信系统出发,通过建立通信中时间抖动模型,结合信道特征分析信道抖动分布与误码率的关系。

整体来看,目前传输线方面的研究主要集中于传输线电气性能理论分析,较少考虑传输线物理参数变化对性能的影响。而误码率性能取决于信号传输的整个环节,包括外界干扰对传输的影响。传输线作为数据总线通信的重要载体,有必要从其本身的电气特性方面建立合适的模型,以讨论信道本身对数据传输误码率的影响。

本文考虑物理因素影响下的传输线电气特性变化,在其基础上提出考虑信号衰减的误码率计算方法,并理论分析传输线物理参数对误码率的影响,最后通过典型 ARINC429 总线性能分析案例对本文所提出的方法进行验证。

1 数据总线传输线分析

考虑现有民用飞机多采用屏蔽双绞线作为数据总线网络的传输介质,本文通过一对两芯屏蔽双绞线对航空数据总线的传输线结构进行分析。屏蔽双绞线结构如图 1 所示。

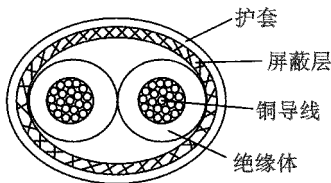


图 1 屏蔽双绞线结构图

Fig. 1 Structure of shielded twisted pair cable

屏蔽双绞线是由两根相互绝缘的铜导线按一定密度的螺旋结构绞合而成,线对的绞合结构降低了电磁场对双绞线的干扰,双绞线外部由屏蔽层包裹可减小辐射,屏蔽双绞线在使用时,屏蔽层必须接地。

1.1 屏蔽双绞线分布参数

双绞线由于是两根导线绞合而成的非均匀传输

线,单位长度上的参数计算非常复杂。但由于两根导线具有对称的空间结构和固定的相对位置,可以将双绞线的每一小段看作是平行双导线进行分析^[10]。传输线是一个分布参数网络,两导体都存在有耗电阻,即

$$R = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\mu f}{\pi \sigma}} \quad (1)$$

式中: σ 为导体的电导率; μ 为导体的磁导率; d 为导体直径; f 为导线的信号频率。

相互绝缘的平行双导线是电容器的两个极板,根据平行板电容器的电容表达式可得两条平行导线间单位长度电容为

$$C = \frac{\pi \varepsilon}{\ln \frac{D + \sqrt{D^2 - d^2}}{d}} \quad (2)$$

式中: ε 为真空介电常数; D 为两导体中心距离。

一对双绞线的电感表征两根导线之间的电磁感应关系,包括了内电感和外电感两部分,即

$$L = L_r + L_o = \frac{\mu_1}{\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{d} \right) \quad (3)$$

式中, μ_1 为绝缘介质的磁导率。

对称的双绞线结构使回路之间耦合程度非常低,回路互感近似为零。

双绞线中两根导线间应是互相绝缘的,每根线对地也应绝缘,但实际上这些绝缘电阻不可能为无穷大,两平行导体间存在漏电导,即

$$G = 2\pi f C \tan \delta_p \quad (4)$$

式中, δ_p 为绝缘介质等效损耗角。

由以上分布参数方程可以得出传输介质的分布参数与双绞线的长度、线径、频率以及材料参数电导率、磁导率等有关,尤其当导线结构因制作挤压发生变化时,其分布参数也会发生相应改变。

1.2 屏蔽双绞线电气特性分析

在航空数据总线信号传输中,传输线上各点在同一瞬间电流和电压大小、相位均不相同,将双绞线分成许多微元段 dx (见图 2),将每个微元段等效为集总参数电路,采用 T 型网络进行级联^[11]。

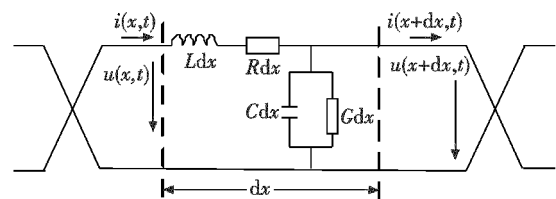


图 2 屏蔽双绞线等效电路图

Fig. 2 The equivalent circuit of shielded twisted pair

图 2 为双绞线的一个微元段 dx ,根据电路定理得微元段上的电压电流关系为

$$\begin{cases} -\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = i(x,t)R + L\frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = u(x,t)G + C\frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

为了具有更普遍的意义,设双绞线电压及电流为正弦变化规律,信号频率为 ω ,当电路模型达到稳态时,传输线任意一点都具有与输入激励相同的频率正弦稳态解,定义输入激励为

$$\begin{cases} u(x,t) = Ue^{j\omega t} \\ i(x,t) = Ie^{j\omega t} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),等式两边再同时对 x 求导,可以得到式(7)所示的二次微分方程

$$\begin{cases} \frac{d^2 U(x)}{dx^2} = ZYU(x) = \gamma^2 U(x) \\ \frac{d^2 I(x)}{dx^2} = ZYI(x) = \gamma^2 I(x) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Z = R + j\omega L$ 为传输线单位长度的串联阻抗; $Y = G + j\omega C$ 为传输线单位长度并联导纳; $\gamma = \sqrt{ZY} = [(R + j\omega L) \cdot (G + j\omega C)]^{1/2}$ 为传输线的传播常数。

给定边界条件:输入边界始端电压 $U(0,\omega) = U_1$,始端电流 $I(0,\omega) = I_1$ 。定义传输线长度为 l ,传输线终端电压 $U(l,\omega) = U_2$,终端电流 $I(l,\omega) = I_2$,可得终端电压和电流的解为

表 1 航空数据电缆的电气特性

Table 1 Electrical characteristics of aviation data cable

双绞线类型	横向径/mm	纵向外径/mm	最小弯曲半径/mm	单位长度重量/ ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-1}$)	标准衰减(dB/30 m 情况下)			
					10 MHz	100 MHz	200 MHz	500 MHz
AWG20	5.00	3.68	25.0	31.7	1.7	4.8	6.8	11.3
AWG22	3.81	2.79	19.1	23.2	2.0	6.6	9.8	15.7
AWG24	3.23	2.3	16.2	16.8	2.3	7.6	10.7	17.3
AWG26	2.52	2.1	12.6	12.8	2.8	9.4	13.8	21.5
AWC28	1.98	1.8	9.9	8.6	4.0	13.2	19.2	32.0

由此可见,双绞线的衰减只取决于传输线本身的参数,在各电导率、磁导率等材料参数固定的情况下,衰减主要受传输长度和线径的影响,随传输长度增大信号衰减越快,且随频率的不断增大,信号衰减趋近平稳;同时传输线线径越小,衰减越快,其原因主要是线径减小时,传输信号的阻抗损耗变大。

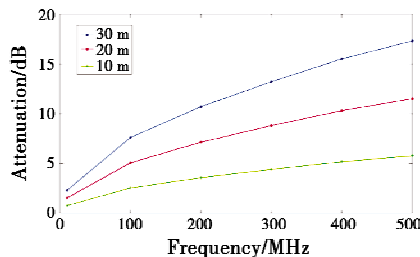


图 3 不同长度屏蔽双绞线幅频衰减变化特征
Fig. 3 Amplitude-frequency decay characteristics of shielded twisted pair with different lengths

$$\begin{cases} U_2 = U_1 \left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \right) - Z_0 I_1 \left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \right) \\ I_2 = I_1 \left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \right) - \frac{U_1}{Z_0} \left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$ 为传输线特征阻抗。

当信号传输频率很高时, $R \ll j\omega L, C \ll j\omega C, Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}}, \gamma = \frac{1}{2} \left(R\sqrt{\frac{C}{L}} + G\sqrt{\frac{L}{C}} \right) + j\omega \sqrt{LC} = \alpha + j\beta$ 。

当终端负载与线路阻抗匹配时,则电压状态转移函数^[12]为

$$H(\omega) = U_2/U_1 = e^{-\gamma l} \quad (9)$$

由式(9)可得双绞线上信号的衰减频率特征为

$$\begin{aligned} A_{dB}(\omega) &= P_1 - P_2 = -10 \lg \frac{P_2}{P_1} = \\ &= -20 \lg |H(\omega)| = 8.68\alpha(\omega)l \end{aligned} \quad (10)$$

表 1 为某公司的高速航空数据电缆屏蔽双绞线电气性能参数,结合式(10)和表 1 可以得到信号衰减与传输长度及传输线线径间的关系。选取表 1 中线径为 3.23 mm 的屏蔽双绞线,随频率不断增加,传输信号衰减随传输长度变化特征如图 3 所示。选取不同线径的屏蔽双绞线,固定传输长度为 30 m,随着频率的不断增大,传输信号衰减变化特征如图 4 所示。

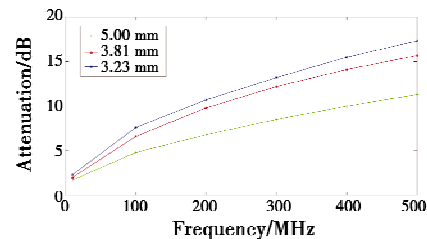


图 4 不同线径屏蔽双绞线幅频衰减变化特征
Fig. 4 Amplitude-frequency decay characteristics of shielded twisted pairs with different wire diameters

2 数据总线误码率分析

误码率是衡量通信网络系统的一项重要尺度,任何系统都必须满足误码率的最低规范要求。影响误码率的主要因素分为时间抖动和幅度噪声,当信号在传输线中传播时,信号会因传输线损耗产生幅度衰减,受

幅度噪声影响,信号高电平电压低于参考值或低电平电压高于参考值就会造成接收端判决错误,从而导致误码率升高。

本文首先讨论幅度噪声的概率密度函数 PDF 和比特误码率(BER)概率分布函数 CDF 之间的关系,进一步从信号传输衰减角度分析总线系统误码率。

2.1 误码率研究

在传输线信道中存在的噪声通常可用高斯白噪声表示。如图 5 所示,BER 与幅度噪声之间的关系和判决电平 v_s 相关,任何出现在低于判决电平 v_s 区域内的 1 都会被判决为 0,从而造成误码^[13]。

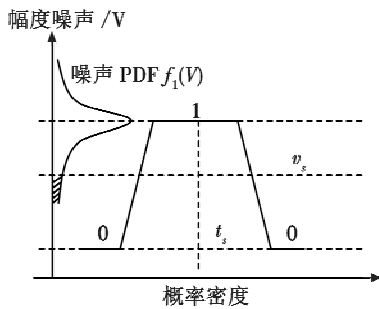


图 5 幅度噪声和误码率关系

Fig.5 Amplitude noise vs bit error rate

假定一个采样时刻,在采样时刻 t_s 处逻辑 1 的幅度噪声概率密度函数被定义为 $f_1(V)$, P_1 为发送码型 1 的概率,因此逻辑 1 在幅度噪声影响下的误码率被定义为

$$F_1(v_s) = P_1 \int_{-\infty}^{v_s} f_1(V) dV. \quad (11)$$

同理,逻辑 0 的幅度噪声的 BER 被定义为

$$F_0(v_s) = P_0 \int_{v_s}^{+\infty} f_0(V) dV. \quad (12)$$

比特 1 和比特 0 的误码率总和就是在采样时刻 t_s 系统的误码率,即

$$B_{\text{BER}} = P_0 \int_{v_s}^{+\infty} f_0(V) dV + P_1 \int_{-\infty}^{v_s} f_1(V) dV. \quad (13)$$

2.2 信号衰减对误码率影响

设信道中背景噪声是功率为 $N = \sigma_n^2$ 的高斯白噪声,传输为单极性非归零码(NRZ)基带数字信号,设发送端信号幅值为 A ,信号在信道中传输时,受传输线衰减性能的影响,在接收端判决器处输入的信号幅值根据式(9)和式(10)可得 $A_1 = A |e^{-\alpha l}| = A \cdot 10^{-A_{dB}/20}$ 即接收端相邻幅度间隔为 A_1 ,则信号幅度分别为 $A_1, 0$,选择在接收端信号最佳判决电平为 V_s ,则信号在接收端叠加噪声后的幅度概率密度函数如图 6 所示。

为计算方便,引入 Q 函数。正态分布函数为 $\phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt$, Q 函数为 $Q(x) = 1 - \phi(x) =$

$$\int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} dt.$$

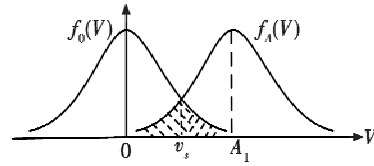


图 6 码元幅度概率密度函数

Fig.6 Probability density function of symbol magnitude

高电平 1 发生错误判决的概率为

$$F_1 = \int_{-\infty}^{v_s} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} e^{-(V-A_1)^2/2\sigma_n^2} dV = Q\left(\frac{A_1 - V_s}{\sigma_n}\right). \quad (14)$$

同理,低电平 0 发生错误判决的概率为

$$F_0 = \int_{v_s}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_n} e^{-V^2/2\sigma_n^2} dV = Q\left(\frac{V_s}{\sigma_n}\right). \quad (15)$$

当两种幅度等概率出现时, $P_1 = P_0 = \frac{1}{2}$, 令最佳判决电平 $V_s = A/2$, 总的误符号率为

$$B_{\text{BER}} = P_1 F_1 + P_0 F_0 = \frac{1}{2} \left[Q\left(\frac{A_1 - V_s}{\sigma_n}\right) + Q\left(\frac{V_s}{\sigma_n}\right) \right] = \frac{1}{2} \left[Q\left(\frac{A(10^{-A_{dB}/20} - 1/2)}{\sigma_n}\right) + Q\left(\frac{A/2}{\sigma_n}\right) \right]. \quad (16)$$

由式(16)可知:信号在双绞线中传输时,考虑传输线性性能影响,总线误码主要和发送信号幅值及传输线衰减参数有关。

3 ARINC429 总线误码率分析案例

ARINC429 总线通过一对屏蔽双绞线从一个端口向其他设备以单向串行方式传输数字信息,当通信设备需双向通信时,每个方向各用一根独立的传输线。ARINC429 总线电平协议是差分传输,能够较好地抑制共模干扰,抗干扰能力强。信号以电脉冲形式发送,采用双极性归零制三态码的方式,即传输信号由高(HI)、零(NULL)和低(LOW)三电平状态组成,高电平逻辑值为“1”,低电平逻辑值为“0”^[14]。每传输 32 位为 1 个数据字,在连续传输时,信号之间间隔至少有 4 bit 时间(零电平)来区分,图 7 为 ARINC429 双极性归零码示意图。表 2 为 ARINC429 总线传输信号的电平标准,发送端和接收端所列为两者之间的电位差。

表 2 ARINC429 信号的电平标准

Table 2 Level standards of ARINC429 signal V

电平状态	发送端	接收端
HI	+10 ± 1.0	+6.5 ~ +13
NULL	0 ± 0.5	+2.5 ~ - 2.5
LOW	-10 ± 1.0	-6.5 ~ -13

ARINC429 总线采用双极性归零码,属于三元码,其幅度概率密度函数如图 8 所示。发送端信号相邻幅

度间隔为 $A = 10 \text{ V}$ ，接收端信号幅度设为 A_1 ，是高 (HI)、零 (NULL) 和低 (LOW) 三电平状态在接收端的最佳判决电平，如表 2 所示。

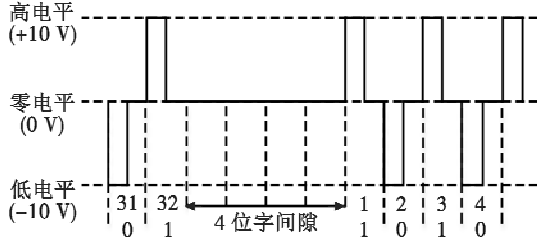


图 7 ARINC429 总线传输码元示意图

Fig. 7 ARINC429 bus transmission symbol

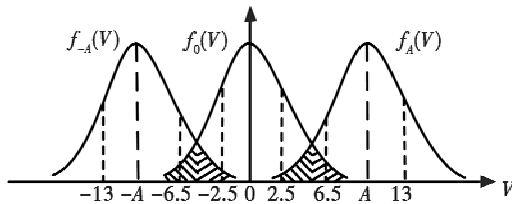


图 8 ARINC429 总线码元幅度概率密度函数图

Fig. 8 Probability density function of ARINC429 bus symbol amplitude

根据式 (14)、式 (15) 可得接收器判决器中各电平判错的概率分别为

$$F_A = \int_{0.65A}^{1.3A} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-(V-A_1)^2/2\sigma_n^2} dV = Q\left(\frac{A_1 - 1.3A}{2\sigma_n}\right) - Q\left(\frac{A_1 - 0.65A}{2\sigma_n}\right) \quad (17)$$

$$F_0 = \int_{-0.25A}^{0.25A} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-V^2/2\sigma_n^2} dV = 2Q\left(\frac{0.25A}{\sigma_n}\right) \quad (18)$$

$$F_{-A} = \int_{0.65A}^{1.3A} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-(V-A_1)^2/2\sigma_n^2} dV = Q\left(\frac{A_1 - 1.3A}{\sigma_n}\right) - Q\left(\frac{A_1 - 0.65A}{\sigma_n}\right) \quad (19)$$

当传输大量信息时，逻辑值“0”和“1”将会等概率出现，则这 3 种电平出现概率为 $P_{-A} = P_A = 1/4$ ， $P_0 = 1/2$ ，所以总误码率为

$$B_{BER} = P_{-A}F_{-A} + P_0F_0 + P_AF_A = \frac{1}{2} \left[Q\left(\frac{A_1 - 1.3A}{\sigma_n}\right) + Q\left(\frac{A_1 - 0.65A}{\sigma_n}\right) \right] + Q\left(\frac{0.25A}{\sigma_n}\right) = \frac{1}{2} \cdot \left[Q\left(\frac{A(10^{-A_{dB}/20} - 1.3)}{\sigma_n}\right) + Q\left(\frac{A(10^{-A_{dB}/20} - 0.65)}{\sigma_n}\right) \right] + Q\left(\frac{0.25A}{\sigma_n}\right) \quad (20)$$

根据数字式信息传输系统 (DITS) 协议^[15] 规范，在 ARINC429 系统中对误码率的要求：传输一定量的消息所允许最大误差率为 10^{-7} ，根据 DITS 测试方法规定系

统中噪声功率为信号功率的 0.1% ~ 1%。在此，以最小信噪比 100 为准则，ARINC429 总线的信号功率为 $S = A^2/2$ ，则噪声功率为 $\sigma_n^2 = S/100$ ，将此代入式 (20)，可绘制信号在以高速 (100 Kbit/s) 传输、传输距离为 30 m 时，信号衰减与误码率的关系，如图 9 所示。从传输线本身角度考虑，由于信号衰减主要取决于传输长度和线径，在此计算某公司的 ARINC429 总线传输所用的屏蔽双绞线误码率，结果如表 3 所示，并绘制不同线径屏蔽双绞线随传输长度增加误码率变化情况，如图 10 所示。

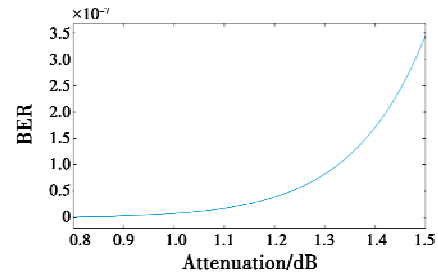


图 9 ARINC429 总线信号衰减与误码率关系图

Fig. 9 ARINC429 bus signal attenuation vs bit error rate

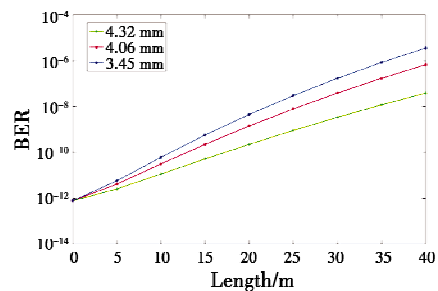


图 10 不同线径屏蔽双绞线误码率变化特性

Fig. 10 Variation of bit error rate of shielded twisted pair with different wire diameters

表 3 ARINC429 总线传输误码率

Table 3 ARINC429 bus transmission BER

屏蔽双绞线线径/mm	信号衰减/dB	误码率
4.32	0.9	3.39×10^{-9}
4.06	1.2	3.88×10^{-8}
3.45	1.4	1.71×10^{-7}

分析以上结果可知，随着信号衰减增大，总线网络误码率也会随之增大。并且由于衰减性能受其传输线物理参数线径和传输长度的影响，在具体屏蔽双绞线所影响的误码率值分析中可看出：随着传输长度增大，误码率也会随之增大；传输线线径越小，误码率越大，当线径发生微小变化时，误码率有可能变化一个数量级，并且对于线径较小的屏蔽双绞线，当传输超过一定距离，误码率值就会超过所允许的最大值。所以航空数据总线传输线选型时，尽量在允许范围内选择最大

线径传输线,并且合理控制传输长度,将有利于降低总线系统传输误码率,保证数据通信的高效正确性。

4 结 论

本文以航空机载总线的误码率性能为研究对象,提出了一种考虑传输信号衰减的误码率计算方法。通过微元法分析双绞线电路模型,与分布参数值相结合,导出传输线的传递函数和主要电气性能。与常用航空数据总线传输线参数值对应,分析出传输线物理参数线径和传输长度是影响信号衰减的主要因素,进一步从传输线本身电气性能角度分析总线误码。以 ARINC429 总线传输为例,在给定系统最小信噪比的情况下,利用信号衰减与误码率的数值模型计算不同线径屏蔽双绞线的误码率值。计算结果与实际情况相一致,验证了从传输线电气特性角度分析误码率方法的合理性,并为数据总线在允许范围内选择何种线径的传输线提供了理论参考依据。

参 考 文 献

- [1] 唐宁,常青. 航空数据总线技术分析研究[J]. 现代电子技术,2014,37(4):64-69.
- [2] WATANABE K, SEKINE T, TAKAHASHI Y. A FDTD method for non uniform transmission line analysis using Yee's-lattice and wavelet expansion[C]//IEEE Mtt-S International Microwave Workshop Series on Signal Integrity and High-Speed Interconnects, 2009:83-86.
- [3] ZHOU Y H, SHI L H, CHENG G, et al. Combination of FDTD method with digital filter in analyzing the field-to-transmission line coupling[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(4):1003-1007.
- [4] BUCCELLA C, FELIZIANI M, MANZI G, et al. Prediction of voltage and current propagation in twisted wire pairs (TWPs) by a circuit model[C]//International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Chicago, 2005:51-55.
- [5] HASSOUN F, TARAFI R, ZEDDAM A. Calculation of per-unit-length parameters for shielded and unshielded twisted pair cables[C]//The 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE, 2006:250-253.
- [6] 昶旭曦. 基于 ADS 的时分制指令/响应型 1553B 总线系统建模[D]. 西安:西安电子科技大学,2011.
- [7] SPADACINI G, GRASSI F, MARLIANI F, et al. Transmission-line model for field-to-wire coupling in bundles of twisted-wire pairs above ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2014, 56(6):1682-1690.
- [8] 王若文. 飞机 ARINC429 总线数据传输正确性评估与测试[D]. 天津:中国民航大学,2016.
- [9] WANG D, YANG J, WANG Y. An equivalent model of pattern generator in jitter testing[J]. Physics Procedia, 2012, 24(2):1092-1099.
- [10] 刘建强,郑琼林,张永锋,等. CRH3 型动车组列车网络传输介质电气特性研究[J]. 机车电传动,2010(6):7-11.
- [11] MUSA S M, SADIKU M N O. Analysis of multiconductor quasi-TEM transmission lines and multimode waveguides[J]. International Journal of Engineering Research and Development, 2014, 10(5):87-93.
- [12] 宋娟,王立德,严翔,等. 列车控制网络专用双绞线传输特性的研究[J]. 铁道学报,2012,34(3):61-67.
- [13] KIM J, SHIN D, LEE J, et al. Statistical BER analysis due to supply voltage fluctuations at a single-ended buffer[C]//Design Conference, Santa Clara, 2013:1052-1071.
- [14] ARINC. ARINC429 protocol tutorial[M]. Santa Barbara: Condor Engineering, Inc., 2004.
- [15] ARINC. ARINC specification 429 part1-17:mark33-digital information transfer system(DITS)[S]. Maryland: Aeronautical Radio, Inc., 2004.

(上接第 66 页)

- [40] CHEN J, SHI Z K. Flight controller design of transport airdrop[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5):600-606.
- [41] ZHANG C, CHEN Z J, WEI C. Sliding mode disturbance observer-based backstepping control for a transport aircraft[J]. Science China, 2014, 57(5):228-243.
- [42] LIU R, SUN X X, WANG D. Heavyweight airdrop flight control design using feedback linearization and adaptive sliding mode[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2016, 38(10):1155-1164.
- [43] LIU R, SUN X X, DONG W H, et al. Projection-based adaptive backstepping control of a transport aircraft for heavyweight airdrop[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2015(12):1-10.
- [44] 董文瀚,孙秀霞,林岩. 一种 Backstepping 模型参考鲁棒飞行控制律的设计[J]. 系统工程与电子技术,2010, 32(7):1485-1488.
- [45] CAO C Y, HOVAKIMYAN N. Design and analysis of a novel L1 adaptive controller, part I: control signal and asymptotic stability[C]//Proceedings of the American Control Conference, IEEE, 2006:3397-3402.
- [46] LIU R, SUN X X, DONG W H, et al. Dynamics modeling and L1 adaptive control of a transport aircraft for heavyweight airdrop[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015(11):1-15.