DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)08-0131-04

基于北斗短报文的铁路通信网络数据低时延传输

朱德华

（国能朔黄铁路发展有限责任公司，河北 肃宁 062350）

摘　要：以提升铁路通信网络数据传输水平为目的，提出基于北斗短报文的低时延传输方法。该方法依据网络通信节点能耗，设计数据低时延传输算法，向数据采集单元发送采集命令。采集单元利用数据传输单元（data transfer unit，DTU）子单元采集数据后，经北斗短报文通信单元传输至通信信道内的不同专网，再通过专网信道传输到铁路总站数据库内，用于铁路业务应用、营销应用和其他应用。实验结果表明，该方法对铁路通信网络节点能耗数值的计算结果较为准确，且在传输相同数据包的情况下，传输时延数值较低，应用效果显著。

关键词：北斗短报文；铁路通信网络；数据低时延传输；技术架构；卫星通信；通信协议

中图分类号：TP393　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003-7241（2025）08-0131-04

Low Latency Data Transmission in Railway Communication Network Based on Beidou Short Message

ZHU Dehua

(Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Suning 062350, China)

Abstract: A low latency transmission method based on Beidou short messages is proposed to improve the data transmission level of railway communication networks. This method designs a low latency data transmission algorithm based on the energy consumption of network communication nodes, and sends acquisition commands to the data acquisition unit. After the data is collected by the data transfer unit (DTU) subunit, which is then transmitted to different private networks within the communication channel through the Beidou short message communication unit, and then it transmittes to the railway terminal database through the private network channel for railway business applications, marketing applications, and other applications. The experimental results show that the method is more accurate in calculating the energy consumption of railway communication network nodes, and the Transmission delay value is low when transmitting the same data packet, so the application effect is significant.

Keywords: beidou short message; railway communication network; low latency data transmission; technical architecture; satellite communication; communication protocol

0　引言

铁路运输网络分布范围较广，且整个铁路运输网络负责联通每列火车，联通每个站点，负责火车与站点之间通信的同时[1-3]，也为人们订购车票、身份认证提供平台。若铁路通信网络传输出现卡顿、时延情况时，严重影响其应用效果[4]。

针对这一问题，张涛等[5]基于LoRa节点协作设计了一种低延迟数据传输方法，刘彦等[6]针对时延可容忍数据，设计了一种传输效率实时优化方法。但在实际应用中发现，上述方法存在数据包丢失的现象，且对传输时延的控制效果一般。

北斗短报文是通过三颗地球静止轨道（geostationary earth orbit，GEO）卫星形成星间链路，实现全球范围内短报文通信的通信传输方法，该种通信传输方法具备较强的安全性，通信传输较为快速，在交通、军事等多个领域作为专门传输通道使用，北斗短报文也是目前应用最为广泛的通信传输方法[7]。本文以北斗短报文为基础，提出基于北斗短报文的铁路通信网络数据低时延传输方法。

1　铁路通信网络数据低时延传输

1.1　低时延传输技术架构设计

铁路通信网络数据低时延传输技术架构如图1所示。

该架构由数据采集单元、北斗短报文通信单元、通信信道单元和铁路总站组成。用户通过铁路总站内的数据采集控制模块，依据基于网络通信节点能耗的数据低时延传输算法向数据采集单元发送铁路通信网络数据采集命令后，数据采集单元利用电源为DTU子单元提供稳定电压。DTU单元将铁路通信网络数据传输到北斗短报文

*基金项目：朔黄铁路公司科技创新项目（SHYP-22-08）；河北省科技项目资助（SHYP-22-04）

收稿日期：2023-11-22

通信单元内，经由北斗短报文通信单元，将铁路通信网络数据发送到通信信道单元内的不同类型网络信道内，再存储到铁路总站的数据库内，用于铁路网络业务应用、营销应用和其他应用。

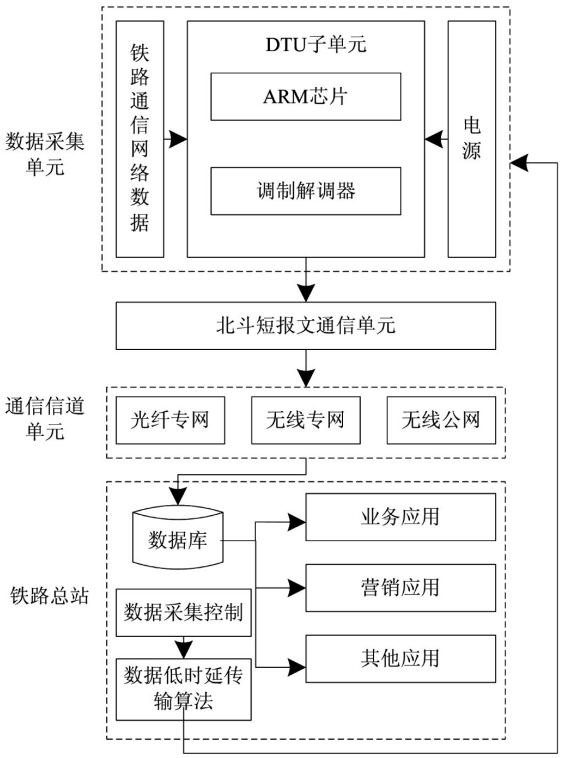


图1 数据低时延传输技术架构示意图

1.2 北斗短报文卫星通信单元设计

北斗短报文卫星通信单元总体结构如图2所示。

北斗短报文卫星通信单元由局域网（local area network chip，LAN）芯片、功率放大器（power amplifier chip，PA）芯片和MT6166射频基带处理芯片组成。利用LAN芯片接收铁路通信网络数据北斗报文信号后，经其内部的寄存器、同步管理器以及若干个回环和端口之间的传输后，输出可接收放大的铁路通信网络数据北斗报文信号[8]。随后，将该信号输入到MT6166射频基带处理芯片内，经信号调制后输入到PA芯片内，通过滤波处理，输出不含噪声和特定频率的北斗报文信号。

1.3 铁路通信主站与北斗短报文通信协议设计

铁路通信主站与北斗短报文通信协议是保障铁路网络数据低延时传输安全传送的基础，先设计铁路通信主站的通信协议，其协议帧格式如图3所示。

铁路通信主站在传输数据时，将数据的初始字符输入到通信协议内，按照字符长度A划分初始字符后，得到符合字符通信长度的初始字符，然后通过两个控制域将初始字符转换成链路用户数据。校验该数据后，实现铁路通信主站的通信传输。

北斗短报文通信协议与铁路通信主站通信协议存在一定差异，北斗短报文通信协议与卫星导航管理系统的通信格式相同，其数据传输通信协议信息传输基本格式如图4所示。

1.4 基于网络通信节点能耗的数据低时延传输算法

铁路通信网络数据在传输时，需降低数据传输的时延，在此使用基于网络通信节点能耗的数据传输算法实现铁路通信网络数据低时延传输，其详细过程如下：

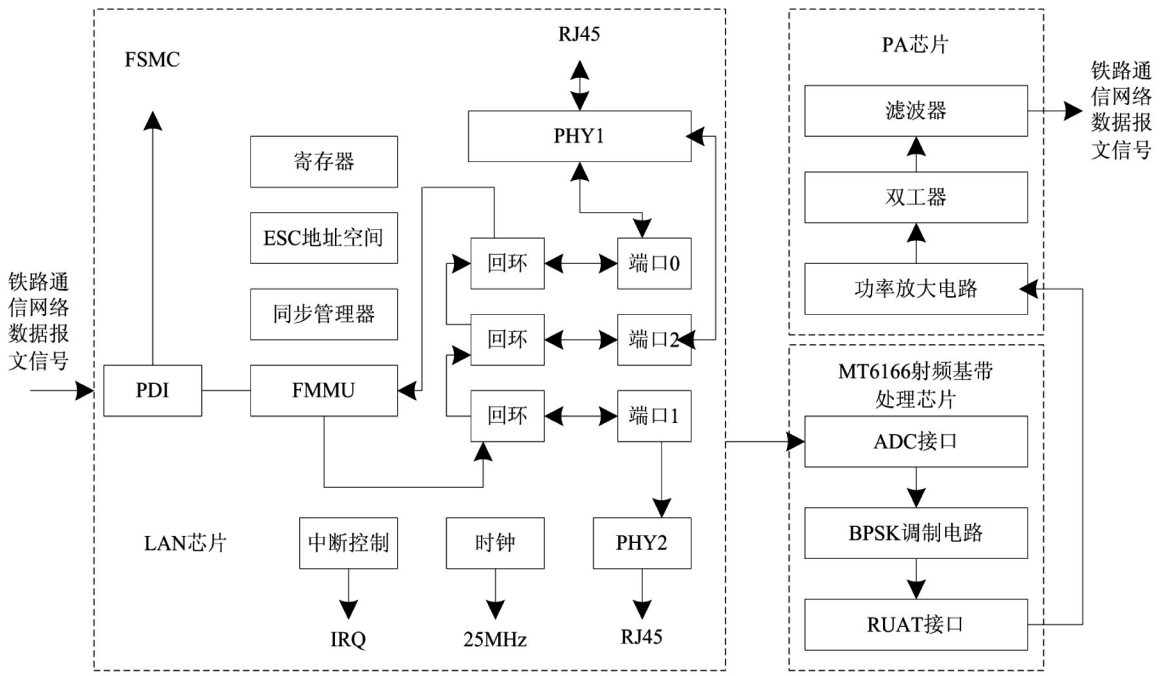


图2 北斗短报文卫星通信单元结构示意图

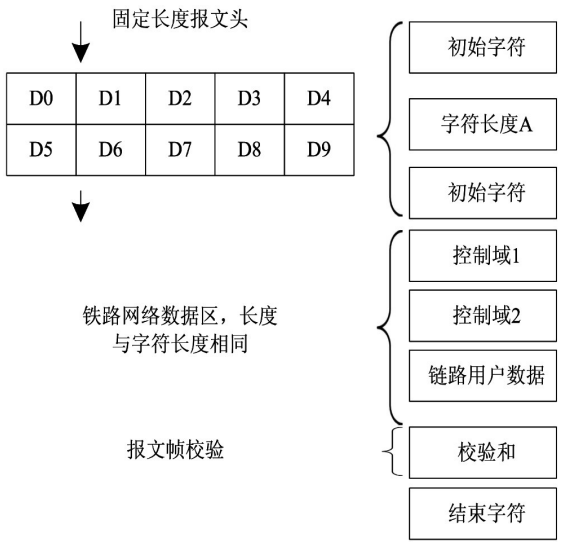


图3 铁路通信主站通信协议格式

令 S 为铁路通信网络数据包个数，节点 i 与节点 i+1 之间的传输链路由(i,i+1)表示，该两个节点之间的数据传输产生延迟受网络节点发送功率、数据包传输速率以及接收节点的成功收包功率影响。在铁路通信网络的信道内，节点 i 经过其链路向节点 i+1 发送数据包时，通信传输误码率为

$$G_e = Q\sqrt{2\Psi(d_{i,i+1})}\cdot\sqrt{\frac{B_N}{R_i}} \tag{1}$$

式中，G_e 为通信传输误码率；$d_{i,i+1}$ 为节点 i 和 i+1 之间距离；$Q(\cdot)$ 为高斯积分函数；B_N、R_i 分别为铁路通信网络数据传输信道噪声带宽和传输速率。

信噪比关于 $d_{i,i+1}$ 的函数表达公式如下：

$$\psi(d_{i,i+1}) = G_t - G_{\text{lost}}(d_0) - \eta\lg(\frac{d_{i,i+1}}{d_0}) - G_n \tag{2}$$

式中，$\psi(\cdot)$ 为铁路通信网络数据接收信噪比函数；G_t 为网络节点通信发射功率；d_0 为通信传输单位距离；$G_{\text{lost}}(d_0)$ 为单位距离的功率损耗；G_n、η 分别为接收功率最小阈值和衰减系数。

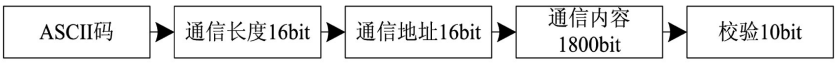


图4 北斗短报文通信协议格式

分别将式(2)结果代入到式(1)内，即可得到铁路网络数据通信时的误码率数值，以该误码率数值作为基础，计算铁路网络数据传输时一次传输成功的概率为

$$g_i = G_{\text{pkt}}G_{\text{ack}} \tag{3}$$

式中，g_i 为节点 i 通信传输一次成功的概率；G_{ack}、G_{pkt} 分别为确认数据包和全局变量数据包。

如果节点 i 发送铁路网络数据失败时，该节点被允许重新传输，则该种情况下，其数据包发送成功的概率计算公式为

$$G_{s(i)} = 1 - G_{f(i)} \tag{4}$$

式中，$G_{s(i)}$ 为重传情况下，数据包发送成功概率；$G_{f(i)}$ 为重传后发送失败概率。

令 N_i 为节点 i 发送一个数据包的总期望传输次数，其计算公式为

$$N_i = \frac{[K_i + g_iK_i]}{g_i} \tag{5}$$

以式(4)、式(5)结果为基础，计算节点 i 传输铁路网络数据的能耗为

$$\begin{aligned}E_i^c(t) = {} & E_{\text{Rx}}(l_p)N_{i-1}S + E_{\text{Tx}}(l_a,d)G_{s(i-1)}S + \\ & N_iSE_{\text{Tx}}(l_p,d) + G_{s(i)}SE_{\text{Rx}}(l_a)\end{aligned} \tag{6}$$

式中，$E_i^c(t)$ 为节点 i 传输铁路网络数据的能耗；$E_{\text{Tx}}(l_a,d)$ 为节点发送 1 个长度为 l_a 的数据包消耗能量；d 为铁路网络数据传输节点之间的距离；$E_{\text{Rx}}(l_p)$ 为网络节点接收长度为 l_p 数据包消耗的能量；S 为铁路网络数据传输过程中生成的数据编码包数量。

将式(4)、式(5)代入到式(6)内，即可得到节点 i 传输铁路网络数据的能耗数值，以该数值为基础，计算节点 i 向节点 i+1 数据传输时链路(i,i+1)的时延为

$$\mathrm{T}_i = N_iS\zeta_C + N_iS\zeta_D + G_{s(i)}S\zeta_A \tag{7}$$

式中，ζ_C 为节点的竞争信道通信传输时消耗的时间；ζ_D 为发送 1 个数据包消耗的时间；ζ_A 为发送一个确认数据包消耗的时间。

为保障铁路网络数据传输时的时延数值最小，设置公式(7)的优化条件为

$$\begin{cases}\min T_i \\ \text{w.r.t.}\quad R_i, K_i \\ \text{s.t.}\quad R_i \in \{r_1, r_2, \cdots, r_m\} \\ G_{s(i)} \geqslant \dfrac{S_0}{S} \\ E_i^r \geqslant \underline{E}\end{cases} \tag{8}$$

式中，w.r.t 为表示“关于”的符号；s.t.为数学中的约束条件符号；K_i 为数据包重新传输次数；$\underline{E}$ 为最小能耗平均值；S_0 为初始数据包编码数量；$\{r_1, r_2, \cdots, r_m\}$ 为候选传输速率。

2 实验分析

以某市区域铁路通信网络作为实验对象，对本文方

法的应用效果展开验证。该区域属于公网覆盖区域，且存在光纤通道，其数据采集区域初始面积为8 m^2，初始数据包数量为80个，然后以每次8 m^2的速度增加其数据包采集范围，数据包增加数量为80个，一共增加20次。

以铁路通信网络数据包传输时10个节点作为实验对象，使用本文方法计算该10个节点的能量，分析本文方法计算网络节点能量能力，测试结果如表1所示。

表1 铁路通信网络通信节点能量值

节点编码	实际能量	计算能量	节点编码	实际能量	计算能量
1	86.24	86.24	6	86.54	86.54
2	76.09	76.08	7	85.81	85.80
3	58.96	58.96	8	59.63	59.63
4	70.32	70.32	9	90.52	90.52
5	91.11	91.11	10	76.19	76.19

分析表1可知，使用本文方法计算的铁路网络数据传输节点能量时，仅在编码为2和7的节点时计算结果与节点实际能量结果存在差异，但差异数值仅为0.01，其计算精度高达99%。上述结果说明：本文方法计算铁路网络数据传输节点能量精度较好，能够为后续铁路网络数据低延时传输提供数据基础。

以铁路网络数据传输时的数据成功发送次数作为衡量本文方法通信传输性能指标，测试在数据包不同情况下，本文方法传输铁路网络数据包的成功发送情况，测试结果如表2所示。

表2 铁路网络数据包成功发送率

数据包个数/个	成功发送个数/个	成功发送率	数据包个数/个	成功发送个数/个	成功发送率
500	500	1	3 000	2 989	0.996 3
1 000	1 000	1	3 500	3 487	0.996 2
1 500	1 499	0.999 3	4 000	3 980	0.995 0
2 000	1 997	0.998 5	4 500	4 479	0.995 3
2 500	2 491	0.996 4	5 000	4 979	0.995 8

分析表2可知，本文方法传输铁路网络数据包时，其数据包成功发送个数与数据实际发送个数之间的差值随着发送数据包的个数逐渐增加，但增加幅度极为缓慢。当传输铁路网络数据包个数超过1 000个后，本文方法传输铁路网络数据包的成功发送率数值出现降低现象，但降低幅度极小。在发送数据包个数为5 000个时，本文方法传输铁路网络数据包的成功发送率依然高达0.995 8。上述结果说明：本文方法在传输铁路网络数据包时，其数据包成功发送率数值较高，传输数据包的安全性较好，不会出现数据包丢失情况。

验证本文方法传输铁路网络数据低时延能力，测试在传输不同数量数据包情况下，本文方法传输数据包的时延数值。为使实验结果更加充分，同时使用文献[5]方法和文献[6]方法展开实验。其中文献[5]方法为远程图像通信方法，文献[6]方法为波浪谱数据传输方法。实验结果如图5所示。

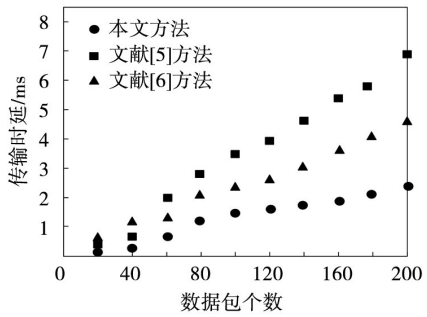


图5 铁路网络数据传输低时延性能验证结果

分析图5可知，本文方法传输铁路网络数据包时，其传输时延增加的幅度最为缓慢，说明在数据包个数相同情况下，本文方法传输铁路网络数据包的时延数值最低。随着铁路网络数据包个数持续增加，文献[5]方法和文献[6]方法在传输铁路网络数据包时的时延呈现略大幅度上升趋势。上述结果说明：本文方法传输铁路网络数据时延数值较小，具备较好的低时延能力，具备较为显著的应用效果。

3 结束语

本文研究基于北斗短报文的铁路通信网络数据低时延传输方法，在该方法中通过设计北斗短报文通信协议、铁路通信主站的通信协议等，实现铁路通信网络采集和传输数据之间的网络节点接收，并以计算铁路通信网络节点能耗的方法，优化铁路通信网络节点传输数据时的能量，实现铁路通信网络数据低时延。

参考文献：

[1] 李志炜，傅军，刘李欢，等. 基于北斗短报文的远程图像通信系统设计[J]. 导航定位与授时，2019，6(6)：119-123.

[2] 闫伟，徐浪，申滨. 基于数据分类和最小时延的LWA网络流量控制算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版)，2021，33(1)：18-27.

[3] 张拥军. 基于CAN总线的车载网络通信系统设计与实现[J]. 微型电脑应用，2022，38(12)：196-198.

[4] 张锁平，邓卓雅，张维星，等. 基于北斗短报文通信的波浪谱数据传输方法[J]. 广东海洋大学学报，2022，42(6)：137-142.

[5] 张涛，张晶，陈凯，等. 基于LoRa节点协作的低延迟数据传输方法[J]. 西北大学学报(自然科学版)，2019，49(1)：88-92.

[6] 刘彦，刘云玉. 时延可容忍数据传输效率实时优化方法仿真[J]. 计算机仿真，2019，36(11)：163-166.

[7] 慕健，高强，朱建启. 基于车载自组织网络的紧急报文传输方法[J]. 计算机应用研究，2019，36(4)：1200-1203，1208.

[8] 冀常鹏，李超，冀雯馨. 基于邻居表的msstatePAN路由改进算法[J]. 激光与光电子学进展，2021，58(5)：104-110.

作者简介：朱德华(1983—)，男，本科，工程师，研究方向：铁道通信信号。