

# 单边半字节通讯信号的电磁辐射抑制方法

张志辉, 刘明, 秦金龙, 陈磊

中国汽车工程研究院股份有限公司环保与健康测评研究中心, 重庆

收稿日期: 2023年1月29日; 录用日期: 2023年2月28日; 发布日期: 2023年3月8日

## 摘要

为了降低单边半字节通讯信号的电磁辐射, 本文对该类型通讯信号的电磁辐射抑制方法进行研究。通过分析满足该通讯协议时间要求的不同脉冲波形频谱, 结果表明: 梯形脉冲相比三角脉冲与抛物线脉冲有较低的电磁辐射。对梯形脉冲进行贝塞尔滤波, 将多个滤波后的脉冲进行组合, 可构建低电磁辐射的SENT输出信号。本文所提方法能够有效抑制单边半字节通讯信号的电磁辐射, 为汽车生产厂商抑制传感器信号电磁辐射以及满足辐射限值要求提供参考方法。

## 关键词

单边半字节通讯信号, 脉冲波形, 电磁辐射抑制, 频谱分析, 贝塞尔滤波

# Electromagnetic Radiation Suppression Method for Single Edge Nibble Transmission Signal

Zhihui Zhang, Ming Liu, Jinlong Qin, Lei Chen

Environmental Protection and Health Test Evaluation Research Center, China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing

Received: Jan. 29<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 28<sup>th</sup>, 2023; published: Mar. 8<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In order to reduce the electromagnetic radiation of the Single Edge Nibble Transmission (SENT) signal, this paper studies the electromagnetic radiation suppression method for the SENT signal. By analyzing the spectrum of different pulse waveforms that meet the time requirements of the protocol, the results show that the trapezoidal pulse has better electromagnetic radiation performance than the triangular pulse and the parabolic pulse. The SENT output signal of low electromagnetic radia-

tion can be constructed by combining multiple filtered pulses through Bessel filtering of trapezoidal. In this paper, the proposed method can effectively suppress the electromagnetic radiation of the SENT signal and provides a reference method for automobile manufacturers to suppress the electromagnetic radiation of the SENT signal and meet the radiation limit requirements.

## Keywords

Single Edge Nibble Transmission Signal, Pulse Waveform, Electromagnetic Radiation Suppression, Spectrum Analysis, Bessel Filtering

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

SENT 通讯协议首先由通用公司制定, 因其经济、可靠、精度高等特性, 一些公司在动力系统中逐渐采用该标准, 后期逐步发展成为 SAE J2716 标准。国六排放标准实施以来, 越来越多的汽车生产厂商为整车增加了基于 SENT 协议的传感器。SENT 通讯仅需要一条物理线束即可完成传输, 可一定程度上节约线束的成本, 但单线传输相比其他双线差分传输通讯, 比如 CAN 通讯等, 势必会产生更强的电磁辐射[1]。SENT 通讯信号应满足电磁辐射标准限值要求, 尽可能减少对整车控制器以及整车通讯的电磁干扰, 而目前国内尚未有关于 SENT 通讯信号电磁辐射以及其辐射抑制方法的研究。本文分析了不同脉冲波形频谱, 得出辐射较低的脉冲波形, 并通过滤波技术, 进一步抑制脉冲信号的电磁辐射, 为汽车生产厂商抑制 SENT 通讯信号电磁辐射提供参考方法。

## 2. SENT 通讯协议介绍

SENT 通讯协议是一种单向传输协议, 其仅限于点对点的信息交互, 可将传感器搜集的信息精确地传输给需求控制单元[2]。SENT 通讯信号具有经济、可靠以及高精度等优点, 其通过两个下降沿周期之间的一系列脉冲序列来传输信息[3] [4]。

### 2.1. SENT 通讯协议信号组成

SENT 通讯协议的数据使用半个字节(Nibble), 即 4 个比特(bit)来进行编码定义的, 一个 Nibble 是通过脉冲相邻两个下降沿之间的时间差来定义的。时间差由时钟节拍(Clock Tick Time)来定义, 时钟节拍是构建 SENT 信号的基本时间单位, SAE 2716 中规定时钟节拍范围为 3~90  $\mu\text{s}$ 。

一条标准的 SENT 通讯报文由同步标志脉冲、状态标志脉冲、数据脉冲、校验脉冲、停止脉冲五部分组成, 完整 SENT 通讯报文, 如图 1 所示。

### 2.2. SENT 通讯协议时间要求

SAE 2716 标准定义的 SENT 通讯协议关键时间要求, 如表 1 所示。

### 2.3. SENT 通讯电磁辐射限值要求

装配有 SENT 通讯的传感器, 均应满足一定的电磁辐射限值要求。SENT 通讯是单线传输(相比 CAN 等双线传输总线通讯), 且有相对高的传输速率(相比 LIN 总线通信), 那么 SENT 通讯必然会有更强电磁

辐射。IEC 61967-4:2021《集成电路电磁发射测量第4部分：传导发射测量 1 Ω/150 Ω 直接耦合法》定义了集成电路 150 kHz~1 GHz 频率范围内的电磁场辐射测试方法[5]。目前，国内尚无集成电路级别电磁辐射标准，且 SENT 通讯信号接口频率集中在 150~300 kHz，因此，本文采用 IEC 61967-4 定义的测试方法，辐射限值定为 42 dBμV。

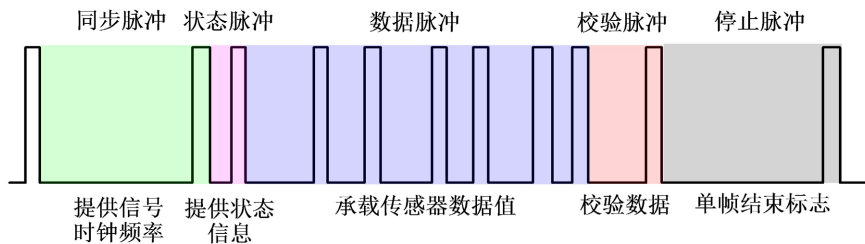


Figure 1. Complete message of the SENT signal  
图 1. SENT 信号完整报文

Table 1. Key timing requirements  
表 1. 关键时间要求

参数	定义符号	值
脉冲最大下降沿时间/μs	$T_{FALL}$	6.5
脉冲最大上升沿时间/μs	$T_{RISE}$	18
信号高或低电平最小稳定时间/μs	$T_{STABLE}$	6
时钟节拍周期/μs	$T_{TICK}$	3~90

### 3. 不同波形脉冲频谱分析

SENT 信号的脉冲应满足 SENT 通讯协议的时间要求。通过可编程任意波发生器，产生满足协议时间要求的不同脉冲波形[6]。通本对不同脉冲波形的频谱分析可知，虽然梯形脉冲的电磁辐射要低于其他波形脉冲，但其辐射接近 42 dBμV 限值要求。本章节研究的脉冲为：三角波脉冲、抛物线脉冲、梯形波脉冲。

#### 3.1. 信号频谱分析原理

假设一个信号  $sp(t)$  由脉冲波形相同，时移的脉冲  $s(t)$  组成，如图 2 所示。

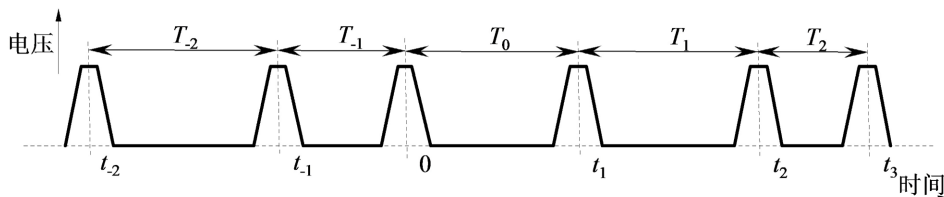


Figure 2. Pulse signal with an arbitrary period  
图 2. 任意周期脉冲信号

那么，信号  $sp(t)$  可以表示时移脉冲  $s(t)$  之和，即：

$$sp(t) = \sum_k s(t - t_k) \tag{1}$$

式(1)中,  $t_k$  为第  $k$  个脉冲的时间。

信号  $sp(t)$  的频谱函数可以表示为:

$$\begin{aligned} F_p(\omega) &= 1 / \sum_k T_k \cdot \sum_k \int_{t_k}^{t_k+T_k} s(t-t_k) \cdot e^{-j\omega t} dt \\ &= \sum_k e^{-j\omega t_k} / \sum_k T_k \cdot \int_0^{T_k} s(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \\ &= F(\omega) \cdot \sum_k e^{-j\omega t_k} / \sum_k T_k \end{aligned} \tag{2}$$

式(2)中,  $F(\omega)$  为单个脉冲的频谱函数。  $T_k$  为信号中单个脉冲的周期, 如图 2 所示。

第  $k$  个脉冲的时间可表示为:

$$t_k = k \cdot T_{AVG} + \Delta t_k \tag{3}$$

式(3)中,  $T_{AVG}$  为脉冲平均周期。  $\Delta t_k$  为第  $k$  个脉冲的时间偏差。

对于周期性信号, 假定有  $N$  个脉冲, 周期为  $T$ ,  $\Delta t_k = 0$ , 结合式(3), 式(2)可以改写为:

$$\begin{aligned} F_p(\omega) &= F(\omega) / (N \cdot T) \cdot \sum_{k=0}^{N/2} (e^{-j\omega kT} + e^{j\omega kT}) \\ &= F(\omega) / (N \cdot T) \cdot 2 \sum_{k=0}^{N/2} \cos(\omega kT) \\ &= F(\omega) / T \cdot \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - k/T) \end{aligned} \tag{4}$$

式(4)中,  $\delta()$  为狄拉克函数,  $N \rightarrow \infty$ 。

对于非周期性信号, 式(2)可以改写为:

$$F_p(\omega) = F(\omega) / (N \cdot T_{AVG}) \cdot \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} e^{-j\omega(kT_{AVG} + \Delta t_k)} \tag{5}$$

由式(5)可知, 在给定频率  $\omega$  时,  $F_p(\omega)$  是基于变量  $\Delta t_k$  的函数, 但由于指复数函数之和一定小于  $N$ , 那么, 基于式(5)可得出:

$$|F_p(\omega)| \leq |F(\omega)| / T_{AVG} \tag{6}$$

基于式(4)、式(6)可知, 在一定的频率  $\omega$  下, 信号  $sp(t)$  的最大频谱幅度总是小于单个脉冲  $s(t)$  频谱幅度与信号周期的比值, 因此, 通过分析单个信号脉冲的频谱函数足够表示整个信号频谱幅度的大小。单个 SENT 信号脉冲频谱与 SENT 信号的频谱对比, 如图 3 所示。

### 3.2. 不同波形脉冲频谱分析

在之前的章节中, SENT 信号的脉冲一应满足通讯协议的时间要求, 其中, 脉冲下降沿时间  $T_{FALL}$  因小于  $6.5 \mu s$ , 脉冲下降沿时间  $T_{RISE}$  因小于  $18 \mu s$ , 信号高或低电平稳定时间  $T_{STABLE}$  因小于  $6 \mu s$ 。满足时间要求的 SENT 脉冲, 如图 4 所示。基于 SENT 平均脉冲周期计算出的频谱幅度水平, 如图 5 所示。

由图 5 可知, 矩形波脉冲辐射和抛物线脉冲辐射均超出  $42 \text{ dB}\mu\text{V}$  ( $150\sim 300 \text{ kHz}$ ) 限值要求。梯形波脉冲相比其他两种波形辐射表现较好, 未超辐射限值, 但接近限值(图中斜线区域为限值区域)。

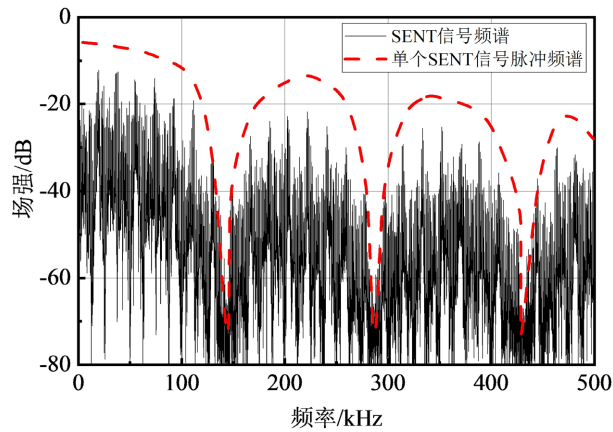


Figure 3. Frequency spectrum of the single SENT pulse and the SENT signal

图 3. 单个 SENT 脉冲和 SENT 信号的频谱

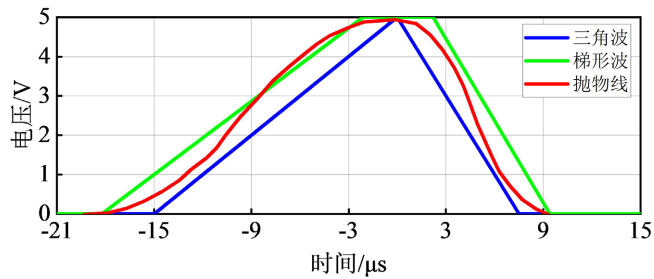


Figure 4. Pulse waveform

图 4. 脉冲波形

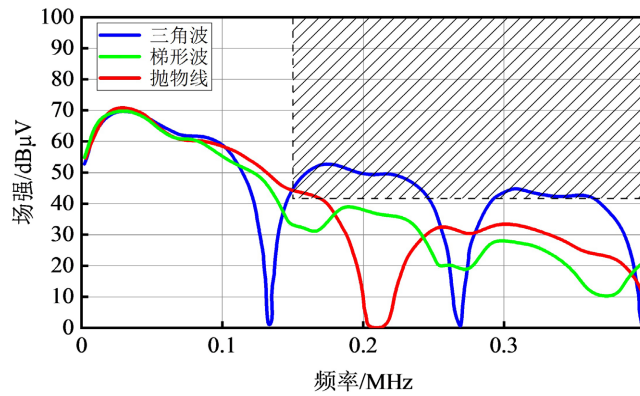


Figure 5. Pulse field strength

图 5. 脉冲场强

## 4. 基于滤波技术辐射抑制方法

### 4.1. 滤波原理

由上章节可知，梯形波脉冲辐射满足辐射值要求，但接近限值。为了使脉冲在辐射限值下有更多的余量，通过低通滤波技术，进一步降低脉冲在 150 kHz 后的频谱幅度。

贝塞尔滤波器是具有最大平坦的群延时的线性滤波器，在整个通带内具有恒定的群延时，所以在通

带上保持了被过滤的信号波形[7] [8]。因此,采用 5 阶贝塞尔滤波器进行低通滤波。同时,为了保证频谱幅度在 150 kHz 附近不超限值,将低通滤波截止频率定为 130 kHz。

输入的数字信号  $D(t)$  可以表示为:

$$D(t) = \sum_m \sigma r(t - T_{r_m}) + \sum_m \sigma f(t - T_{f_m}) \quad (7)$$

式(7)中,  $\sigma r(t)$  表示单个脉冲上升沿的瞬变函数,  $\sigma f(t)$  表示单个脉冲下降沿的瞬变函数,  $T_{r_m}$  表示第  $m$  个脉冲上升沿时间,  $T_{f_m}$  表示第  $m$  个脉冲下降沿时间。

函数  $\sigma r(t)$  与  $\sigma f(t)$  的幅度进行了归一化,其范围在(0, 1)。信号  $D(t)$  的低通滤波后的函数可表示为:

$$D_{\text{LPF}}(t) = F^{-1}(F(D(t)) \cdot S_{\text{LPF}}(\omega)) \quad (8)$$

式(8)中,  $F()$  表示傅里叶变换,  $F^{-1}()$  表示逆傅里叶变换,  $S_{\text{LPF}}(\omega)$  表示低通滤波函数。

由于傅里叶变换与其逆变换均为线性[9],结合式(7)和式(8),可得:

$$D_{\text{LPF}}(t) = \sum_m F^{-1}(F(\sigma r(t - T_{r_m})) \cdot S_{\text{LPF}}(\omega)) + \sum_m F^{-1}(F(\sigma f(t - T_{f_m})) \cdot S_{\text{LPF}}(\omega)) \quad (9)$$

$$D_{\text{LPF}}(t) = \sum_m M_r(t - T_{r_m}) + \sum_m M_f(t - T_{f_m}) \quad (10)$$

式(10)中,  $M_r(t)$  表示单个脉冲上升沿滤波输出函数,  $M_f(t)$  表示单个脉冲下降沿滤波输出函数。由式(10)可知,滤波后的输出函数  $D_{\text{LPF}}(t)$  为上升沿函数以及下降沿滤波后的函数之和。

在 SENT 通讯协议中定义,脉冲上升沿与下降沿之间的时间之差  $\Delta T_p$  是固定值,那么,单个脉冲函数可表示为:

$$\sigma(t - T_{r_m}) = \sigma r(t - T_{r_m}) + \sigma f(t - T_{r_m} - \Delta T_p) \quad (11)$$

结合式(11),式(10)可以改写为:

$$D_{\text{LPF}}(t) = \sum_m F^{-1}(F(\sigma(t - T_{r_m})) \cdot S_{\text{LPF}}(\omega)) = \sum_m M_p(t - T_{r_m}) \quad (12)$$

式(12)中,函数  $M_p(t)$  表示单个脉冲滤波后的输出函数。

由式(12)可知,滤波后信号的输出函数可以表示为单个脉冲滤波后输出函数之和。而单个脉冲滤波后,输出函数可以通过存储在存储器的离散样本函数  $M_{ps}(n)$  重新计算、采样、构建,其中,  $n$  为样本函数的时序[10] [11] [12]。通过控制存储设备可知时序  $n$  对应的的时间  $T_{\text{resp}}$ 。存储的离散 SENT 信号单个脉冲,如图 6 所示。

通过多个离散 SENT 信号脉冲可构建完整 SENT 滤波输出信号,输出信号进行数模转换就得到需求的 SENT 信号。

滤波后的信号会在某些部位出现“振铃”现象,如图 6 所示。经过测试,“振铃”现象并未影响信号模数转换的 Nibble 值,信号完全满足 SENT 通讯协议标准的要求。

## 4.2. 滤波结果测试

如图 7 所示,为前述所得的 SENT 信号。相应的频谱测试结果,如图 8 所示。信号的频谱完全满足在 150 kHz 的 42 dB $\mu$ V 限值要求,且结果离限值有很大余量。

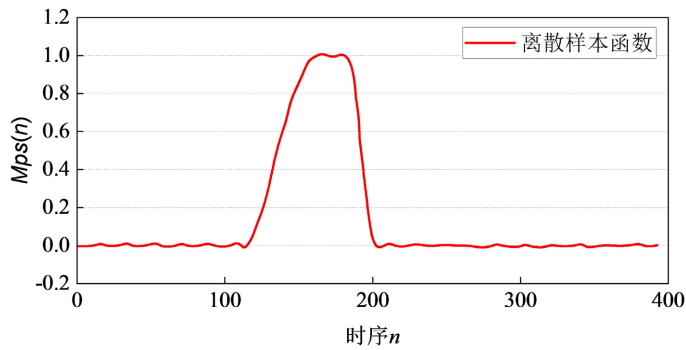


Figure 6. Discrete sample function curve

图 6. 离散样本函数曲线

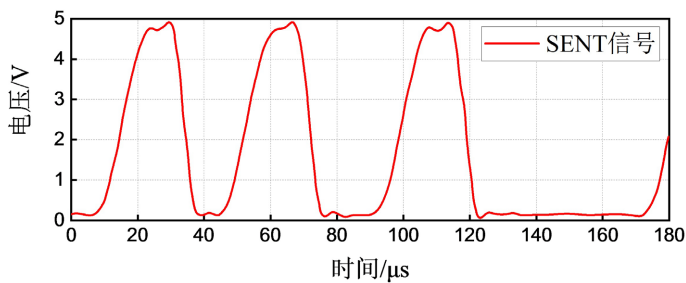


Figure 7. Waveform of the SENT signal

图 7. SENT 信号波形

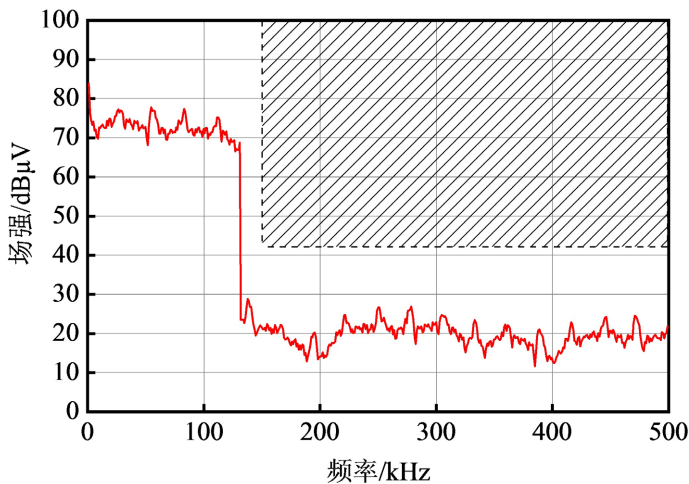


Figure 8. The field strength of the SENT signal after filtering

图 8. 滤波后 SENT 信号场强

## 5. 结论

通过对比不同脉冲波形电磁辐射, 结果表明, 梯形脉冲相比三角脉冲与抛物线脉冲有更好的电磁辐射表现。通过对梯形脉冲进行 5 阶贝塞尔滤波, 进一步降低 SENT 脉冲信号电磁辐射。测试结果表明, 在多个滤波后, 脉冲组成的 SENT 信号电磁辐射均满足在 150 kHz 后的限值要求, 且有更多余量。本文所提方法可有效抑制 SENT 信号电磁辐射, 为汽车生产厂商抑制信号电磁辐射提供参考。



## 参考文献

- [1] 涂金林. 电动汽车 CAN 网络系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [2] 周振齐. 车载 SENT 协议解码方法[J]. 中国集成电路, 2019, 26(239): 51-52.
- [3] 黄鹏, 杜克奎, 荣锋, 等. 基于自适应 SENT 协议的电机控制系统设计[J]. 天津工业大学学报, 2016, 35(2): 84-87.
- [4] 马楠, 吴长坤. 基于 SENT 协议的有刷直流电机控制系统设计[J]. 计算机工程与应用, 2015(51): 275-278.
- [5] 贾云霞, 王文杰, 白云, 等. IEC 61967 系列集成电路传导发射测试方法分析[J]. 汽车电气, 2021(9): 69-71.
- [6] 薛刚. 基于 DDS 技术的任意波发生器[J]. 自动化与仪器仪表, 1998(3): 58-60.
- [7] 苗汇静, 谭博学, 徐秀美, 等. 8 阶贝塞尔低通滤波器精确设计及应用[J]. 集成电路应用, 2012, 38(7): 68-71.
- [8] 刘国奇, 李晨静. 基于贝塞尔滤波改进的测地活动轮廓图像分割模型[J]. 计算机应用, 2017, 37(12): 3536-3540+3562.
- [9] 李社蕾, 杨博雄, 陆娇娇. 谱图傅里叶变换与谱图小波变换基分析研究[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(5): 85-89.
- [10] 杨毅明. 数字信号处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 5-8.
- [11] 李明生. 电子测量与仪器[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 62-67.
- [12] 赵尔沅, 周利清, 张延平. 数字信号处理实用教程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999: 23-26.