

数字核脉冲信号高斯成形方法实现与对比分析

李卓岱^{1,2} 张怀强^{1,2} 刘进洋² 颜苗苗²

1(东华理工大学 核技术应用教育部工程研究中心 南昌 330013)

2(东华理工大学 核科学与工程学院 南昌 330013)

摘要 数字核脉冲信号的高斯成形,由于其实现简单、综合性能良好被广泛应用于数字核谱仪系统中。本文从 Sallen-Key 与 CR-RC^m 电路的工作原理出发,推导了基于数字 Sallen-Key 与数字 CR-RC^m 在时域中的高斯成形递推函数,分别获取 Z 域中的传递函数,并对其幅频响应进行了分析。对实际采样核脉冲信号,分别采用数字 Sallen-Key 与数字 CR-RC^m 的递推函数实现了其高斯成形,随着成形参数的增加,成形结果越趋近于高斯形,成形脉冲也越宽。基于 Si-PIN 探测器测量 ⁵⁵Fe 射线源,获取不同高斯成形方法、不同成形参数下的能谱,结果表明:数字 Sallen-Key 表现出更好的能量分辨率性能,而数字 CR-RC^m 表现出更好的计数率性能。

关键词 数字核脉冲信号, 高斯成形, 数字 Sallen-Key, CR-RC^m, 能量分辨率

中图分类号 TL817

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060403

Implementation and analysis of Gaussian shaping method for digital nuclear pulse signal

LI Zhuodai^{1,2} ZHANG Huaiqiang^{1,2} LIU Jinyang² YAN Miaomiao²

1(Engineering Research Center of Nuclear Technology Application, East China University of Technology, Ministry of Education, Nanchang 330013, China)

2(School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract [Background] Gaussian shaping of digital nuclear pulse signals has been widely used in digital nuclear spectrometer systems due to its easy realization and good performance. [Purpose] This study aims to implement and analyze Gaussian shaping method for digital nuclear pulse signal, digital Sallen-Key and digital CR-RC^m. [Methods] Based on the working principle of Sallen-Key and CR-RC^m circuit, the Gaussian shaping recursive function was derived by digital technology. The transfer function in Z domain was obtained and its amplitude-frequency response was analyzed. Gaussian shaper was implemented by using the recursive function of digital Sallen-Key and digital CR-RC^m for the actual sampled nuclear pulse signal. Finally, based on the signal obtained by Si-PIN detector measuring ⁵⁵Fe source, energy spectra using different Gaussian shaping methods and various shaping parameters were obtained. [Results] Comparisons of energy spectra shows that the shaping results tend to be Gauss distribution with the increase of shaping parameters, and the shaping pulse becomes wider. [Conclusion] The digital Sallen-Key exhibits better energy resolution performance whilst the digital CR-RC^m exhibits better count rate performance.

国家自然科学基金(No.11665001、No.41864007)、国家留学基金委项目(No.201708360170)、江西省“百人远航工程”项目

第一作者: 李卓岱, 男, 1996年出生, 2017年毕业于华北水利水电大学核工程与核技术专业, 现为硕士研究生, 主要从事核探测技术与核仪器研究

通信作者: 张怀强, E-mail: zhanghq821@163.com

收稿日期: 2019-02-23, 修回日期: 2019-03-06

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11665001, No.41864007), China Scholarship Council (No.201708360170), One Hundred People Sail in Jiangxi Province

First author: LI Zhuodai, male, born in 1996, graduated from North China University of Water Resources and Electric Power in 2017, major in nuclear engineering and nuclear technology, master student, focusing on nuclear detection technology and nuclear instruments

Corresponding author: ZHANG Huaiqiang, E-mail: zhanghq821@163.com

Received date: 2019-02-23, revised date: 2019-03-06

Key words Nuclear pulse signal, Gaussian shaping, Digital Sallen-Key, CR-RC^m, Energy resolution

在传统的模拟核能谱测量系统中,主要以Sallen-Key或是CR-RC^m电路实现核脉冲信号的高斯成形,通过改变核脉冲信号的形状与幅度,提高系统信噪比^[1-4]。而数字核能谱测量系统中,对数字核脉冲信号的成形方法研究与技术改进一直作为热点研究问题。文献[5-6]基于数字CR-RC^m推导了高斯成形数值递推函数,并基于此函数实现了数字核脉冲信号的高斯成形。文献[7-15]基于数字Sallen-Key实现了单指数信号、双指数信号的高斯成形,推导了其在时域、Z域中的传递函数。本文在上述文献基础之上,分别对数字Sallen-Key与数字CR-RC^m的高斯成形递推函数的幅频响应进行分析,对实际采样的核脉冲信号实现了高斯成形处理,并对主要性能指标进行了对比分析。

1 高斯成形原理

1.1 数字Sallen-Key成形

Sallen-Key滤波器是一种二阶有源积分滤波电路,其原理图如图1所示。

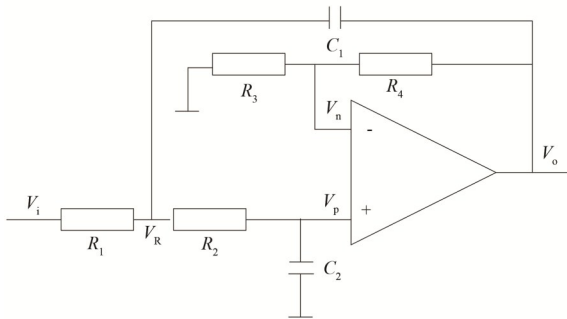


图1 Sallen-Key滤波电路原理图

Fig.1 Schematic diagram of Sallen-Key filter circuit

根据基尔霍夫电流定律,建立的Sallen-Key滤波器电流等式如式(1)所示^[7]。

$$\begin{cases} V_n = V_p \\ \frac{V_i - V_R}{R_1} = \frac{d(V_R - V_o)}{dt} \cdot C_1 + \frac{V_R - V_p}{R_2} \\ \frac{V_R - V_p}{R_2} = \frac{dV_p}{dt} \cdot C_2 \\ V_n = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot V_o \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_R 、 V_n 、 V_p 、 V_i 与 V_o 分别为对应节点电压,令 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, $C_1 = C_2 = C$,对式(1)进行变化可得式(2):

$$2V_i = (RC)^2 \frac{d(dV_o/dt)}{dt} + RC \frac{dV_o}{dt} + V_o \quad (2)$$

令 $a = RC/dt$,对式(2)进行变化可得:

$$V_o[n] = \frac{(2a^2 + a) \cdot V_o[n-1] - a^2 V_o[n-2] + 2V_i[n]}{a^2 + a + 1} \quad (3)$$

式(3)的传输函数为:

$$H(z) = \frac{2}{(az^{-1} - 1)^2 + a(1 - z^{-1}) + 1} \quad (4)$$

将 $z = e^{j\omega}$ 带入式(4),则频率响应函数的模为:

$$|H(e^{j\omega})| = 2 \cdot \sqrt{\frac{(1 + 2a + 4a^2 + 6a^3 + 6a^4 - \dots)}{2a(1 + 3a + 4a^2 + 4a^3) \cdot \cos\omega + \dots}} \cdot \frac{1}{2a^2(1 + a + a^2) \cdot \cos 2\omega} \quad (5)$$

当 $a=30$ 、 $a=50$ 、 $a=70$ 时,幅频响应如图2所示。

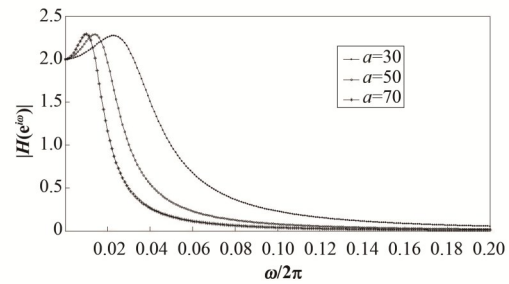


图2 Sallen-Key滤波器(不同a值)频率响应曲线

Fig.2 Frequency response curve of Sallen-Key filter (different a)

如图2所示,数字化Sallen-Key滤波器的频率响应曲线具有低通滤波器的特征。且 a 越小,频带越宽。

1.2 数字CR-RC^m成形

CR-RC^m滤波成形电路如图3所示, V_{in} 为输入信号,CR组成微分电路(高通滤波电路),RC组成积分电路(低通滤波电路), V_{out} 为输出电路。

1)对于CR微分电路,根据基尔霍夫电流定律可以列出式(6)的微分方程^[6]。

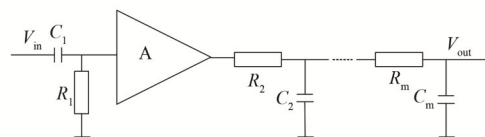


图3 CR-RC^m滤波电路图

Fig.3 Scheme of CR-RC^m filter circuit

$$\frac{dV_i(t)}{dt} = \frac{V_o(t)}{CR} + \frac{dV_o(t)}{dt} \quad (6)$$

式中： $V_i(t)$ 为CR电路的输入信号； $V_o(t)$ 为CR电路的输出信号。式(6)中将 $V_i(t)$ 转换成数字序列 $V_i[n]$ ， $V_o(t)$ 转换成数字序列 $V_o[n]$ ，推导可得到式(7)所示的数值递推算式， $k=RC/(RC+T)$ ， T 为ADC的采样周期。

$$V_o[n] = k(V_i[n] - V_i[n-1]) + k \cdot V_o[n-1] \quad (7)$$

式(7)的传递函数为：

$$H_1(z) = k \frac{1 - z^{-1}}{1 - k \cdot z^{-1}} \quad (8)$$

将 $z = e^{j\omega}$ 带入式(8)，则频率响应函数的模为：

$$|H_1(e^{j\omega})| = k \frac{\sqrt{2 - 2\cos\omega}}{\sqrt{1 + k^2 - 2k \cdot \cos\omega}} \quad (9)$$

2)对于RC积分电路，可推出其数值递推算式、传输函数与频率响应函数的模分别如式(10)~(12)所示^[6]。

$$V_o[n] = (1 - k) \cdot V_i[n] + k \cdot V_o[n-1] \quad (10)$$

$$H_2(z) = \frac{1 - k}{1 - k \cdot z^{-1}} \quad (11)$$

$$|H_2(e^{j\omega})| = \frac{1 - k}{\sqrt{1 + k^2 - 2k \cdot \cos\omega}} \quad (12)$$

基于数字CR-RC^m的模为：

$$|H(e^{j\omega})| = \frac{(1 - k)^m \cdot k \cdot \sqrt{2 - 2\cos\omega}}{(\sqrt{1 + k^2 - 2k \cdot \cos\omega})^{(m+1)}} \quad (13)$$

当 $m=3$ 、 $k=0.91$ 、 $k=0.95$ 、 $k=0.98$ 时的频率响应曲线如图4所示。

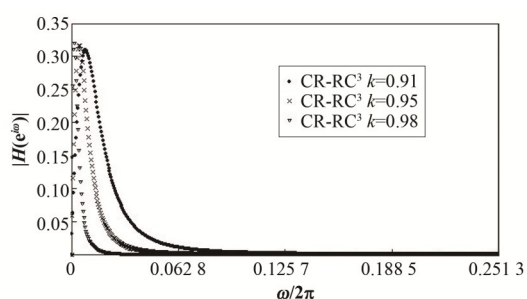


图4 CR-RC³滤波器(不同 k 值)频率响应曲线
Fig.4 Frequency response curve of CR-RC³ filter (different k)

如图4所示，数字化CR-RC^m滤波器的频率响应曲线具有通带滤波器的特征。其中 m 和 k 均可以调节滤波器的通带区域，且 k 越大，通带区越窄。

2 高斯成形实现

为了对数字核脉冲信号的高斯成形方法与性能

进行研究，系统以美国Moxtek公司的XPIN-XT型Si-PIN探测器，测量⁵⁵Fe，模/数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)选用美国ADI公司的AD9224，信号调理模块包括一级CR微分电路与两级线性放大组成，在具体设计中 $C=3\ 300\ \text{pF}$ ， $R=3\ 000\ \Omega$ ，则 $\tau=RC=9.9\ \mu\text{s}$ ，线性放大倍数为10~30可调，ADC采样率为40 MHz下，获取的核脉冲信号如图5所示。

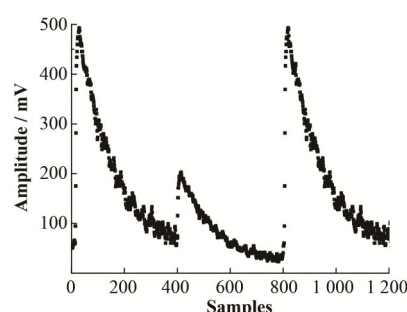


图5 探测器输出信号采样
Fig.5 Detector output signal sampling

采用数字CR-RC^m成形，对原始采样核信号，当 $m=3$ 、 $k=0.91$ 、 $k=0.95$ 、 $k=0.98$ 时，成形结果如图6所示。

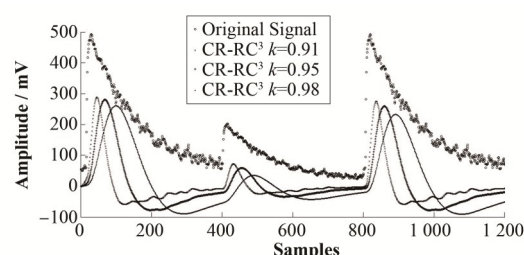


图6 数字CR-RC^m成形输出
Fig.6 Output of digital CR-RC^m shaper

从图6可以看出，随着 k 值的增加，成形输出越趋近于高斯形，脉冲幅度越小，脉冲宽度越宽，由于前端输入信号为负指数信号，通过一级CR微分成形后，输出有过零点的下冲信号，当存在脉冲堆积的情况时，后一个脉冲幅度受过零点下冲信号的影响，可引入文献[16]中的数字极零相消算法。

采用数字Sallen-Key成形，对实际采样核信号，当 $a=30$ 、 $a=50$ 、 $a=70$ 时，成形结果如图7所示。

从图7可以看出，随着参数 a 的增加，成形输出的幅度越小，脉冲越宽，成形输出结果与理论研究一致。

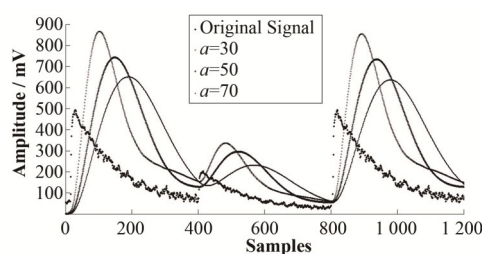


图7 数字 Sallen-Key 成形输出
Fig.7 Output of digital Sallen-Key shaper

3 系统测试

采用美国 Moxtek 公司的 XPIN-XT 型 Si-PIN 探测器, 测量 ^{55}Fe , ADC 采样频率为 40 MHz, 分别采用数字 Sallen-Key 与数字 CR-RC^m 高斯成形处理后, 得到的能谱如图 8 所示, 对能量分辨率与计数率性能进行测试, 得到表 1 所示的结果。

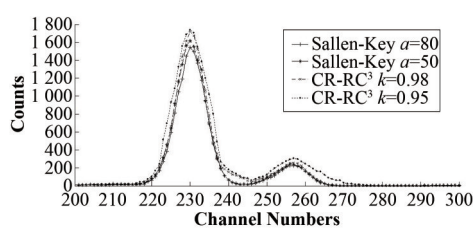


图8 不同成形方法与成形参数下的能谱图
Fig.8 Energy spectra of different methods and various parameters

表1 能量分辨率与计数性能比较

Table 1 Performance comparison of energy resolution and counts

成形条件 Shaping conditions	能量分辨率 Energy resolution ^{55}Fe 5.9 keV	测量面积 时间 600 s Measured area time 600 s
Sallen-Key $a=80$	176 eV	14 375
Sallen-Key $a=50$	182 eV	15 717
CR-RC ³ $k=0.98$	185 eV	16 833
CR-RC ³ $k=0.95$	190 eV	17 780

注: 上述的峰面积为 5.9 keV 峰

Note: The above peak area of 5.9 keV

如表 1 所示, 对于数字 Sallen-Key 高斯成形, 随着成形参数 a 的增加, 能量分辨率越高, 计数率降低, 当 $a=80$ 时, 能量分辨率与峰面积分别为 176 eV 与 14 735, 当 $a=50$ 时, 能量分辨率与计数面积分别为 182 eV 与 15 717; 对于数字 CR-RC^m 高斯成形, 随着成形参数 k 的增加, 能量分辨率越高, 计数率降低, 当 $k=0.98$ 时, 能量分辨率与峰面积分别为 185 eV 与 16 833, 当 $k=0.95$ 时, 能量分辨率与计数面积分别

为 190 eV 与 17 780。

4 结语

基于 Sallen-Key 与 CR-RC^m 对的数字递推函数实现核脉冲信号的高斯成形处理, 从结果对比分析可知, 数字 Sallen-Key 的高斯成形处理在能量分辨率上表现出更好的性能, 数字 CR-RC^m 在计数率上表现出更好的性能, 同时由于 CR-RC^m 对于负指数信号进行高斯成形时, 存在过零点的下冲信号, 可以在实际应用中引入数字极零相消算法来消除下冲, 提高系统的能量分辨率, 对于两种高斯成形参数的最优化选取将在后续研究中进行分析与讨论。

参考文献

- 1 Evariste W T, Hong S U, Yi Q, *et al.* Design and simulation of Gaussian shaping amplifier made only with CMOS FET for FEE of particle detector[J]. Nuclear Science and Techniques, 2010, **21**(5): 312 – 315. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.21.312-315.
- 2 张怀强, 吴和喜, 宁洪涛. 基于 Multisim 的核信号仿真与高斯成形研究[J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(8): 845–848. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.08.023. ZHANG Huaiqiang, WU Hexi, NING Hongtao. Research on the simulation and Gaussian shaping of nuclear signal based on multisim software[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, **35**(8): 845 – 848. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.08.023.
- 3 林斯波, 葛愉成. 基于 Sallen-Key 滤波器的主成形放大电路的研究[J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(4): 408–410+416. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.04.022. LIN Sibao, GE Yucheng. Study of main shaping amplifier circuit based on Sallen-Key filter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, **35**(4): 408 – 410+416. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.04.022.
- 4 李东仓, 杨磊, 田勇, 等. 基于 Sallen-Key 滤波器的核脉冲成形电路研究[J]. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(3): 563–566. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2008.03.028. LI Dongcang, YANG Lei, TIAN Yong, *et al.* Study of a nuclear pulse shaped circuit base in Sallen-Key filter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28** (3): 563 – 566. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934.2008.03.028.
- 5 Nakhostin M. Recursive algorithms for real-time digital CR-(RC)ⁿ pulse shaping[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2011, **58**(5): 2378 – 2381. DOI: 10.1109/TNS.2011.2164556.

- 6 刘寅宇, 张京隆, 周荣, 等. CR-RC^m滤波器数字化研究[J]. 核技术, 2017, **40**(6): 060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.060403.
LIU Yinyu, ZHANG Jinglong, ZHOU Rong, *et al.* Digitalization of CR-RC^m filter[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(6):060403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.060403.
- 7 Zhou J B, Zhou W, Lei J R, *et al.* Study of time-domain digital pulse shaping algorithms for nuclear signals[J]. Nuclear Science and Techniques, 2012, **23**(3): 150–155. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.23.150-155.
- 8 Ge Q, Ge L Q, Yuan H W, *et al.* Anew digital Gaussian pulse shaping algorithm based on bilinear transformation[J]. Nuclear Science and Techniques, 2015, **26**(1): 010402. DOI:10.13538/j.1001-8042/nst.26.010402.
- 9 张怀强, 卢炜煌, 汤彬. 基于MATLAB的核脉冲信号数字成形实现与性能分析[J]. 核技术, 2018, **41**(10): 100401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100401.
ZHANG Huaiqiang, LU Weihuang, TANG Bin. Digital shaping and performance analysis of nuclear pulse signal based on MATLAB[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(10) : 100401. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.100401.
- 10 蒋开明, 黄洪全, 杨小峰, 等. 基于S-K数字成形和种群技术的脉冲参数提取方法[J]. 核电子学与探测技术, 2017, **37**(2): 121–124. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2017.02.003.
JIANG Kaiming, HUANG Hongquan, YANG Xiaofeng, *et al.* Pulse parameter extraction method based on S-K digital shaping and population technique[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2017, **37**(2): 121–124. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2017.02.003.
- 11 葛青, 葛良全, 李晓丽. 基于冲激响应不变法的核信号数字滤波成形算法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2014, **34**(7): 913–916. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.10.011.
GE Qing, GE Liangquan, LI Xiaoli. Research on digital shaping algorithm of the nuclear signal based on the same impulse response[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, **34**(7): 913–916. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2014.10.011.
- 12 洪旭, 倪师军, 周建斌, 等. 数字高斯脉冲成形算法仿真研究[J]. 核技术, 2016, **39**(11): 110403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110403.
HONG Xu, NI Shijun, ZHOU Jianbin, *et al.* Simulation study on Gaussian pulse shaping algorithm[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(11): 110403. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110403.
- 13 周伟, 周建斌, 雷家荣, 等. 基于Sallen-Key滤波器的数字高斯成形方法的仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, **25**(1): 195–196. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2013.01.021.
ZHOU Wei, ZHOU Jianbin, LEI Jiarong, *et al.* Simulation of digital gaussian filtering based on Sallen-Key filter[J]. Journal of System Simulation, 2013, **25**(1): 195–196. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2013.01.021.
- 14 周建斌, 王敏, 周伟, 等. 实时核信号数字化脉冲成形关键技术研究[J]. 原子能科学技术, 2014, **48**(2): 352–356. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.02.0352.
ZHOU Jianbin, WANG Min, ZHOU Wei, *et al.* Key technology research of nuclear signal digitized pulse shaping in real time[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2014, **48**(2): 352–356. DOI: 10.7538/yzk.2014.48.02.0352.
- 15 葛青, 葛良全, 薛雅娟. 基于IIR滤波器的核信号数字高斯成形方法[J]. 核电子学与探测技术, 2015, **35**(3): 223–225+234. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.03.001.
GE Qing, GE Liangquan, XUE Yajuan. Method of digital Gaussian shaper for nuclear signals based on IIR digital filter[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, **35**(3): 223–225+234. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2015.03.001.
- 16 Zhou J B, Hong X, Wang R B, *et al.* Study of recursive model for pole-zero cancellation circuit[J]. Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(1): 010403. DOI: 10.13538/j.1001-8042/nst.25.010403.