

电子器件噪声高斯性和线性的定量分析方法

李伟华¹, 庄奕琪¹, 杜磊², 包军林¹, 马中发¹

(1. 西安电子科技大学宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 基于高阶统计量理论, 采用双相干系数平方和对电子器件噪声进行了定量分析. 通过分析非线性非高斯信号、线性非高斯信号、非线性高斯信号、线性高斯信号, 给出噪声信号的线性与高斯性的定量判定标准. 将这种分析方法用于实验测量的电子器件噪声信号分析, 表明电子器件噪声中存在这4种类型的信号, 并可以用该方法进行有效区分. 研究结果为电子器件噪声非常规特性的分析提供了理论依据与定量判据.

关键词: 电子器件的噪声; 时间序列分析; 高阶统计量; 高斯性; 线性

中图分类号: TN386.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)06-1059-04

Quantitative analysis of noise's linearity and Gaussianity in electronic devices

LI Wei-hua¹, ZHUANG Yi-qi¹, DU Lei², BAO Jun-lin¹, MA Zhong-fa¹

(1. Ministry of Education Key Lab. of Wide Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. School of Technical Physics, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: A quantitative analysis method of noise's linearity and Gaussianity in electronic devices is deduced on the basis of the higher order statistics (HOS) theory, from which a parameter named the quadratic sum of the bicoherence is brought forward. Through the analysis of four types of noise signals, non-linear non-Gaussian noise, linear non-Gaussian noise, non-linear Gaussian noise, and linear Gaussian noise, a quantitative criterion for appraising the linearity and the Gaussianity of noise signals is presented. By applying this method to the analysis of real noise signals in electronic devices, it is proved that real noise signals could be clearly classified into the above-mentioned four types of noise. This work provides a theoretical basis and quantitative criterion for the analysis of noise's nonconventional characteristic in electronic devices.

Key Words: semiconductor devices noise; time series analysis; higher order statistics; Gaussianity; linearity

电子器件噪声广泛存在于电子系统、电路和器件中. 器件噪声决定着器件灵敏度和检测精度, 也是表征器件质量和可靠性的一个重要的敏感参数^[1]. 对器件噪声的分析多采用功率谱分析方法^[1], 它掩盖了噪声信号的时间信息, 不利于分析器件噪声的非高斯、非线性、非平稳等非常规特性. 随着亚 100nm MOSFET 工艺的实现及普及, 器件的低频噪声呈现出较为明显的非高斯、非线性等功率谱不能描述的特性^[2], 而在器件噪声的模型中也开始考虑噪声非高斯、非线性等特性产生的物理机制^[3-4].

目前, 对器件噪声非高斯性的分析有偏度分析、峰度分析、双谱分析等方法^[4], 对器件噪声非线性的分析有 DFA 分析^[5]、粗糙度分析^[6]、Hurst 指数分析^[7]等方法. 这些方法分别分析噪声信号的非高斯性和非线性, 而不能综合分析这些非常规特性, 故而不能综合描述器件噪声的特性. 目前通用的信号高斯性和线性的

收稿日期: 2008-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助(60676053)

作者简介: 李伟华(1978-), 男, 西安电子科技大学博士研究生, E-mail: fx2000_lwh@yahoo.com.cn.

综合分析方法惟有 Hinich 检验^[8]. 这一方法有明显的局限性,它只能判断信号的高斯性和非高斯性,并且仅能对非高斯信号判断其线性和非线性. 另外这种判别是一种定性分析,不能够定量刻画信号中高斯成分和线性成分的大小,不适于器件噪声的定量分析.

1 新分析方法

Hinich 提出了一种算法来检测信号的高斯性和线性^[8]. Hinich 对信号高斯性的检测严格地说是检测信号的零偏度性. Hinich 检验的思想如表 1 所示,它是一个两步检验,当信号为高斯性时,不再对其线性进行判断. Hinich 检验的流程图如图 1 所示,其中虚警概率(PFA)表示信号 x 是高斯分布,却接受 x 是非高斯分布的假设所承担的风险概率. 距离(R) 定义为 x 的平方双相干系数的 4 分位差的估计值和理论值的差值的绝对值. Hinich 检验是一种定性的分析,根据 PFA 值和 R 值的大小来判断信号的高斯性和线性.

表 1 Hinich 检验的思想

	双相干系数		信号类别	
第 1 步检验	零	非零	高斯	非高斯
第 2 步检验	非零常数	其他	线性非高斯	非线性非高斯

为了综合分析低频噪声的非高斯性与非线性,笔者采用如下的方法构建了其定量表征参量. 因为高斯过程的平方双相干系数是自由度为 2 的中心卡方分布,非高斯过程的平方双相干系数是自由度为 2 的非中心卡方分布,所以可以通过构建其双相干系数平方和 (S) 来完整刻画其非高斯性与非线性. 由此可以推断: 信号的线性高斯过程对应于 S 的低值,线性非高斯过程对应于 S 的高值,非线性高斯过程对应于 S 的中值,非线性非高斯过程对应于 S 的甚高值. 双相干系数平方和 S 的定义为

$$S = \sum_{\lambda_1=0}^{M/2} \sum_{\lambda_2=0}^{M/2} \frac{|\hat{B}(\lambda_1, \lambda_2)|^2}{\hat{P}(\lambda_1 + \lambda_2)\hat{P}(\lambda_1)\hat{P}(\lambda_2)}, \quad (1)$$

其中 M 是信号的长度; 参量 λ_1 和 λ_2 满足 $0 \leq \lambda_2 \leq \lambda_1, \lambda_1 + \lambda_2 \leq M/2$ 的关系; $\hat{B}(\lambda_1, \lambda_2)$ 是信号双谱的估计值; $\hat{P}(\lambda)$ 是信号功率谱的估计值.

双相干系数平方和 S 的计算流程如图 2 所示. 首先对待分析信号进行分段和去均值等预处理操作; 其次计算分段数据的 DFT 系数和功率谱以及 DFT 系数的三重相关; 然后得到信号双谱的估计和功率谱的估计; 最后根据式(1)得到双相干系数平方和.

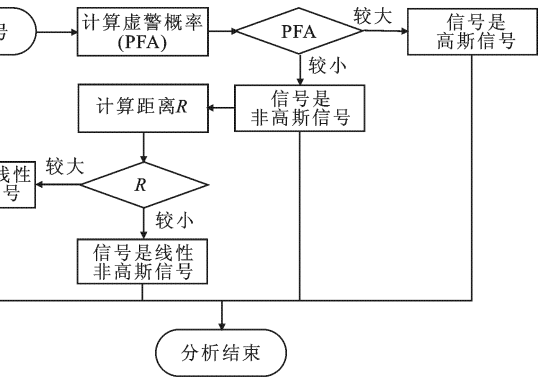


图 1 Hinich 检验的流程图

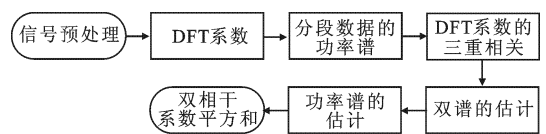


图 2 双相干系数平方和的计算流程图

大量研究表明电子器件中的噪声存在高斯、非高斯、线性、非线性等诸多特性^[2-4]. 为了更精确地区分具有不同特性噪声之间的差别,采用了双相干系数平方和 S 这一表征参量. 通过对已知特性的信号进行分析,验证了该参量的性能. 为此首先构造了高斯信号 u_1 和非高斯信号 u_0 ; 然后将其分别通过线性系统 $sLin$ 和非线性系统 $sNoLin$, 从而得到非线性非高斯信号 u_0NoLin 、线性非高斯信号 u_0Lin 、非线性高斯信号 u_1NoLin 、线性高斯信号 u_1Lin 这 4 类已知信号特性的随机信号^[8], 如表 2 所示. 其次分别计算每个信号的 S 值, 并与 Hinich 检验的结果相对照. 最终给出了依据 S 参数对器件噪声进行分类的定量标准, 建立了电子器件噪声高斯性和线性的定量分析方法.

因为高斯白噪声广泛存在于电子器件噪声中,故而以高斯分布的随机信号作为 u_1 . 因为 Hinich 检验和 S 参数对信号高斯性的检测严格地说是检测信号的零偏度性,在常用的基本随机信号中,指数分布的随机信号是一种比较典型的有偏分布的随机信号,故选择指数分布的随机信号作为 u_0 .

为了使分析问题简化,选取了简单且有代表性的线性系统和非线性系统^[8]. 其中,线性系统 $sLin$ 的定

义为

$$y(n) = -0.7y(n-1) + 0.1y(n-2) + x(n) \quad (2)$$

非线性系统 sNoLin 的定义为

$$y(n) = x^3(n) \quad (3)$$

表 2 4 类典型模拟噪声信号的构造

输入信号		系统		输出信号	
名称	类别	名称	类别	名称	类别
u_0 (指数分布的随机信号)	线性非高斯	sNoLin	非线性系统	u_0 NoLin	非线性非高斯
		sLin	线性系统	u_0 Lin	线性非高斯
u_1 (高斯分布的随机信号)	线性高斯	sNoLin	非线性系统	u_1 NoLin	非线性高斯
		sLin	线性系统	u_1 Lin	线性高斯

为了更清楚地反映 S 参量对不同特性噪声区分的效果,将这 4 个信号顺次两两叠加.按照图 1 中的流程计算 S 值和 R 值,按照图 2 中的流程计算 PFA 值,结果如图 3 所示.例如在图 3 的区间 1 内,将 u_0 NoLin 定义为信号,将 u_0 Lin 定义为噪声,按照相应的信噪比进行时域叠加得到各混合信号.信噪比从 40 dB 开始,以 10 dB 为间隔,降到 -40 dB.叠加后的信号也从 u_0 NoLin 逐渐过渡为 u_0 Lin.故而每个区间内有 9 个信号,3 个区间共有 27 个信号.对每个信号分别计算 S 值、R 值和 PFA 值.可得到 3 条线,每条线上有 27 个点.

从图 3 可以看出:从左往右,随着信号非线性、非高斯性的减弱, S 值总体上表现出较好的单调性. PFA 值在 3 个区间内只有两个值 0 和 1,它只能够区分非高斯信号和高斯信号.在区间 1 内 R 值呈现为一个鼓包,这说明 R 值不能刻画非高斯信号中非线性成分的强弱.在区间 3 内 R 值在 2.15 附近上下波动,这说明 R 值无法有效区分非线性高斯信号和线性高斯信号.但 S 值随着信号中非高斯性成分、非线性成分的减弱而变小.这首先可以将随机信号分为 4 类信号:第 1 类是非线性非高斯信号;第 2 类是线性非高斯信号;第 3 类是非线性高斯信号;第 4 类是线性高斯信号.其次对信号中各种成分大小的判断给出了一个定量的标准,即 S 值处于:区间 $[0, 2)$ 内为第 4 类;区间 $[2, 60)$ 内为第 3 类;区间 $[60, 500)$ 内为第 2 类;区间 $[500, +\infty)$ 内为第 1 类.

2 验 证

为了验证上述方法的实用性,对电子器件实验测量的噪声信号进行分析.验证信号为 MOSFET 不同辐照状态下所测得的噪声信号,如图 4 所示.其中,噪声 s_1 来自 90 nm CMOS 工艺生产的增强型 nMOSFET,其沟道宽长比为 $0.18 \mu\text{m}/0.15 \mu\text{m}$,栅氧化层厚度为 1.4 nm.噪声 s_2, s_3, s_4 来自华晶 $1.0 \mu\text{m}$ CMOS 工艺制备的增强型 nMOSFET,其栅氧化层厚度为 $20 \pm 1.5 \text{ nm}$,沟道宽长比是 $4.0 \mu\text{m}/1.0 \mu\text{m}$.噪声测量采用西安电子科技大学噪声检测与无损诊断实验室自主研发的基于虚拟仪器的电子器件低频噪声测试仪系统.噪声 s_1 所对应的样品未经过应力损伤,噪声测试在器件线性区进行,所加有效栅压为 0.40 V,漏压为 0.17 V.噪声 s_2, s_3, s_4 是在器件的不同辐照状态下所测得的噪声.辐照采用了 Co^{60} 钴源,吸收体为 SiO_2 ,辐照总剂量分别为 1.5 kGy 和 3 kGy.噪声测试在器件线性区进行,所加有效栅压为 0.50 V,漏压为 0.10 V.辐照前所测得的噪声为 s_2 ,辐照 1.5 kGy 后所测得的噪声为 s_3 ,辐照 3 kGy 后所测得的噪声为 s_4 .

按照 Hinich 检验的方法^[8],根据图 1 的计算流程,在 matlab 下编写了 Hinich 检验的计算程序.根据图 2 的计算流程,在 matlab 下编写了双相干系数平方和的计算程序.将这两个程序分别对噪声 s_1, s_2, s_3, s_4 进行计算,可得到各信号对应的 S 值、R 值、PFA 值.从而进一步得到各信号所属的类别,结果如表 3 所示.对于信号 s_1 , PFA 为 0.00, $R=32.56$,根据 Hinich 检验可判定它为非线性非高斯信号; $S=774.80$,根据 S 值亦判定它为第 1 类信号;所以 S 值和 Hinich 检验对信号 s_1 的判定结果相一致.对于信号 s_3 , PFA 为 1.00,

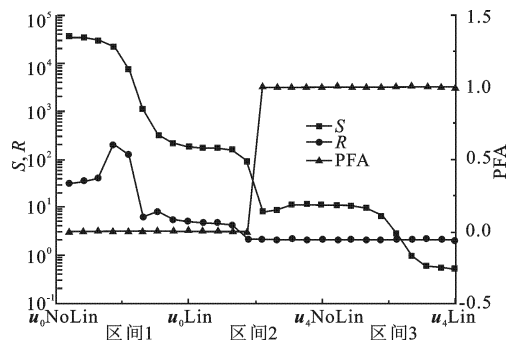


图 3 不同信噪比下信号叠加后的 S 值、R 值、PFA 值

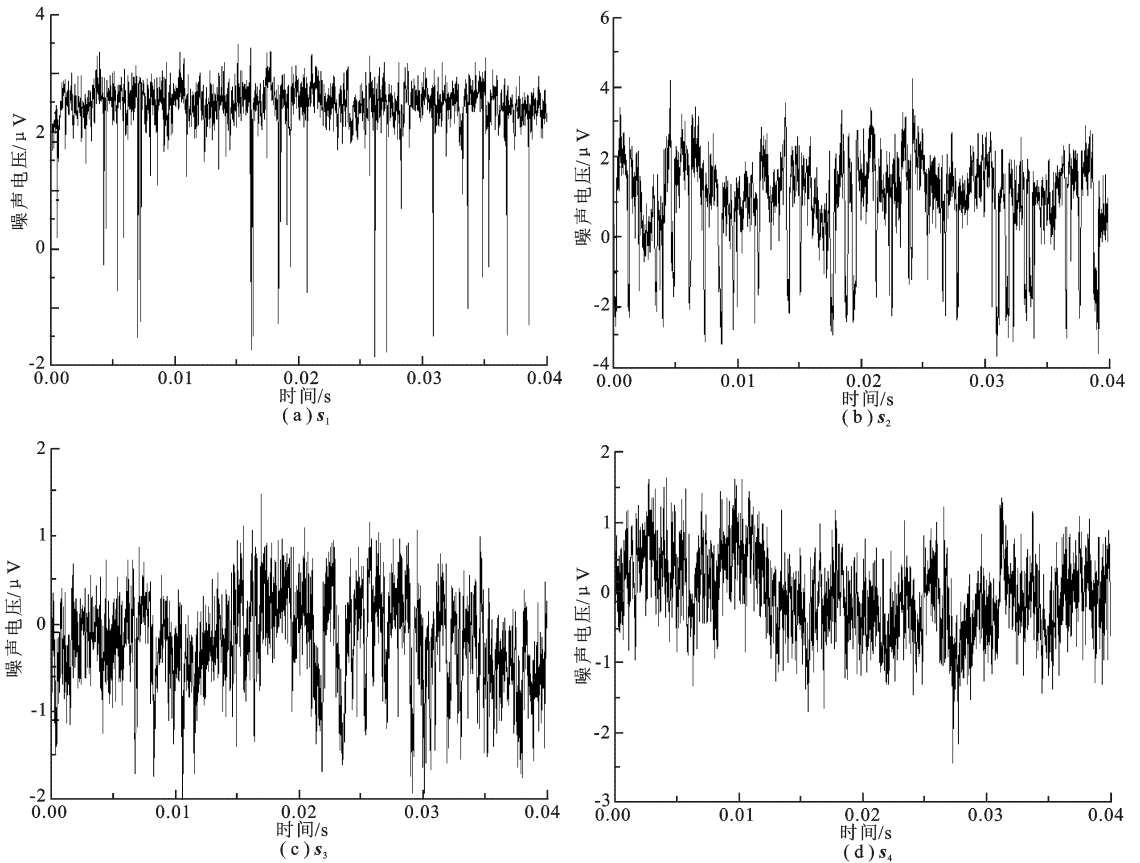


图 4 MOSFET 器件的 4 个噪声信号

$R=2.47$, 根据 Hinich 检验可判定它为高斯信号; $S=14.43$, 根据 S 值的分类标准, 可进一步判定它为非线性高斯信号. 对于信号 s_2 和 s_4 , 也有类似的结论. 根据 S 值对噪声信号进行分类的结果与 Hinich 检验相一致. 这 4 个信号对应于 MOSFET 的不同辐照状态, 其 S 值有明显的区别. 这表明笔者所提出的噪声高斯性和线性的定量分析方法用于分析电子器件噪声的非常规特性是适用的.

表 3 对 MOSFET 器件的 4 个噪声信号的计算结果

信号	Hinich 检验			器件噪声高斯性和线性的定量分析方法	
	PFA	R	分析结果	S	分析结果
s_1	0.00	32.56	非线性非高斯	774.8	非线性非高斯
s_2	0.04	2.58	线性非高斯	67.89	线性非高斯
s_3	1.00	2.47	高斯	14.43	非线性高斯
s_4	1.00	2.17	高斯	0.76	线性高斯

3 总 结

笔者提出将高阶统计量用于电子器件实验测量的噪声信号的分析中, 并提出了电子器件噪声高斯性和线性的定量分析方法, 采用了双相干系数平方和 (S) 这一表征参量. 通过模拟噪声信号的分析, 给出了依据 S 值对器件噪声分类的定量标准, 即 S 值处于: 区间 $[0, 2)$ 内为线性高斯信号; 区间 $[2, 60)$ 内为非线性高斯信号; 区间 $[60, 500)$ 内为线性非高斯信号; 区间 $[500, +\infty)$ 内为非线性非高斯信号. 将这种分析方法用于实验测量的电子器件噪声信号分析中, 表明器件噪声中广泛存在这 4 种类型的信号, 并且可以用该方法进行有效区分. 这种分析方法在器件的质量保证和可靠性分析方面大有用武之地.