

1-15-2021

Behavioral Simulation Modeling of Single Photon Avalanche Diode

Xu Yue

*College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China;*

Xiaopeng Xie

*College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China;*

Yue Heng

*College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications,
Nanjing 210003, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Behavioral Simulation Modeling of Single Photon Avalanche Diode

Abstract

Abstract: An accurate behavioral simulation model for single photon avalanche photodiode (SPAD) was proposed. *This presented model solved the convergence problem existed in SPAD avalanche current simulation, and achieved the basic static DC and dynamic AC behaviors modeling. The model functions were extended. Two important statistical effects of dark-counting and after-pulsing phenomena were included in this model according to their physical mechanisms.* The model has been written in Verilog-A hardware description language, showing good characteristics of transplanted and universality. A good agreement with more than 90% accuracy is achieved between the model basic simulations and the experimental results, proving the high accuracy of model and good convergence during simulation. Meanwhile, the added simulation functions of dark-counting and after-pulsing further improves the model practicability.

Keywords

Single Photon Avalanche Diode (SPAD), circuit simulation, behavioral modeling, statistical effects

Recommended Citation

Xu Yue, Xie Xiaopeng, Yue Heng. Behavioral Simulation Modeling of Single Photon Avalanche Diode[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1199-1204.

单光子雪崩二极管行为性仿真建模

徐跃, 谢小鹏, 岳恒

(南京邮电大学电子科学与工程学院, 南京 210003)

摘要: 提出了一种精确的单光子雪崩二极管(SPAD)行为性仿真模型。解决了 SPAD 模型仿真雪崩电流时难收敛的问题, 建立了 SPAD 器件直流和交流特性基本功能的仿真模型。进行了模型功能的拓展, 根据后脉冲与暗计数的产生机理, 实现了对这两种最重要的统计效应的模拟。模型使用模拟硬件描述语言 Verilog-A 实现, 具有很强的移植性和通用性。模型的基本功能仿真结果与实测结果达到 90% 以上的一致性, 验证了该模型具有较高的仿真精度和很好的仿真收敛性, 而暗计数和后脉冲的仿真功能增加进一步提高了模型的实用性。

关键词: 单光子雪崩二极管; 电路仿真; 行为性建模; 统计效应

中图分类号: TN382

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 06-1199-06

DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2015.06.006

Behavioral Simulation Modeling of Single Photon Avalanche Diode

Xu Yue, Xie Xiaopeng, Yue Heng

(College of Electronic Science & Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: An accurate behavioral simulation model for single photon avalanche photodiode (SPAD) was proposed. This presented model solved the convergence problem existed in SPAD avalanche current simulation, and achieved the basic static DC and dynamic AC behaviors modeling. The model functions were extended. Two important statistical effects of dark-counting and after-pulsing phenomena were included in this model according to their physical mechanisms. The model has been written in Verilog-A hardware description language, showing good characteristics of transplantation and universality. A good agreement with more than 90% accuracy is achieved between the model basic simulations and the experimental results, proving the high accuracy of model and good convergence during simulation. Meanwhile, the added simulation functions of dark-counting and after-pulsing further improves the model practicability.

Keywords: Single Photon Avalanche Diode (SPAD); circuit simulation; behavioral modeling; statistical effects

引言

单光子雪崩光电二极管 (Single Photo Avalanche Diode, 以下简称 SPAD) 是一种工作在盖革模式下的雪崩光电二极管, 由于器件外加工作电压高于雪崩电压, 单个光子入射就可能引起很大的

雪崩电流, 获得非常高的内部增益, 因此能实现对单光子的探测^[1-3]。SPAD 发生雪崩后需要一个淬灭和复位电路迅速将雪崩现象淬灭同时将 SPAD 的偏置电压复位到雪崩电压以上, 以便下一次光子探测。目前使用 CMOS 集成电路工艺将 SPAD 器件与淬灭、复位、读出等外围电路集成在同一芯片内部, 组成大规模 SPAD 阵列探测器是 SPAD 发展趋势^[4]。

在设计集成的 SPAD 阵列探测器时, 为了准确设计外围电路, 必需为 SPAD 建立一个精确的电路仿真模型。电路仿真模型即 SPICE 模型, 是根据器件结构和各种物理效应, 将器件等效为一个具体的



收稿日期: 2014-05-29 修回日期: 2014-12-15;
基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目 (BK20131379); 南京邮电大学校科研基金资助 (NY213112);
作者简介: 徐跃(1972-), 男, 江苏南京, 博士, 副教授, 研究方向为微电子器件设计与建模; 谢小鹏 (1990-), 男, 江苏南通, 硕士生, 研究方向为微电子器件与集成电路设计。

<http://www.china-simulation.com>

• 1199 •

电路结构, 代入具体的器件、物理和工艺参数后可以在电路仿真器上进行电路各种电学性能的仿真。与电路仿真模型不同的是实际模型是将实际问题转化成数学问题, 建立数学模型来分析问题; 而理论模型主要基于器件基本理论推导得到物理量之间数学关系, 进行数值求解获得器件的物理特性^[5]。实际模型和理论模型只能进行理论分析, 不能进行电路仿真。SPAD 早期的电路仿真模型只考虑了器件在雪崩时的直流特性, 仿真精度较低。后来 Zappa 等人进一步考虑了 SPAD 雪崩时的交流特性, 提出了一个具有较高精度的等效电路 SPICE 仿真模型, 但该模型的收敛性不好^[6]。而 Mita 等人使用模拟硬件描述语言 Verilog-A 代替具体的等效电路实现了 SPAD 雪崩时交、直流特性仿真^[7]。国内研究人员也进行了 SPAD 电路仿真模型的研究工作, 建立了简单的 SPICE 仿真模型, 进行了淬灭与恢复电路的仿真工作^[8]。

但目前提出的各种电路仿真模型存在两个主要问题。一个是仿真模型在模拟 SPAD 雪崩时的收敛性不好。另一个问题是不能模拟 SPAD 暗计数和后脉冲这两种对器件性能有重要影响的统计现象。

本文根据 SPAD 的器件结构和工作机理建立了一种精确、功能完整的行为性电路仿真模型, 主要进行了以下 2 方面工作: (1) 利用可微的伪最大值和伪最小值函数建立一个连续可微的雪崩直流电流表达式, 利用 Verilog-A 数学运算功能计算出 SPAD 雪崩时直流电流, 解决了仿真 SPAD 雪崩时难收敛的问题, 提高了仿真速度。(2) 根据 SPAD 产生暗计数及后脉冲的物理机制, 利用 Verilog-A 行为性描述功能来描述这 2 种统计现象, 拓展了现有 SPAD 仿真模型功能, 提高了模型实用性。该模型可直接在通用的电路仿真器上仿真, 具有仿真速度快, 收敛性好, 精度高, 移植性强等优点。

1 SPAD 仿真模型基本功能

1.1 模型基本结构

图 1 是 SPAD 模型的基本等效电路。开关 S 用于

描述是否有光子信号入射, R_{break} 描述 SPAD 的雪崩击穿时的电阻, V_{break} 模拟雪崩击穿的电压阈值, C_{ka} , C_{ks} 与 C_{as} 分别表示 SPAD 耗尽层电容、阴极和阳极与衬底之间的电容。总的瞬时雪崩电流用流过 SPAD 雪崩区的直流电流 I_{spad} 和流过 3 个寄生电容的交流电流 i_{ka} , i_{ks} 和 i_{as} 来模拟。

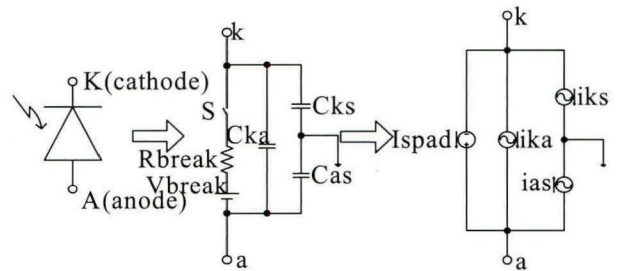


图 1 SPAD 模型的基本等效电路

1.2 雪崩直流电流

SPAD 的 I-V 直流特性曲线(图 2 所示)可以用一个近似的线性分段函数表示为

$$I_{spad} = \begin{cases} I_s & 0 \leq V_d < (V_{break} + (R_{break} - R_{th})I_{lat}) \\ I_s + \frac{V_d - V_{break} - (R_{break} - R_{th})I_{lat}}{R_{th}} & (V_{break} + (R_{break} - R_{th})I_{lat}) \leq V_d < (V_{break} + R_{break}I_{lat}) \\ I_s + \frac{V_d - V_{break}}{R_{break}} & V_d \geq (V_{break} + R_{break}I_{lat}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_d 表示 SPAD 两端的电势差; I_{lat} 表示雪崩开启时的电流; I_s 与 R_{th} 分别表示反向饱和电流与避免收敛问题引入的关断电阻。

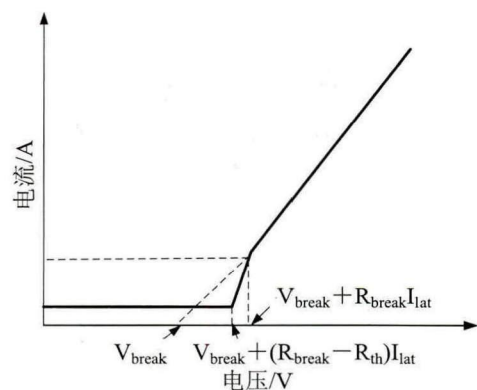


图 2 SPAD 器件的 I-V 特性曲线

但是式(1)在 (V_{break}, V_d) 区间不可微, 在仿真时

很难收敛, 需要建立一个连续可微的函数关系。为了解决这个问题, 进行了如下的处理^[7]:

首先, 令

$$I_1 = I_s \quad (2)$$

$$I_2 = I_s + \frac{V_d - V_{break} - (R_{break} - R_{th})I_{lat}}{R_{th}} \quad (3)$$

$$I_3 = I_s + \left| \frac{V_d - V_{break}}{R_{break}} \right| \quad (4)$$

则式(1)描述的I-V特性曲线可表示为

$$I_{spad} = \min[I_3, \max(I_1, I_2)] \quad (5)$$

然后利用可微的伪最大值函数和伪最小值函数:

$$\max(x, y) \approx n \ln \left(e^{\frac{x}{n}} + e^{\frac{y}{n}} \right) \quad (6)$$

$$\min(x, y) \approx -n \ln \left(e^{-\frac{x}{n}} + e^{-\frac{y}{n}} \right) \quad (7)$$

于是将式(5)近似为

$$I_{spad} = -n \ln \left[e^{-\frac{I_3}{n}} + \left(e^{-\frac{I_1}{n}} + e^{-\frac{I_2}{n}} \right)^{-1} \right] \quad (8)$$

式中 n 是一个经验值, 典型的取值范围是 $(10^4, 10^6)$, 目的是为了优化模型仿真时的收敛速度。

(8)式对雪崩直流电流计算公式进行了优化, 可避免了仿真在 (V_{break}, V_d) 区间不可微的问题, 提高了仿真收敛性。

1.3 雪崩交流电流

为了模拟 SPAD 雪崩电流交流特性, 首先计算出耗尽层电容 C_{ka} 存储的电荷量 Q_{ka} 和寄生电容 C_{ks} 与 C_{as} 存储的电荷量 Q_{ks} 和 Q_{as} 。

然后计算出流过SPAD阴极和阳极的交流小信号电流值^[7]:

$$i_k = \frac{dQ_{ka}}{dt} + \frac{dQ_{ks}}{dt} \quad (9)$$

$$i_a = -\frac{dQ_{ka}}{dt} + \frac{dQ_{as}}{dt} \quad (10)$$

最后由(9)式和(10)式可以得到瞬态雪崩电流总的表达式为

$$I_k = I_{spad} + i_k \quad (11)$$

$$I_a = -I_{spad} + i_a \quad (12)$$

2 SPAD 仿真模型功能拓展

2.1 后脉冲(Afterpulsing, AP)

后脉冲是SPAD雪崩时的载流子被陷阱中心捕获后再释放引起的一种统计现象, 是没有光子到达情况下引起的一次伪计数。陷阱能级的位置对载流子释放的速度产生重要的影响, 载流子从第*i*级陷阱能级释放出来的时间表示为^[9]

$$\tau_{cri} = \tau_{0i} e^{\frac{E_{ai}}{K_B T}} \quad (13)$$

式中 E_{ai} 和 τ_{0i} 分别为第*i*能级的激活能和寿命因子, τ_{cri} 强烈依靠于温度 T 。

雪崩结束后可以认为相邻的两次载流子释放事件的间隔时间 $\Delta\tau_{cri}$ 服从一个指数分布, 而同一个*i*能级的所有这些间隔时间的平均值为 τ_{cri} 。在使用Verilog-A语言建模的过程中, 如果模型已判断出SPAD没有发生雪崩, 则以连续两个光子信号间隔时间的一半为mean值, 以载流子在陷阱能级的寿命 τ_{cri} 为seed值, 利用Verilog-A的函数\$rdist_exponential(seed, mean)随机返回一个按照指数分布的时间值来标记后脉冲现象产生的时刻。在该时刻下产生的后脉冲电流大小也可以按同样方法来确定(以 I_{lat} 为mean值, 以 I_s 为seed值)。在非饱和情况下, 后脉冲出现时间的分布函数通常只用两个陷阱能级来拟合就可以保证足够的精度。

最后可以得到时刻*t*之前所发生后脉冲总概率为

$$P_{AP}(t) = \int_0^t \sum_i A_i e^{-t/\tau_{cri}} dt \quad (14)$$

式中 A_i 对应于*t*=0时刻不同陷阱能级释放载流子的瞬时强度。

可以看出随着温度的升高, 被陷阱俘获的载流子的寿命 τ_{cri} 缩短, 发生后脉冲现象的概率将减少。

2.2 暗计数(Dark Counting, DC)

当没有光照时, 由于热激发和强电场带-带隧穿效应在SPAD器件耗尽区产生自由载流子, 它们在电场作用下也会产生雪崩现象引起误计数, 称之为暗计数。在单位时间内产生的这种可疑脉冲的个

数称为暗计数率。本模型主要考虑热激发引起的暗计数。Shockley-Hall-Read (SHR) 产生-复合模型可以准确地计算热载流子产生-复合率。当假设 $n \ll n_i, p \ll p_i$, 且电子和空穴的俘获截面 $\sigma_n = \sigma_p$ 相等时, 单位体积热载流子产生-复合率可简化为^[10]

$$G_{SRH} = -\frac{n_i}{2\tau_0} \quad (15)$$

式中 n_i 为本征载流子浓度, τ_0 为非平衡载流子寿命。

由于热激发产生的载流子的几率遵循泊松分布, 平均值为 G_{SRH} 。因此两个连续的热产生载流子事件的间隔时间 Δt_{cg} 也服从泊松分布, 它们的期望值等于 $1/G_{SRH}$ 。建模时, 以 N 为 seed 值, 以载流子的产生/复合机制下的间隔时间 Δt_{cg} 为 mean 值, 直接利用 Verilog-A 中的函数 \$rdist_poisson (seed, mean) 随机返回一个按照泊松分布的时间值来标记暗计数现象发生的时刻。 Δt_{cg} 可表示为^[11]

$$\Delta t_{cg} = \frac{1}{G_{SRH} \cdot A_D \cdot W_D} = \frac{2\tau_0}{n_i \cdot A_D \cdot W_D} \quad (16)$$

考虑了热载流子雪崩触发几率 P_{tr} , 可以估算出单位时间内发生暗计数的次数即暗计数率(DCR)为

$$DCR_{SRH} = P_{tr} \cdot A_D \cdot \int_0^{W_D} |G_{SRH}| dz \approx \frac{P_{tr} \cdot n_i \cdot A_D \cdot W_D}{2\tau_0} \quad (17)$$

式中: W_D 为 SPAD 耗尽区宽度; A_D 为耗尽区面积。

3 仿真模型验证

使用模拟硬件描述语言 Verilog-A 完成了模型的行为性功能描述, 只需要确定十几个器件和物理参数即可进行电路仿真。表 1 给出了模型中使用的主要参数。该模型在 Cadence 的 Spectre 仿真器上完成了仿真并与部分实验结果进行了对比验证。

首先我们采用图 3 所示的被动式淬灭电路进行了模型基本功能的仿真。仿真中用一个高频脉冲信号来模拟光子信号。图 4 是模型瞬态仿真的结果。当 SPAD 接收到一个光子后触发 SPAD 雪崩, 迅速进入雪崩、淬灭和复位的过程, 仿真速度很快, 没有出现不收敛的问题。图中用 t_q 表示淬灭时间, t_r 表示复位时间。

表 1 模型的主要参数

参数	物理定义	取值
V_{break}	室温雪崩击穿电压	25 V
R_{break}	雪崩击穿电阻	4.2 kΩ
R_{th}	避免收敛引入的关断电阻	250 Ω
I_s	反向饱和电流	80 pA
I_{lat}	雪崩开启电流	97 μA
A_D	耗尽层的截面积	$19.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$
Φ_i	内建电势	0.65 V
C_{ka0}	零偏时单位面积耗尽层的电容	$1 \times 10^{-9} \text{ F/cm}^2$
C_{ks}	阴极与衬底之间的电容	1 pF
C_{as}	阳极与衬底之间的电容	1 pF
m_j	结判定系数	1/2
β	V_{break} 温度系数	$8 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
σ_n	电子俘获截面积	$1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$
τ_{01}	第一陷阱能级的寿命因子	$2 \times 10^{-10} \text{ s}$
E_{a1}	第一陷阱能级的激活能	0.2 eV
τ_{02}	第二陷阱能级的寿命因子	$4 \times 10^{-12} \text{ s}$
E_{a2}	第二陷阱能级的激活能	0.25 eV
η_i	雪崩触发几率的经验参数	0.13

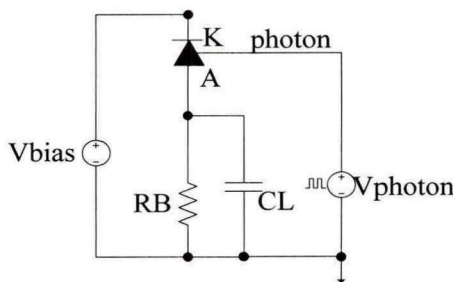
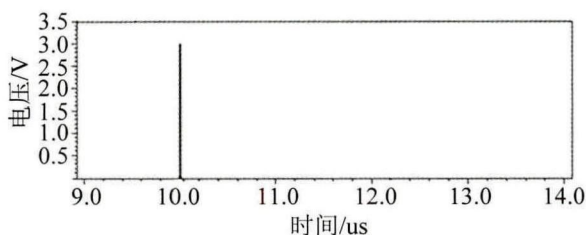
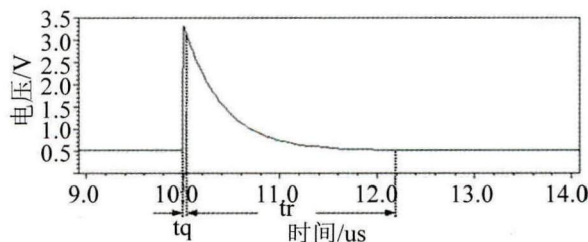


图 3 被动式淬灭电路



(a) 光子触发信号



(b) SPAD 输出的雪崩信号

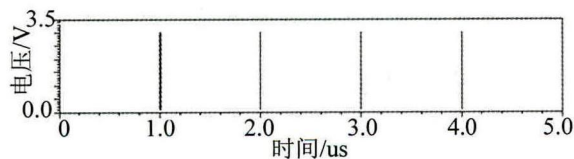
图 4 被动式淬灭电路的仿真波形

为了验证模型的精确度, 将仿真结果与测试结果做对比, 如表2所示。可以看到仿真结果和测试结果的偏差都控制在了10%之内, 从整体上看模型基本功能的仿真结果与实测结果达到了很好的一致性, 反映出模型对SPAD雪崩淬灭与复位过程的模拟具有较高的精确性。

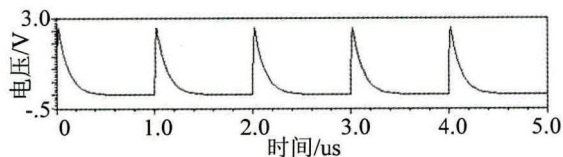
表2 模型仿真与实测结果的对比

$R_B/k\Omega$	$t_q, t_r/ns$	$V_d - V_{break} = 5 V$		$V_d - V_{break} = 10 V$	
		测试结果	仿真结果	测试结果	仿真结果
180	t_q	308	286	412	401
	t_r	11 323	10 739	11 465	10 649
200	t_q	295	271	380	368
	t_r	12 210	11 779	12 354	11 827
300	t_q	284	252	375	348
	t_r	18 398	17 870	18 462	17 984

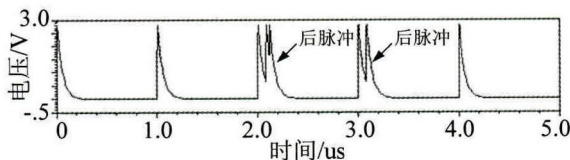
我们对模型的扩展功能进一步进行了仿真验证。图5是后脉冲现象的仿真结果。当模型功能进行后脉冲拓展后, 在一个初始的雪崩脉冲后即使没有光子入射的某个时刻也产生了雪崩脉冲。由于只考虑了2个俘获能级, 波形中也出现了2个明显的后脉冲峰值。



(a) 光子触发信号



(b) 无后脉冲输出的雪崩信号



(c) 有后脉冲输出的雪崩信号

图5 后脉冲仿真波形

图6给出了暗计数现象的仿真结果。在进行暗计数的仿真时将SPAD的光子接收端接地, 表示不接收光子信号。从阳极的输出结果可以看到在100 μs 内发生了5次暗计数。但是模型仿真中暗计数出现的时刻是随机的, 可根据模型中内置的用于记录暗计数值的计数器确定其数值。

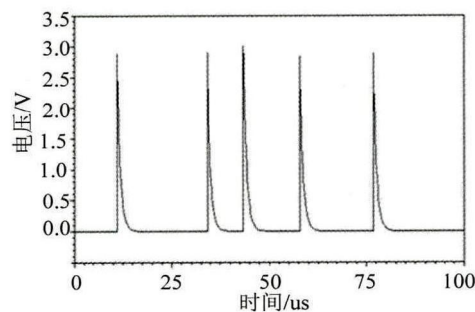


图6 暗计数仿真波形

4 结论

本文为单光子雪崩二极管探测器建立了一种行为性的仿真模型。与现有模型相比, 该模型解决了雪崩仿真难收敛的问题, 获得了很快的仿真速度, 更重要的是模型能模拟SPAD暗计数和后脉冲这两种重要的统计现象。模型使用硬件描述语言Verilog-A实现, 代入的参数少, 具有很好的移植性和通用性, 很容易在电路仿真器上实现器件和电路的混合仿真。模型基本功能仿真结果的实测结果达到很好的一致性, 验证了模型具有较高的精度, 而暗计数和后脉冲的功能性仿真验证了概率统计方法建模思路的合理性, 使模型具有更好的实用性。

参考文献:

- [1] 何伟基, 司马博羽, 程耀进, 等. 基于盖格-雪崩光电二极管的光子计数成像 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1831-1837.
- [2] Niclass C, Soga M, Matsubara H, et al. A 100-m range 10-frame/s 340×96-pixel time-to-flight depth sensor in 0.18- μm CMOS [J]. IEEE J. Solid-State Circuits (S0018-920), 2013, 48(2): 559-568.
- [3] Field R M, Realov S, Shepard K L. A 100 fps, time-correlated single-photon counting-based fluorescence-lifetime imager in 130 nm CMOS [J]. IEEE J. Solid-State Circuits (S0018-920), 2014, 49(4): 867-880.

运算发散,但减小仿真步长会增加计算量,需要高性能的仿真计算机。

本文基于挠性模态 $\ddot{\eta}$ 和星体转动 $\dot{\omega}$ 解耦、局部迭代等措施避免迭代误差导致挠性动力学运算发散,解耦后的挠性动力学模型参数 K_1 、 K_2 、 I^{-1} 等可以离线计算,从而减小了迭代计算量,降低了对计算机的性能要求,且易于工程实现。仿真验证了解耦及迭代运算方法的有效性,仿真结果表明计算速度可以提高约 2 个数量级。

参考文献:

- [1] 孙宝祥,崔静. 大型挠性充液卫星自适应 PID 智能控制技术[J]. 航天控制, 2007, 25(4): 26-30.
 - [2] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
 - [3] 罗绪涛,梁晓庚,贾晓洪,等. 大攻角导弹 DDFC 变结构解耦控制器设计[J]. 计算机仿真, 2012, 29(7): 101-104.
 - [4] 丁亮,高海波,邓宗全,等. 月球车轮地相互作用力学模型解耦及其应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(1): 56-61.
 - [5] 霍炬,仲小清,杨明. 基于视觉的飞行器运动参数串行式递归估计[J]. 宇航学报, 2010, 31(2): 361-368.
 - [6] 胡立坤,王庆超. 基于逆系统方法与内模原理的航天器姿态控制[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2719-2722.
 - [7] 张国忠,吴俊,刘毅,等. 循环流化床锅炉解耦模型的自适应控制研究[J]. 浙江电力, 2008, 30(2): 1-4.
 - [8] 王龙,董新民,贾海燕. 无人机空中加油相对位姿解耦迭代确定算法[J]. 应用科学学报, 2012, 30(4): 427-432.
 - [9] 管宇,张迎春,沈毅,等. 基于迭代学习观测器的卫星姿态控制系统的鲁棒容错控制[J]. 宇航学报, 2012, 33(8): 1080-1086.
 - [10] 陈卫明,陈庭贵,肖人彬. 动态环境下基于混合迭代的耦合集求解方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(2): 271-279, 309.
-
- (上接第 1203 页)
- [4] Niclass C, Rochas A, Besse P A, et al. Toward a 3-D camera based on single photon avalanche diodes[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (S1077-260X), 2004, 10(4): 796-802.
 - [5] 周晓亚,赵永嘉,金湘亮. 单光子雪崩二极管雪崩建立与淬灭的改进模型[J]. 固体电子学研究与进展, 2012, 32(5): 428-432.
 - [6] Zappa F, Tosi A, Dalla Mora A, et al. SPICE modeling of single photon avalanche diodes[J]. Sensors and Actuators A: Physical (S0924-4247), 2009, 153(2): 197-204.
 - [7] Mita R, Palumbo G, Fallica PG. Accurate model for single-photon avalanche diodes[J]. IET Circuits, Devices and Systems (S1751-858X), 2008, 2(2): 207-212.
 - [8] 周扬,陈永平. SPAD的EDA模型及其在集成淬灭电路设计中的应用[J]. 半导体光电, 2010, 31(5): 694-701.
 - [9] Ripamonti G, Zappa F, Cova S. Effects of trap levels in single-photon optical time-domain reflectometry: evaluation and correction[J]. Journal of Lightwave Technology (S0733-8724), 1992, 10(10): 1398-1402.
 - [10] Zappa F, Lacaita A, Cova S. Solid-state single-photon detectors[J]. Opt. Eng. (S0091-3286), 1996, 35(4): 938-945.
 - [11] Kang Y, Lu H X, Lo Y-H. Dark count probability and quantum efficiency of avalanche photodiodes for single-photon detection[J]. Appl. Phys. Lett. (S0003-6951), 2003, 83(14): 2955-2957.