

文章编号: 1001-893X(2012)04-0508-06

适用于多速率高阶 QAM 的定时同步改进算法^{*}

张莉莉, 贺知明

(电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731)

摘要: 针对速率可变的高阶正交幅度调制(QAM)信号定时同步问题, 提出了一种基于 Gardner 理论的定时同步改进算法。新算法改原有滤波器结构为两级插值级联优化结构来实现多速率信号的定时同步, 可独立于载波同步单独使用, 比传统结构具有更强的普遍适用性。仿真结果表明, 该算法可以准确地对速率可变的 128QAM 信号进行同步。

关键词: 软件无线电; 数字接收机; 定时同步; 正交幅度调制; Gardner 算法; 可变速率

中图分类号: TN919 **文献标志码:** A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.04.017

A Modified Method of Timing Synchronization for Multi-rate High-order QAM

ZHANG Li-li, HE Zhi-ming

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: On the basis of Gardner interpolation theory about timing synchronization, a modified timing recovery method is proposed to adapt multi-rate high-order QAM demodulation. The algorithm replaces the traditional filter with two-stage cascade filters to realize the carrier synchronization, which is more suitable for multi-rate timing synchronization. The simulation results show that the algorithm can be used in timing synchronization for 128 QAM signal precisely.

Key words: software defined radio; digital receiver; timing synchronization; quadrature amplitude modulation (QAM); gardner algorithm; multi-rate

1 引言

正交幅度调制(QAM)由于其频谱利用率较高和抗噪声能力强等优点在数字通信中得到了广泛应用, 且阶数越高, 频带利用率也越高。基于软件无线电的数字接收机, 其定时同步主要采用异步采样恢复, 通过估算定时误差, 控制内插滤波器内插出最佳采样时刻的值, 实际中多采用 Gardner 算法结构^[1]。

定时同步性能不好将产生严重符号干扰, 直接影响到后续载波同步、信道均衡以及符号判决。采用固定速率进行通信的接收机, 其参数不能随着信道状态的变化而变化, 不利于通信质量的提高。针对软件无线电通用性要求的多速率问题, 如果对多速率的高阶 QAM 信号直接采用 Gardner 算法, 那么滤波器系数变化带来的运算量的急剧增加势必给整个系统带来极大的负担。文献[2-3]主要对匹配滤波器结构进行改进来完成定时恢复, 文献[4]通过对内插

^{*} 收稿日期: 2011-10-11; 修回日期: 2012-03-05

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金资助项目(10876006)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China and China Academy of Engineering Physics (No. 10876006)

滤波器功率检测来降低系统复杂度,但采用的 QPSK 信号频谱利用率不高,文献[5-7]分别针对 16QAM、64QAM 信号对定时同步结构进行了一定的研究。针对类似于 128QAM 这种高阶 QAM 信号,本文在 Gardner 算法的基础上进行改进,提出一种两级内插结构,以实现不同速率信号定时同步的建模仿真与验证。

2 定时同步模型

传统的基于 Gardner 算法^[1]的定时同步结构如图 1 所示。该结构包括了用来进行符号采样的内插滤波器、定时误差检测器、环路滤波器、插值控制器以及数控振荡器(NCO)。其中,内插滤波器从输入的非同步被测基带两路(I/Q)采样信号中恢复出发送的符号,而定时恢复环路用来控制内插滤波器的插值相位。定时误差检测器提取出当前采样相位误差,将其送入环路滤波器滤波后控制 NCO 的振荡频率。当被测信号等效采样无相偏时,环路进入稳定状态,此时 NCO 的振荡频率就等于实际被测信号的码率或码率的整数倍。

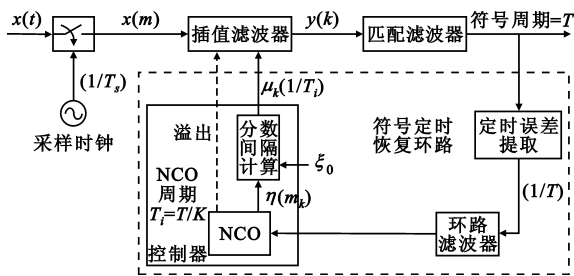


图 1 传统的基于 Gardner 算法的定时同步结构
Fig.1 The timing synchronization structure based on Gardner algorithm

码速率的大范围可变必然导致进入插值滤波器的信号带宽发生变化,插值滤波器的带宽也要相应发生变化才能满足滤波要求。传统意义上,为了适应码速率大范围可变,需要多组与信号带宽相对应的内插滤波器来实现内插^[5]。但高阶 QAM 对插值精度要求很高,插值滤波器设计较复杂,多组滤波器就会导致运算量的急剧增加。

改进的适合于多速率的定时同步结构如图 2 所示。比较图 1 和图 2,本质区别是把插值滤波器分为两级插值级联结构,第一级插值结构实现采样速

率的变换,其输出信号速率为固定整数倍码速率,主要完成信号的预处理,对滤波器要求很低。第二级插值主要实现传统插值滤波器在最佳采样时刻插值的功能,对滤波器的性能要求很高。下面将分别对图 2 中定时同步的 3 个主要模块即可变分数倍抽取、插值滤波、定时误差提取进行改进。

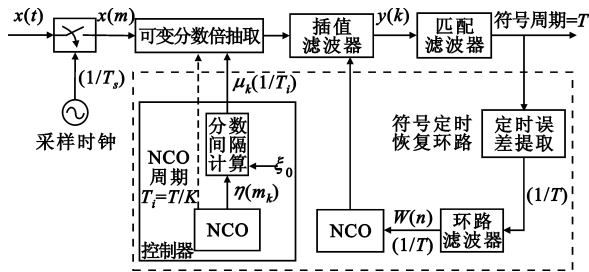


图 2 改进的适用于多速率 QAM 的定时同步结构
Fig.2 The improved timing synchronization structure for QAM

2.1 可变分数倍抽取

传统的实现分数倍抽取的方法是根据输入输出采样率 $\alpha = M/N$ 之比,先对输入信号进行 $1:M$ 的插值,再通过带宽为 $\pi/\max(M, N)$ 的低通滤波器,最后进行 $1:N$ 的抽取。显然,这样将带来极大的资源消耗。多相滤波结构^[3]是实现分数倍抽取的常用优化结构,如图 3(a)所示, M 为多相滤波器阶数,它决定了插值精度, M 越高,插值精度越高,插值导致的相位抖动也越小。为了进一步减小运算量,多相滤波器可采用 Farrow 结构^[8]实现。设多相滤波器输入为 $x(n)$,输出为 $y(n)$, μ 为内插估点,则输出可表示为

$$y(n + \mu) = \sum_{m=0}^{M/N-1} Q_m(\mu) x(n - m) \quad (1)$$

式中, $Q_m(\mu)$ 为多相滤波器第 m 列的多项式:

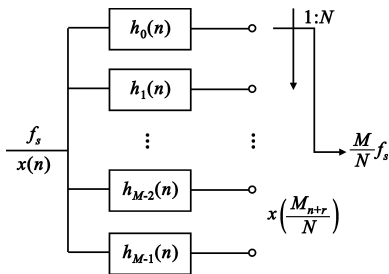
$$Q_m(\mu) = \sum_{l=0}^{L-1} b(l, m) \mu^l \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得

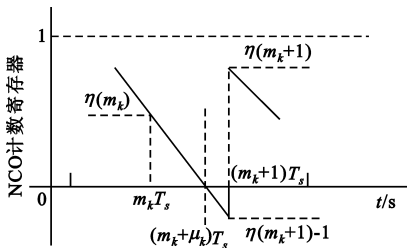
$$y(n + \mu) = \sum_{l=0}^L d(n, l) \mu^l \quad (3)$$

$$d(n, l) = \sum_{m=0}^{M/N-1} b(l, m) x(n - m) \quad (4)$$

式中, $b(l, m)$ 就是用于近似多相滤波器第 m 列的多项式系数。可以看出,多项式系数直接作为滤波器系数使用,简化了运算结构。



(a)滤波器的多相结构



(b)NCO 递减累加过程示意

图 3 可变分数倍抽取的多相滤波结构和 NCO 的递减累加过程

Fig.3 The polyphase filter structure of fractional decimation and the NCO of the cumulative process of decline

多相滤波抽取时刻的控制通过重采样控制器来实现。通过对内插结构的深入研究,该控制器仍通过 NCO 来实现。该 NCO 实际是一个相位递减器,其差分方程为

$$\eta(m) = [\eta(m) - W] \bmod (-1)$$

其中, $\eta(m)$ 是第 m 时刻 NCO 递减累加器中的值, $W = T_i/T_s$ 为 NCO 的控制字。由于重采样器输出等效采样率 $1/T_i$ 和输入等效采样率 $1/T_s$ 为已知, W 为固定值。图 3(b)形象地描述了 NCO 递减累加过程。期望抽取位置 μ_k 根据 $m_k T_s$ 和 $(m_k + 1) T_s$ 时刻对应的寄存器值 $\eta(m_k)$ 和 $\eta(m_k + 1)$ 通过式(5)和式(6)计算可以得到。

$$\frac{(1 - \mu_k) T_s}{1 - \eta(m_k + 1)} = \frac{\mu_k T_s}{\eta(m_k)} \tag{5}$$

$$\mu_k = \frac{\eta(m_k)}{1 - \eta(m_k + 1) + \eta(m_k)} = \frac{\eta(m_k)}{W} = \varepsilon_0 \eta(m_k) \tag{6}$$

2.2 插值滤波器

插值滤波器是符号定时同步的核心部分,特别是高阶 QAM 对插值精度的要求非常高。插值滤波器的设计关键是插值函数的设计。立方内插是传统内插滤波器中性能相对较好的内插滤波器。由于多项式内插函数能够用 Farrow 结构实现,降低运算量,

所以插值函数最好是能够用多项式拟合实现。文献[2,8]给出了一种基函数的多项式插值滤波器设计方法。这种多项式内插滤波器通过在通带和阻带上设置需要的幅度和加权系数,结合最优化算法和具体要求的频带特性,可以实现频域上的任意频响。采用基函数的多项式内插滤波器而不是传统的拉格朗日立方内插滤波器,可以使性能更好,插值精度更高。

2.3 定时误差提取

定时误差检测是定时同步环路的关键。Gardner 定时误差检测算法具有很好的性能^[4],且该算法每个符号只需要两个采样点,对载波频偏和相差不敏感。定时误差 e_k 的计算公式为

$$e_k = x^I\left(t_k - \frac{1}{2}\right) [x^I(t_k) - x^I(t_{k-1})] + x^Q\left(t_k - \frac{1}{2}\right) [x^Q(t_k) - x^Q(t_{k-1})] \tag{7}$$

其中, $x(t)$ 是接收信号,上标表示信号分别来自 I/Q 两路,用 k 来表示第 k 个最佳采样点。传统 Gardner 算法是针对 BPSK/QPSK 调制信号提出的,不适用于高阶 QAM 这种多电平信号,必须对传统 Gardner 算法进行改进。Gardner 算法改进的思路是改变其只对零点检测有效性的缺点。在本文中,我们改进方法是将中间值即相邻两个最佳采样点间的值 $x(k - 1/2)$ 归零化即可,得到式(8)所示的改进的定时误差公式。

$$e_k = \left\{ x^I\left(t_k - \frac{1}{2}\right) - \frac{x^I(t_k) + x^I(t_{k-1})}{2} \right\} \cdot [x^I(t_k) - x^I(t_{k-1})] + \left\{ x^Q\left(t_k - \frac{1}{2}\right) - \frac{x^Q(t_k) + x^Q(t_{k-1})}{2} \right\} \cdot [x^Q(t_k) - x^Q(t_{k-1})] \tag{8}$$

3 系统仿真分析

仿真参数设置:128QAM 调制,升余弦滚降系数 0.15,载波频偏 300 kHz,相偏 $\pi/4$,信噪比 23 dB,定时延迟 0.5 个码元时间,载频 124 MHz,码速率可变,采样率 102.4 MHz,匹配滤波器为 50 阶。

3.1 没有频偏和相偏的情况

在实际应用中,信号往往混杂着噪声,图 4 是 128QAM 信号星座图加入高斯噪声的情况,其中信噪比为 23 dB。可以看出星座点间相互混杂,无法区分。将不同速率的 QAM 信号分别通过本文所提的改进的定时同步算法,得到信号定时同步环路收敛情况如图 5 所示。

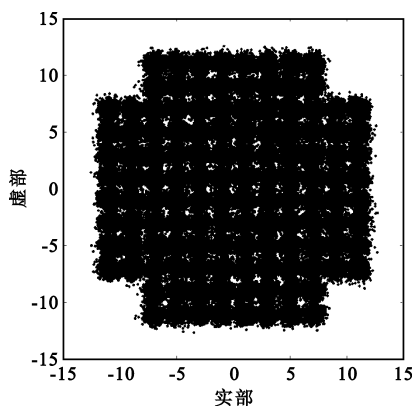
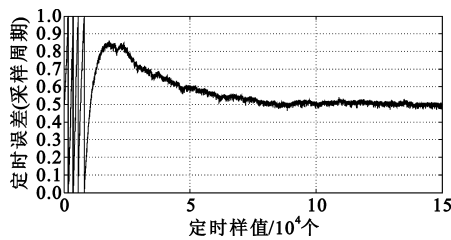
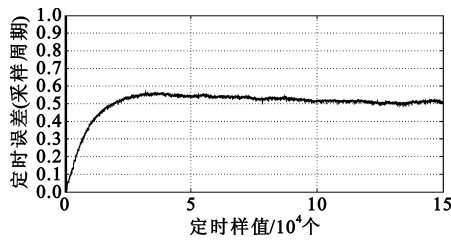


图 4 信噪比为 23 dB 时的 128QAM 调制信号星座图
Fig.4 The 128 QAM signal constellation when SNR = 23 dB

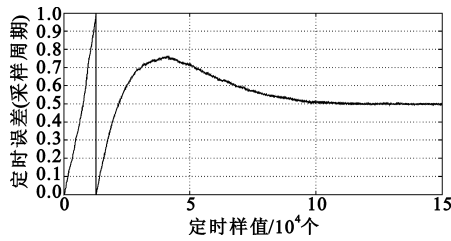
我们取 3 种不同速率的 128QAM 信号进行仿真,如图 5 所示,从(a)~(c)信号速率依次增大。由图 5 可以看出,虽然不同速率的 128QAM 收敛的速度快慢不一样,但经过 100 000 个采样点之后,曲线趋于平稳,分数延迟均收敛于 0.5 处,波动范围小于 0.03,表明定时同步环路已经完全收敛,定时误差得到了纠正。仿真结果说明该定时同步方案可行。



(a)信号速率为 10.24 Mbit/s



(b)信号速率为 12.8 Mbit/s



(c)信号速率为 25.6 Mbit/s

图 5 没有频偏和相偏时定时同步环路收敛情况
Fig.5 The convergence of timing synchronization loop when there is no frequency offset and phase offset

速率为 25.6 Mbit/s 的 128QAM 信号经定时同步收敛后的输出信号星座图如图 6 所示。比较图 6 和图 4,可以看出性能得到了很大的提升,图 6 中星座点更加集中,星座间隔清晰,信噪比由于匹配滤波器作用有了大幅度提高,能够很好地实现符号判决。同理,其他两种速率情况下的定时同步分析与此类似,输出信号星座图与图 6 一致。

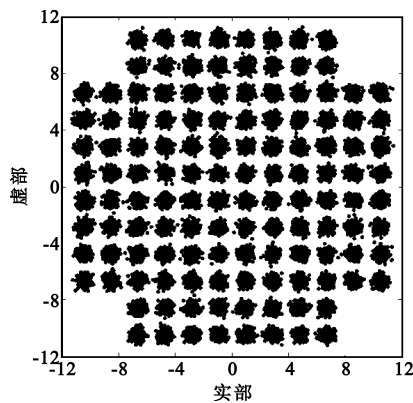
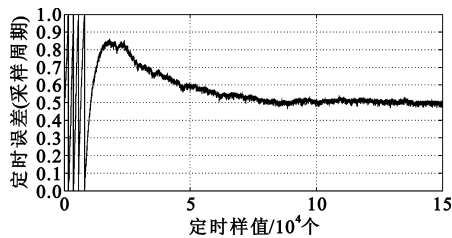


图 6 没有频偏和相偏时定时同步输出信号星座图
Fig.6 The output QAM signal constellation after timing synchronization when there is no frequency offset and phase offset

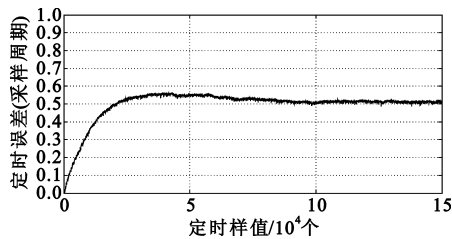
3.2 存在频偏相偏的情况

图 7 是存在频偏 300 kHz 情况下,不同速率的 128QAM 信号定时同步环路收敛曲线图。对比图 5 和图 7,说明频偏对定时同步收敛环路不影响。同理,我们只加入 $\pi/4$ 相偏时得到的收敛曲线类似于图 5 和图 7。可以得出,在存在相偏和大频偏的情况下,定时同步环路分数延迟收敛曲线与图 5 基本相同,经过 10 万个样点之后,曲线趋于平稳,收敛于 0.5,波动小于 0.03,证明了该定时同步算法不受频偏和相偏影响,可以独立于载波同步单独实现。

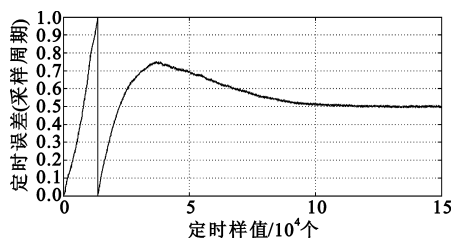
图 8(a)和(b)是存在频偏相偏时输出信号星座图。其中,图 8(a)是存在 $\pi/4$ 相偏的情况,图 8(b)是存在频偏的情况。在有频偏相偏时,定时同步之前星座点间相互混杂,无法区分,这类似于图 4 的情况。对比图 8 和图 4,经过定时同步后,星座图环带可以区分,间隔较明显,表明经过定时同步后信噪比由于匹配滤波器作用有了大幅提高。



(a)信号速率为 10.24 Mbit/s

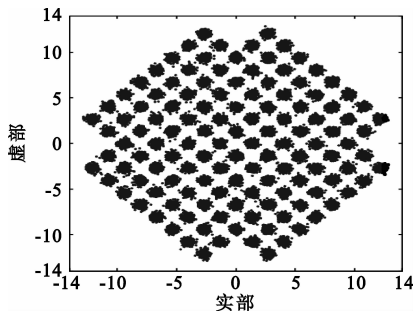


(b)信号速率为 12.8 Mbit/s

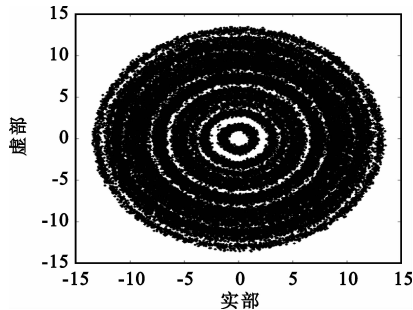


(c)信号速率为 25.6 Mbit/s

图 7 存在相偏和频偏时定时同步环路收敛情况
Fig.7 The convergence of timing synchronization loop when there is frequency offset and phase offset



(a)频偏 $\pi/4$ 时定时同步输出星座图



(b)频偏 300 kHz 时定时同步输出星座图

图 8 存在相偏和频偏的定时同步输出星座图
Fig.8 The output QAM signal constellation after timing synchronization when there is frequency offset or phase offset

Matlab 仿真表明,改进的定时同步算法获得了良好的效果,定时同步环路能够适应多速率的变化,可以纠正定时延时和噪声带来的误差,并且能够在载波相位锁定前达到收敛。

4 结 论

本文根据多速率高阶 QAM 信号的特点,对基于 Gardner 的定时同步算法结构进行改进,将原有内插滤波器改为两级滤波器级联结构,通过 NCO 重采样控制分数倍抽取实现多种速率信号的定时同步,采用高效 Farrow 结构的多相滤波结构降低了一级内插滤波器的阶数及设计难度。仿真结果表明,定时误差得到了纠正,定时误差抖动在 0.03 以内。该算法不受频偏相偏的影响,实现了码速率可变的高阶 QAM 系统的定时同步,在基于软件无线电的数字中频接收机等领域具有应用价值。

参考文献:

- [1] Gardner F M. Interpolation in digital modems – part I : fundamentals[J]. IEEE Transactions on Communications, 1993, 41(3):501 – 507.
- [2] Awan M, Peter K. Combined matched filter and arbitrary interpolator for symbol timing synchronization in SDR receivers [J]. Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems, 2010, 19(12): 1346 – 1357.
- [3] Harris F, Rice M. Multi – rate digital filters for symbol timing synchronization in software defined radios[J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 2001, 19(12):2346 – 2357.
- [4] 汪中. DVB – C 接收机符号同步内插的算法设计与仿真 [D]. 成都:电子科技大学, 2007:25 – 27.
WANG Zhong. Analyzed and Simulated the interpolating for symbol timing recovery in the DVB – C digital receiver [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007: 25 – 27. (in Chinese)
- [5] 王波,彭华,宋文正. 一种用于高速率 QPSK 信号的并行解调方法[J]. 电讯技术, 2009, 49(2):55 – 59.
WANG Bo, PENG Hua, SONG Wen – zheng. A Parallel Demodulation Method for High – rate QPSK Signal[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(2):55 – 59. (in Chinese)
- [6] 王磊,徐大专. Gardner 算法在 OFDM 采样率同步中的应用[J]. 电子与信息学报, 2011(4):864 – 868.
WANG Lei, XU Da – zhuan. The Application of Gardner Algorithm to Sampling Rate Synchronization in OFDM Systems [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011 (4):864 – 868. (in Chinese)
- [7] 李滚,王瑞红,秦开宇,等. 一种改进的定时恢复方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(7):46 – 50.

LI Gun, WANG Rui - hong, QIN Kai - yu, et al. An improved timing recovery method[J]. Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23 (7) :46 - 50. (in Chinese)

[8] 张公礼. 全数字接收机理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 79 - 82.

ZHANG Gong - li. Theory and technology in all - digital receivers[M]. Beijing: Science Press, 2005: 79 - 82. (in Chinese)

作者简介:

张莉莉(1988—), 女, 四川绵阳人, 2009 年于电子科技大学获电子信息工程专业学士学位, 现为硕士研究生, 主要研究方向为高速实时信号处理;

ZHANG Li - li was born in Mianyang, Sichuan Province, in

1988. She received the B. S. degree from University of Electronic Science and Technology of China in 2009. She is now a graduate student. Her research direction is high - speed and real - time signal processing.

Email: zhanglili333@163.com

贺知明(1972—), 男, 湖南宁乡人, 2003 年获博士学位, 现为电子科技大学教授、博士生导师, 主要从事雷达信号处理和数字化接收机相关工作。

HE Zhi - ming was born in Ningxiang, Hunan Province, in 1972. He received the Ph. D. degree in 2003. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns radar signal processing and digital receivers.

Email: zmhe@uestc.edu.cn

《电讯技术》征稿启事

《电讯技术》(月刊)创刊于 1958 年, 由中国西南电子技术研究所主办, 系国内外公开发行的、理论与应用相结合的综合性电子专业科技刊物, 为中文核心期刊。目前, 已被英国 IEE《科学文摘(SA)》INSPEC、美国《剑桥科学文摘(CSA)》、波兰《哥白尼索引(IC)》等国外知名数据和国内多个中文数据库收录。

本刊主要刊登涉及下列应用方向和技术领域的述评、论文、新概念新技术新产品介绍:

- 电子系统工程 • 通信 • 导航 • 识别
- 飞行器测控 • 卫星应用 • 雷达 • 信息战
- 共性技术(包括天线、射频电路、信号处理、信息处理、监视与控制、时间与频率、先进制造、电磁兼容等)。

本刊栏目有: 系统总体、信号与信息处理技术、计算机、网络及其应用技术、信道技术、先进制造技术、基础技术与工程应用、仿真、测试与试验、述评与展望。

欢迎业内学者、专家及科技人员踊跃投稿。

来稿要求及注意事项:

(1)文稿务必主题明确, 论述合理, 逻辑严谨, 数据可靠, 叙述清楚, 文字精炼。内容应保守国家机密, 并提供所在单位的保密审查证明, 引用他人作品应给出来源。

(2)文稿一般不应超过 6 000 字, 综述稿不超过 8 000 字。稿件应附英文题名、作者名、单位名、摘要和关键词, 基金项目应注明项目编号。中文题名一般不超过 20 个汉字, 必要时可加副标题。

(3)摘要应包括目的、方法、结果和结论四要素, 即用简洁的语言说明文章要解决的问题, 主要工作过程及所采用的技术手段和方法, 研究所获得的实验数据、结果及其意义。篇幅以 200 ~ 300 字为宜。

(4)关键词以 3 ~ 8 个为宜。为便于文献检索, 应尽可能根据《中国图书馆分类法(第四版)》提供中图分类号。

(5)文中涉及的物理量和计量单位应符合国家有关标准。计量单位请用 GB3100 - 3102 - 93《量和单位》规定的法定计量单位。注意区分各物理量符号的文种、大、小写、正斜体(矢量和矩阵用黑斜体)、上、下角标等。

(6)插图和表格只给出必要的, 且应有图题和表题。插图最好采用计算机制作。照片以黑白为佳, 也可采用扫描的电子文档(精度高于 400 dpi, tif, jpg, psd 等格式均可)。

(7)文稿中引用他人的成果, 务请写明原作者姓名、题名、来源, 一并在参考文献中给出, 并在正文中相应位置进行标示, 否则责任由来稿人自负。参考文献只择主要的, 未公开发表的文献请勿列入参考文献。书写格式请参见 GB/T 7714 - 2005 文后参考文献著录规则。

(8)投稿邮箱: dxjs@china.com, 并尽量同时提供 Word 和 pdf 文档, 无需另寄打印稿。来稿请注明作者详细通信地址、联系电话和有效电子邮箱, 并注明拟投栏目。

(9)本刊编辑部将在 3 个月之内对来稿作出取舍, 如逾期未收到处理意见或刊用通知, 作者有权对稿件另行处理。稿件一经刊用, 本刊将酌情从优支付稿酬并赠送当期样刊, 本刊支付的稿酬中已包含作者著作权使用费。请勿一稿多投, 否则后果自负。