

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.02.006

引用格式:郑长刚,黄智刚,康成斌.导航卫星发射端多径的高精度测量技术[J].电讯技术,2016,56(2):145-150. [ZHENG Changgang, HUANG Zhigang, KANG Chengbin. High precision measurement of multipath for emission platform of navigation satellite[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(2):145-150.]

导航卫星发射端多径的高精度测量技术*

郑长刚**^{1,2}, 黄智刚¹, 康成斌³

(1. 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100011; 2. 北京市第十三中学, 北京 100009;
3. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘要:针对国内外学者关于星体是导致“北斗”卫星码载波偏差随观测仰角存在相关性的主要原因的怀疑,提出了一种导航卫星发射端星体多径的高精度测试方法。利用连续频率调制信号的时域合成,获得窄时域脉冲,通过时域窗函数截取多径信号,从而获得多径的高精度延时和幅度。理论分析和试验验证表明:所提方法简单有效,获得了较高的时域分辨性能和测量精度,由此得出了导航卫星星体多径不是产生码载波偏差主要原因的结论。

关键词:导航卫星;发射端;多径测量;码载波偏差

中图分类号:TN966 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2016)02-0145-06

High Precision Measurement of Multipath for Emission Platform of Navigation Satellite

ZHENG Changgang^{1,2}, HUANG Zhigang¹, KANG Chengbin³

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Beijing No. 13 High School, Beijing 100009, China;
3. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In view of the scholars' review that satellite is the main cause of correlation between divergences of code-carrier of BD satellites (BDS) and observation angle, a high precision method of measuring multipath caused by satellite is presented. This method gets narrow time pulse by using continuous frequency modulated signal, and acquires interested multipath signal by time domain window function, in order to obtain the high precision time delay and intensity of multipath signals. By theoretical analysis and test verification, the method is proved to be simple and effective, and high performances of time domain distinguishment and measurement precision are achieved. Based on the method, the conclusion is drawn that multipath of satellite is not the cause of the divergences of code-carrier.

Key words: navigation satellite; emission platform; measurement of multipath; code-carrier divergence

1 引言

“斗卫”导航系统(BD Satellite System, BDS)包括 14 颗中高轨道卫星(Medium Earth Orbit, MEO)、5 颗倾斜轨道同步卫星(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO)和 5 颗静止轨道卫星(Geosyn-

chronous Earth Orbit, GEO), 播发的 B1、B2 和 B3 3 路导航信号被全球各地多模全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)接收机接收和分析研究。Hauschild、Perello Gisbert 和 Montenbruk 等人发现 BDS 存在码-载波偏差(同一颗卫

* 收稿日期:2015-11-18;修回日期:2016-01-14 Received date:2015-11-18;Revised date:2016-01-14

** 通信作者:zhjinjun@vip.sina.com Corresponding author:zhjinjun@vip.sina.com

星播发的伪码相位与载波相位之差)变化,偏差值与观测仰角存在相关性,变化范围约 1 m。由于该偏差值基于遍布全球的不同类型接收机观测数据而获得的^[1-3],因此被认为是与卫星密切相关。德国人 Wanninger^[4]分别给出了 BDS 中 MEO 和 IGSO 卫星的码-载波偏差修正模型,该模型分别适用于所有 MEO 卫星和 IGSO 卫星。类似的码-载波偏差曾经在 GPS SVN49 卫星上出现过,GPS 确认是由于卫星内部信号反射引起的码多径导致^[5]。

本文研究卫星星本体多径的高精度测试方法和技术,利用 BDS 卫星模型进行多径模拟测试试验,掌握 BDS 卫星星体多径数据,进而给出码-载波偏差与星体多径的关联性。基本思路是先梳理多径测量方法,识别出适用于卫星发射端的,并针对卫星测量条件进行改进,提高测量精度;然后,根据 BDS 系统 MEO 卫星星表技术状态,建立物理模型和试验环境,验证卫星多径影响,导出与码-载波偏差的关联性;最后,针对卫星提出消除自身多径的建议。

2 多径测量方法

多径测量一般采用时域脉冲法^[6]、多径估计法^[7]和零值法。时域脉冲法是在地面对星表多径测量较为简便的方法,但由于超窄带的时域脉冲在频域上将呈现超宽带特性,受信道特性影响较大,在高精度测量中的实用性受到限制。多径估计是利用卫星发播的导航信号,地面接收机接收后通过各种估计算法获得多径的估值,一方面估值精度与信号带宽、估值算法密切相关,另一方面无法排除环境和地面设备硬件的影响,不宜采用。零值法是通过检测接收机伪距测量扣除真实距离后的零值和的变化来判断多径效应的变化,零值的稳定性决定了多径效应变化的分辨率,且受时钟影响较大,也不宜采用。

本文提出一种改进的测量方法,采用连续频率调制信号进行时域合成,规避信道特性不理想的影响,从而获得超窄带时域脉冲,获得高精度的多径测量数据。

2.1 信号模型与时频处理

假设卫星发播信号为 $s(t)$,那么接收到的多径信号可表示为

$$x(t) = s(t) \times h(t) + n(t) \quad (1)$$

式中: $h(t) = \sum_{i=1}^M a_i \delta(t - D_i)$, M 为路径总个数, D_i 和 a_i 分别为第 i 个路径的时延和幅度因子; $n(t)$ 为窄带高斯白

噪声,方差为 σ_w^2 。假设 $D_1 < D_2 < \dots < D_m$,则令 $D_1 = 0$, $a_1 = 1$,为直达信号。由于信道衰减, $a_{i(i \neq 1)} < 1$ 。

仅考虑星表多径影响,可忽略卫星导航信号星上内部生成过程中反射多径。采用连续频率调制信号作为发播信号,即

$$s(t) = a(t) e^{j\varphi(t)} \quad (2)$$

式中: $a(t)$ 为瞬时幅度; $\varphi(t)$ 为瞬时相位,其瞬时频率 $\omega(t) = d\varphi(t)/dt$,扫频速率 $v = d\omega/dt$,起止频率分别为 ω_L 和 ω_H 。

假定扫频过程为平稳随机状态,将接收到的信号在时间尺度上叠加,则可认为发播信号在频域上表现为宽带矩形脉冲信号,叠加的时域信号表现为 sinc 函数,如图 1 所示。



图 1 时间尺度叠加后信号的时频特性

Fig. 1 Time-frequency characteristic of signal overlaying time information

如果在时间尺度上覆盖了起止频率,则合成信号的带宽最宽,此时,获得的时域脉冲宽度最窄。当脉冲宽度足够小,则可以分辨出多径信号中的所有时延因子,实现高精度的多径测量。

该方法要求扫频过程平稳、信道为宽带,但由于实际信道特性一般是带限且有带内非平坦,导致实际收到信号是理想信号通过了一个有色信道。设有有色信道传递函数为 $H(t)$,则有

$$x(t)' = a(t) e^{j\varphi(t)} \times H(t) \times h(t) + n(t) \quad (3)$$

此时,需要对信道进行白化,发播信号通过一个预失真滤波器,预失真滤波器的传递函数为 $H^{-1}(t)$ 。此时,可以获得预期的接收信号:

$$x(t)'' = a(t) e^{j\varphi(t)} \times H^{-1}(t) \times H(t) + n(t) = x(t) \quad (4)$$

多径信号从主信号中分离出来后,通过时间域门函数可将多径信号提取。对多径信号作傅里叶变换,得到多径信号的频域函数 $F(\omega)$,即可获得关心频率对应的多径信号强度。

2.2 测试方法及验证

利用信号源发射线性调频信号为多径测试信号,经发射天线发射后,主路径信号和多径信号被接收天线接收,利用幅相检测接收机检测宽带扫频信号在不同频点的幅度和相位,对数据进行反傅里叶

变换时域合成, 从而分辨出多径信号时延和相对主信号强度。测试系统示意如图 2 所示。

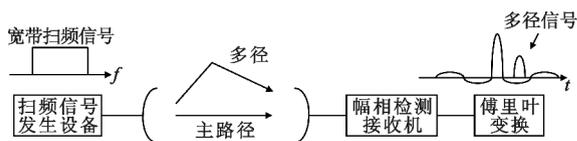


图 2 多径信号测试系统

Fig. 2 Measurement system for multi-path signal

对测试方法和所采用技术进行桌面有线试验验证, 构建试验框图如图 3 所示。

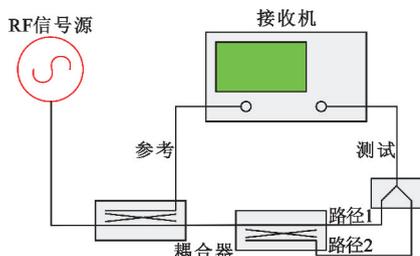


图 3 桌面有线试验

Fig. 3 Experiment of desktop test

试验前采用矢量网络分析仪对路径 1 与路径 2 时延差和损耗差进行标定, 路径 1 与路径 2 时延差约 2.35 ns, 路径 1 与路径 2 损耗差约 19.4 dB。分别采用 15 ~ 20 GHz 和 8 ~ 20 GHz 两种扫频信号带宽进行试验, 得到的结果如图 4 所示, 具体数据见表 1。

表 1 接收不同扫频信号的多径估计值

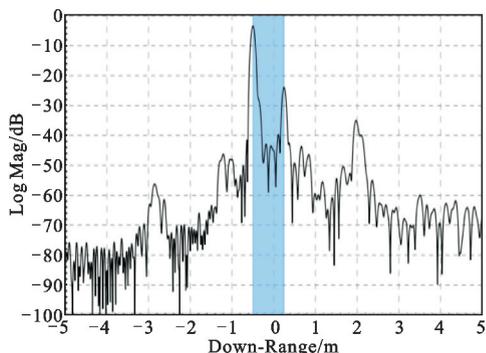
Tab. 1 Value of assessment of multipath to different scanning signals

扫频/GHz	路径 2 相对路径 1 的时延/ns			路径 2 相对路径 1 的强度/dB		
	理论值	实测值	差值	理论值	实测值	差值
15 ~ 20	2.35	2.20	0.15	2.35	2.30	0.05
8 ~ 20	19.40	18.00	1.40	19.40	18.80	0.60

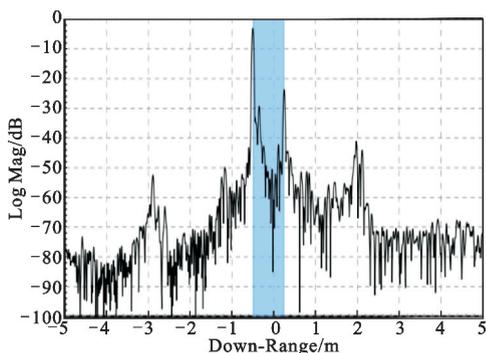
表 1 数据显示利用扫频法进行测试的结果与用矢网标定的结果一致, 时延测试误差在 0.15 ns 以内, 强度误差在 1.5 dB 以内。

3 测试试验

星体模拟件放置在微波暗室的转台上, 利用平面近场构建远场条件^[8], 根据天线的收发互易特性, 星上导航信号发射天线接收测试信号, 形成多径测试系统, 如图 5 所示, 通过转动转台模拟不同用户的观测方位, 获取各个方向的测量数据。



(a) 接收 15 ~ 20 GHz 扫频信号时域数据



(b) 接收 8 ~ 20 GHz 扫频信号时域数据

图 4 不同扫描带宽的试验结果图

Fig. 4 Result of different bandwidth of scanning

由图 4 可见, 当扫频带宽足够宽时, 可在时域上将不同延的多径信号分离, 带宽越宽, 分离精度越高。

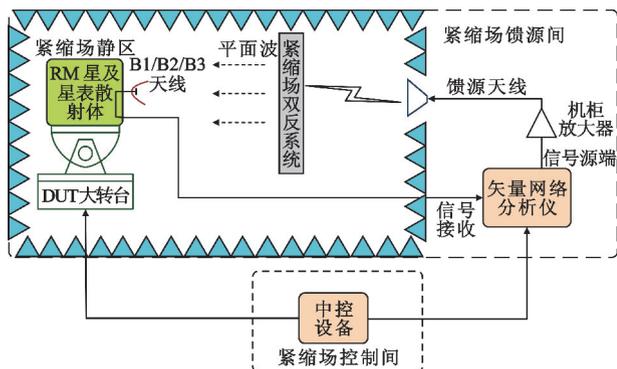


图 5 暗室扫频测试系统示意图

Fig. 5 Diagram of test system for frequency scanning in unreflected chamber

试验前,在微波暗室利用标准喇叭天线替代模拟件进行暗室环境多径测试,用于消除环境对测试结果的影响。

为测试星体安装面及安装其上的其他设备对 B1/B2/B3 天线的影响,最好是先能够独立对导航信号天线进行多径测试,获取基础数据。但由于无法保证天线安装到星体模拟件后与原状态位置完全一致,需要采取其他不影响状态的办法达到相应的效果。

采用星体突出物包敷吸波材料方法,获取削弱星体安装面影响的多径测试数据,将该数据作为基础数据与不包敷时测试结果对消,即可得到星体对 B1/B2/B3 天线多径环境的影响。

按照上述步骤,分别测得暗室环境、包敷吸波材料和未包敷吸波材料 3 组数据。利用第一组数据检查环境多径大小,相对强度均在 -60 dB 以下,可忽略。通过第三组数据与第二组数据做差,获得星体引入的多径数据,如图 6 所示。

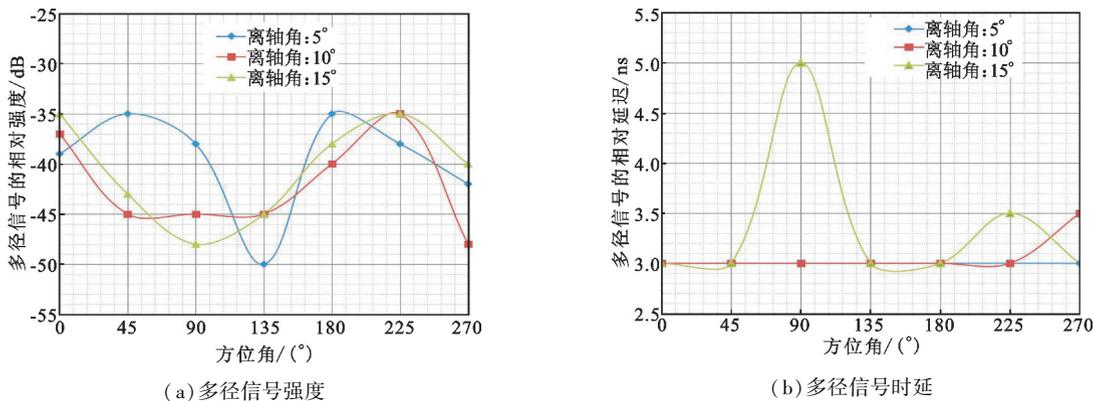


图 6 做差处理后的多径信号与方位角关系
Fig. 6 Correlation between multipath signals after subtraction and azimuth angle

数据处理结果表明,最强的多径信号出现在延迟 3 ~ 5 ns 的位置,其强度远远小于主信号,相对强度均在 -34 dB 以下。多径与 B1/B2/B3 天线的方位角和离轴角没有明显的关联性,仅在高离轴角时存在时延的波动。

在多径信号强度较弱的时候,由于两次测量存在各自独立的测量误差,做差处理会引入随机误差的叠加,表现为系统性的多径误差淹没在噪声中,导致处理后数据的不可信。因此,仍需要针对测量原

始数据进行独立分析。

同时,采用吸波材料包敷并非理想,材料对该频段信号的衰减不大会导致系统性的多径数据被抵消,导致做差处理后数据结果偏离真实情况。因此,需要对两组原始数据进行独立分析。

提取方位角为 0°、5° 和离轴角为 45°、5° 两种状态的原始测量数据,如图 7 所示,均显示在 5 ns 左右有较强多径信号,相对强度最大为 -28 dB,与做差处理后数据相比更加可靠。

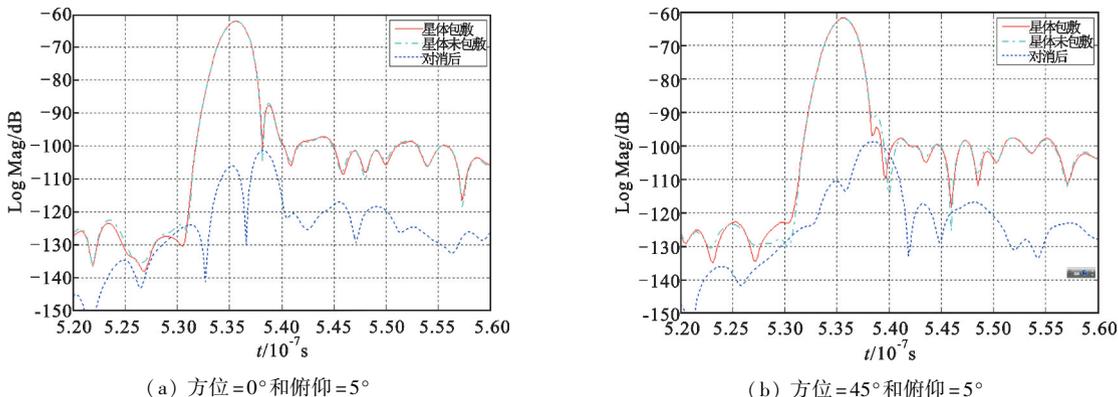
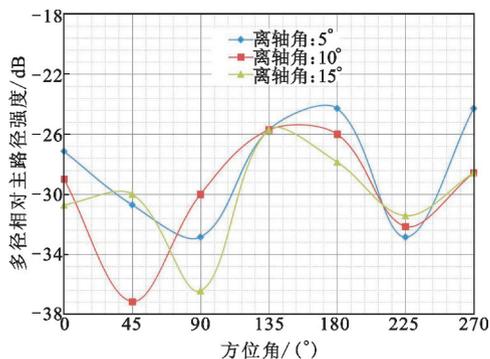


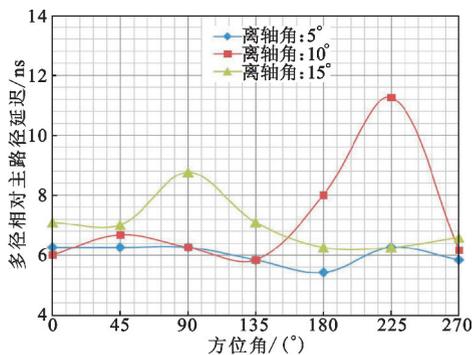
图 7 星体多径测试结果时域图
Fig. 7 Time domain result of multipath test for satellite

重新对未包敷吸波材料的数据进行分析,针对

所有方向的原始数据进行处理,结果如图 8 所示。



(a) 多径信号强度



(b) 多径信号时延

图 8 第三组数据的多径信号与方位角关系

Fig. 8 Correlation between multipath signals and azimuth angle of the third set of data

第三组数据的处理结果与做差结果存在一定差异,如表 2 所示。由表 2 可知各方向最强多径信号

的相对强度均值增加了 12 dB。

表 2 不同测试数据处理方法结果

Tab. 2 Result of different data processing methods

类别	相对时延参数/ns				相对强度参数/dB			
	最大值	最小值	均值	方差	最大值	最小值	均值	方差
第三组数据处理结果	11.20	5.40	6.60	1.30	-22.9	-37.1	-29.0	3.9
两组数据做差处理结果	5.00	3.00	3.15	0.45	-35.0	-50.0	-41.0	4.8

尽管星体多径强度相对主径的绝对数值较小,但可能会对用户产生一定影响,需要进行评估。人为产生不同强度的多径信号,利用基于标准处理算法的地面终端进行接收,不做多径抑制处理,结果显示:当多径信号相对强度达到-20 dB时,仅会引起伪距测量数据发生6 cm的变化,不会导致接近1 m的码载波偏差变化。可见,星体多径不是产生码载波偏差随观测仰角变化的主要原因。

4 结束语

本文利用连续频率调制信号时域合成所获得的窄时域脉冲实现了导航卫星发射端多径的高精度测量,可以达到亚纳秒级时域分辨性能和2 dB以内的测量精度;通过对模拟星体的高精度多径测量,发现尽管卫星可能是导致码载波偏差随观测仰角存在相关性的原因,但星体反射多径不是其主要成因;同时,也注意到星体多径是存在的,会引起高精度用户

伪距测量精度产生厘米级的系统偏差,该误差呈现系统特性,是可以消除的。由于试验采用的是模拟件,无法直接对码载波偏差进行测量,如能够对真实卫星产品在地面进行测量,将能够给出码载波偏差是否与卫星直接关联的结论,并对其他可能产生码载波偏差的可能,如星上天线辐射特性随观测仰角变化情况,进行测量。建议卫星研制方下一步深入开展相关工作。

参考文献:

[1] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O, SLEEWAEGEN J M, et al. Characterization of compass M-1 signals[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 117-126.

[2] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O, THOELERT S, et al. A multi-technique approach for characterizing the SVN49 signal anomaly, part I: receiver tracking and IQ constellation[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 19-28.

[3] GISBERT J V P, BATZILIS N, RISUENO G L, et al. GNSS payload and signal characterization using a 3m

dish antenna [C] // Proceedings of the 25th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). Nashville, TN: ION, 2012; 347-356.

- [4] WANNINGER L, BEER S. BeiDou satellite - induced code pseudo-range variations; diagnosis and therapy [J]. GPS Solutions, 2015, 19(4): 1-10.
- [5] SPINGER T, DILSSNER F. SVN49 and other GPS anomalies [J]. Inside GNSS, 2009(1): 32-36
- [6] 陈祝明, 丁义元, 向敬成. 采用 Chirp-Z 变换提高 LFM CW 雷达的测距离精度 [J]. 信号处理, 2002(2): 110-112.
CHEN Zhuming, DING Yiyuan, XIANG Jingcheng. Improving range precision of LFM CW radar by Chirp-Z transform [J]. Signal Processing, 2002, 18(2): 110-112. (in Chinese)
- [7] 李林, 姬红兵. 基于 L-Wigner 分布的多径 ESM 信号估计 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(11): 2618-2621.
LI Lin, JI Hongbing. Estimation of multipath ESM signals based on L-Wigner distribution [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(11): 2618-2621. (in Chinese)
- [8] 刘庆云, 陆飞飞, 朱伟强, 等. 辐射源细微特征用于个体识别的可行性分析 [J]. 航天电子对抗, 2008, 24(2): 40-42.

LIU Qingyun, LU Feifei, ZHU Weiqiang, et al. Feasibility analysis of emitter identification based on emitter fine feature [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2008, 24(2): 40-42. (in Chinese)

作者简介:



郑长刚(1998—),男,江苏人,主要研究方向为通信与电子技术和测量技术;

ZHENG Changgang was born in Jiangsu Province, in 1998. His research concerns communication and electronic technology, and measurement technology.

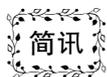
Email: zhjinjun@vip.sina.com

黄智刚(1962—),男,博士,教授,主要研究方向为通信与信息系统技术;

HUANG Zhigang was born in 1962. He is now a professor with the Ph. D. degree. His research concerns communication and information system technology.

康成斌(1981—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为通信与电子技术。

KANG Chengbin was born in 1981. He is now a senior engineer with the Ph. D. degree. His research concerns communication and electronic technology.



关于《电讯技术》投稿的重要说明

为了规范投稿,保证“双向匿名审稿”的顺利实施,特作如下说明:

(1)稿件需自行脱密处理,在初审阶段不需要向编辑部提供相关材料;

(2)投稿流程中必填项必须准确、完整填写,“备注”栏可填写与所投稿件或作者相关的说明;

(3)作者提供的信息必须真实,不得存在学术不端行为,欢迎广大作者和读者监督,一经查实,将严肃处理;

(4)本刊对稿件排版格式没有特别要求,但可参照本刊已发表论文格式或数字优先出版模版(可在本刊网站“相关下载”栏目下载)编写;

(5)来稿送审时,编辑部将删除稿件中所有作者及其单位或机构信息,但投稿时仍需提供完整信息;

(6)如推荐审稿人,请务必将其信息准确、完整填写,无 email 的审稿人信息无效。

本刊编辑部从未委托任何机构或个人代理征稿事宜,请勿上当!

非本刊网站 www. teleonline. cn 投稿一切与本刊无关!

本刊编辑部