基于小波分析的 BOC信号抗多径码相位估计

朱 笛 申功勋

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 卫星导航接收机需要精确地估计扩频信号的码相位并进行跟踪,估计的精度直接影响伪距测量的精度. 卫星信号的多径传播使得简单的相关器估计存在较大的误差,针对未来导航系统普遍采用的 BOC(Binary Offset Carrier)导航信号,提出了一种基于小波分析的估计算法来抑制多径误差,仿真的结果表明该算法比传统的窄相关和双 Delta技术在性能上有很大的改进.并证明了在采用 Haar小波时,该技术与相关器估计方法在极限条件下是等价的,同时该方法的算法复杂度比基于最大似然估计的方法 MMT(Multipath Mitigating Technique)要低.

关 键 词: 卫星导航; 小波分析; 多径衰落

中图分类号: V 249.36

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)07-0828-05

BOC signal multi-path mitigation technique based on wavelet analysis

Zhu Di Shen Gongxun

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Satellite navigation receives requires to tracking code phase of satellite's signals precisely because it affects the precision of pseudo-range directly. However, the multi-path effect introduces quite big errors to the traditional delay locked loop(DLL)-based estimators. An algorithm of multi-path mitigation by the method of wavelet analysis was proposed. The algorithm was formulated in detail. Simulation shows that it greatly improves the estimation performance of code phase compared with narrow correlator and double delta technique. Under certain extreme condition, this technique is equivalent to correlator method when Harr wavelets are adopted. The computation complexity is much lower than multipath mitigating technique(MMT) technique which is based on mostly likelihood method.

Key words: satellite navigation; wavelets analysis; multipath fading

卫星导航接收机的定位精度取决于对直达信号的相位跟踪精度.多年来许多研究工作都在关注于分析和减小相位跟踪误差,而在诸多的误差源中,多径传播引起的误差是最为显著的.一旦某些多径信号成分相对于直达信号的延迟在正负 1个码片之内,就会对伪距的测量带来较大的误差,这个误差在严重的情况下可以使卫星接收机定位精度降低 50~100m.

过去已经提出了很多抗多径的码相位跟踪算法.首先提出的是窄相关技术,该技术也是基于传统的 DLL(Delay Locked Loop)延迟锁定环,仅在其基础上减小了超前支路和滞后支路之间的相位间距,故被称之为窄相关技术.该技术并不直接抑制多径误差,而是使本地信号跟踪在更靠近相关峰的相位点上以减轻对多径分量的敏感度,因而效果较差.随后,一大类被称之为双 Delta或 ELS(Early-Late Slope)的相关器技术被提出,并得到了商用接收机的广泛应用[1-3],这类技术通过采用更多的相关器,获得对接收信号更多延迟点的相关测量,根据多个延迟的相关度量来拟合出直达路径延迟估计.新一代卫星导航系统如伽利略和 GPS-II普遍采用了宽带的 BOC(Binary Offset

收稿日期: 2008-06-17

作者简介: 朱 笛(1977-),男,山东嘉祥人,博士生, andy_zhudi@yahoo.com.cn.

Carrier)卫星测距信号,这些测距信号的相关峰非常陡峭并且在一个码片距离内有多个自相关峰,从而使得双 Delta这类技术效果不好. 另外,双 Delta技术对非常接近直达信号的多径分量造成的误差不能很好的抑制.

最近,文献[4- 5]对卫星导航多径误差抑制进行了详细的理论分析,并提出了一种 MMT (Multipath Mitigating Technique)算法,该算法实质是基于最大似然参数估计算法的,需要大量的信号互相关计算,复杂度很高. 为了简化计算,它使用了一种波形压缩技术来快速计算相关测量,但仍需要大量的矢量计算来获得估计结果,而且它要对信号中所有多径分量都进行估计才能获得直达路径的相位延迟,当在严重的多径环境中,需要估计更多的多径支路参数,计算复杂度会倍增,工程实现难度大.

在接收机的伪距测量中,其实并不需要估计出每个多径分量的延迟参数,只需对直达路径的延迟进行估计. 针对这一特征,本文提出了一种采用小波分析技术估计直达路径相位延迟的方法,该方法对 GPS BPSK 和伽利略导航系统的 BOC信号都适用.

1　BOC信号特征与 DLL相关技术

传统的 GPS信号采用直接序列扩频调制技术,并使用 BPSK进行符号映射,这使得基带信号的自相关函数具有三角形的形状. 而 Galileo卫星导航系统的 L1信号采用了 BOC(1, 1)作为扩频调制信号, BOC使用方波作为子载波与扩频码调制,扩频码的跳变沿与方波的跳变沿对齐,这样子载波频率和和扩频码率就成整数比例,且都是某一基本频率 f_0(GPS和伽利略都使用 f_0 = 1. 023 MHz)的倍数,一般表示为 BOC(x, y), x 表示作为子载波的方波的频率为 $x\cdot f_0$ MHz, y 表示扩频码片速率为 $y\cdot f_0$ MHz

子载波信号由于是方波可以写成

$$\mathrm{sign}(\sin(2\pi\cdot xf_0t)) \tag{1}$$

BOC基带调制信号可以表示为

$$f_{BOC} = m(t)\,\mathrm{sign}(\sin(2\pi\cdot xf_0t)) \tag{2}$$

式中, $m(t)$是码片速率为 $y\cdot f_0$ 的扩频码信号. 一个周期的扩频码信号可以表示为

$$m(t) = \sum_{k=0}^{N-1}\varepsilon_k c(t - kT_c) \tag{3}$$

式中, N 表示扩频码的长度; ε 表示扩频码极性,即 + 1或 - 1; T_c表示一个码片时间; c表示一个码片的波形信号,也就是子载波信号,对于 BOC(1, 1)就是一个周期的方波,它包含一个从 - 1到 + 1的跳变. BOC(1, 1)信号不同于传统 GPS信号的相关函数,它有多个相关峰,从而用 DLL进行相位跟踪的时候也有多个稳定点,一旦跟踪到错误的稳定点上,就会造成巨大的测距误差. 这种自相关函数的差异如图 1所示.

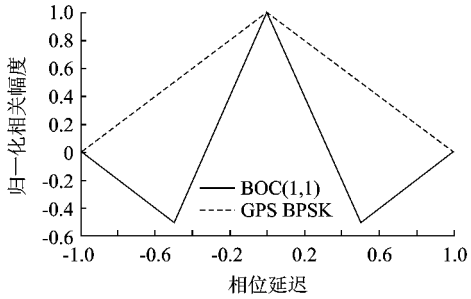

图 1　BOC信号的自相关函数

经典的 DLL码跟踪环在本地产生 3个不同延迟的复现码(超前,准时和滞后),并通过 3个相关器与接收信号相关. 相关后的结果用于检测准时码相对于接收信号的相位偏差. 当码跟踪环锁定以后,超前码比接收信号提前 d/2个码片,滞后码比接收信号滞后 d/2个码片,而准时码恰好与接收信号准确对齐. 此时, 3个相关器获得了图 1虚线所示相关函数的采样. 在没有多径的理想情况下,由于相关函数左右对称,超前和滞后相关器的差值应该为 0,如果不为 0, DLL就用这个差值去调整码发生器的相位,从而迫使准时码与接收信号对齐.

然而在存在码片内多径的情况下,多径叠加的伪随机码信号使得相关函数不再对称,这使得经典的 DLL方法有较大的跟踪误差. 为了克服多径误差给 DLL码跟踪环带来的影响,人们提出了双 Delta和 ELS技术. 双 Delta和 ELS在算法的原理上是等价的. 他们一般都采用 4个相关器,从而获得更多的相关函数的采样. 根据这些采样通过类似下式计算码相位的偏差:

$$\left.\begin{aligned}\theta_1 &= (y_3 - y_1)/(x_3 - x_1)\\ \theta_2 &= (y_4 - y_2)/(x_4 - x_2)\\ p &= ((y_2 - y_1) - 2(y_3 - y_4))/(\theta_1 - \theta_2)\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式(4)就是双 Delta码相位计算公式, x_1, x_2, x_3, x_4 分别是 4个相关器的本地码相对于接收信号的相位差,比如它们可以取(- 1/2, - 1/4, 1/4, 1/2),其单位为一个码片时间; y_1, y_2, y_3, y_4 分别是相关器的输出, p 即为估计的码相位误差. 然而这些算法结果里仍然有较大的多径跟踪误差,特别是当多径分量与直达分量的距离很近的时候. 另外由于 BOC(1, 1)信号有多个相关峰,该方法容易跟

踪到副峰上. 综上可见, GNSS接收机码相位跟踪算法必须能很好地解决如下问题:

1) 能消除多个相关峰造成的码跟踪失锁;

2) 能高效抑制多径造成的码相位测量误差;

3) 有非常低的计算复杂度.

2 估计信号相位延迟的小波方法

2.1 卫星信号的多径模型与小波分析原理

GNSS卫星信号经过载波剥离后, 其基带信号模型为

$$s(t) = \sum_k a_k e^{j(\theta_k + \Delta\omega_k t)} f_{BOC}(t - \tau_k) + w(t) \quad (5)$$

式中, k表示各路多径分量; a是信号幅度; θ为载波相位差; $\Delta\omega$为多谱勒频率残差; f为 BOC基带调制信号; w 为噪声; τ为信号传播相位延迟, 其中 τ_1为直达路径的延迟, 需要对它进行精确的估计以进行伪距测量, 也就是估计的目标参数.

关于多径抑制的算法中, 最大似然多径估计是当前最好的算法之一, 是由文献[3]最早于2002年提出的, 并称之为 MMT, 近几年又有很多将之延伸的研究. 在文献[3]所提出的 MMT技术中, 为了加速相关计算, 采用了一种波形压缩方法. 该方法把数字基带信号的采样序列进行折叠, 然后累积成一个短矢量, 折叠是根据伪随机码的周期进行的, 即按照周期的整数倍进行折叠. 压缩所形成的短矢量中去掉了大量的信道噪声, 从而能够精细的刻画 NRZ波形的边沿变化.

在这些波形的变化细节中包含了码相位信息. MMT技术是通过最大似然参数估计方法来计算波形中的多径分量参数的. 而本文通过采用小波分析的方法, 从压缩波形中提取直达信号的精确相位, 从而能够抑制多径带来的跟踪误差, 并且本文的方法具有非常低的计算复杂度, 同时推导表明传统的相关器方法不过是 Haar小波分析方法的一个粗略近似.

在 BOC(1, 1)信号中, 每个码片调制了一个周期的方波, 由于方波信号有一个电平跳变沿, 该跳变沿发生的位置变化反映了码相位的变化. 对数字基带信号以码片为单位进行折叠并压缩, 形成时间间隔为一个码片的波形矢量, 并且恰好包含一个方波周期. 如果本地码相位与接收信号是严格同步的, 那么直达分量的方波的跳变沿应该在矢量的正中间. 由于多径分量总是延迟于直达信号, 因而他们的跳变会出现在直达信号的后面, 并且幅度也低于直达信号. 由此可见, 从压缩波形中可以检测直达信号的相位并方便地祛除多径带来的影响.

问题的关键就变成如何检测直达信号方波跳变沿的位置, 也即检测波形中的奇异点. 而小波分析因在时域和频域上同时具有良好的局部化性质, 能同时获得时域和频域的信息, 所以是一种较好的奇异信号检测方法. 函数存在无限次可导就称为光滑或没有奇异性, 若函数在某处有间断点或某阶导数不连续, 通常叫做函数的奇异性, 常用李普希兹指数来表示. 李氏指数的的定义为

定义 1 设 n是一非负整数, $n < \alpha \leqslant n+1$, 如果存在两个常数 A 和 $h_0 > 0$, 及 n 次多项式 $P_n(h)$, 使得对任意的 $h \leqslant h_0$, 均有

$$|f(x_0 + h) - P_n(h)| \leqslant A|h|^{\alpha} \quad (6)$$

则称 $f(x)$在点 x_0为李氏指数 α.

李氏指数越大, 函数越光滑. 函数在一点连续、可微, 则在该点的李氏指数为 1; 在一点可导, 而导数有界但不连续时, 李氏指数仍为 1. 如果 $f(x)$在 x_0, 李氏指数小于 1, 则称函数在 x_0点是奇异的. 一个在 x_0 不连续但有界的函数, 该点的李氏指数为 0. 如果在 x_0的某一邻域内有:

$$|W_f(s, x)| \leqslant |W_f(s_0, x_0)|$$

则称 (x_0, s_0) 为模极大点, 式中 W 表示小波变换. 若在二维相平面 (x, s) 上的某一曲线都是模极大值点, 则称该曲线为极大值线. 极大值线上的小波模值和 x_0点上的李普希兹指数存在关系: $|W_f(s, x)| \leqslant ks^{\alpha}$, k为正整数, 当 $s \to 0$时, 极大值线上的 $x \to x_0$, 因而由极大值线模值变化率和时间坐标的渐进性可确定相应奇异点的位置 x_0和 α. 因此对于离散的基带信号, 计算 BOC方波跳变沿位置就可以近似为计算一阶小波变换的极大值点.

2.2 基于小波分析的延迟估计算法

1) 首先对基带信号 $s(t)$进行压缩:

第 1)步与文献[4-5]的方法相同. 忽略载波相位差和频率误差, 对长度为一个伪随机码周期的信号进行压缩, 压缩后的基带信号可以表示为

$$r(t) \cong \sum_k a_k \left[\sum_{n=0}^{N-1} \varepsilon_n^2 c(t - \tau_k) \right] + \tilde{w}(t) = \sum_k a_k N c(t - \tau_k) + \tilde{w}(t) \quad (7)$$

式(7)表明, 压缩计算对噪声进行了抑制, 同时对淹没在噪声中的调制信号进行了放大. 这类似于传统的扩频信号的解扩过程, 详细的证明和压缩计算方法见文献[4-5]. 压缩后的信号实际上是一个精细化的子载波信号, 对于 BOC(1, 1)信号, 其时间长度恰好为一个方波周期. 当然在实际实现中, 该信号不是理想的方波, 而是方波与接收低

通滤波器的卷积.

2) 对压缩后的基带信号进行奇异性检测

小波变换是对信号 $r(t)$进行的,变换是为了确定信号小波系数的局部极大线,此时,小波变换可以理解为一个多尺度微分算子,该微分算子可以检测出 BOC(1,1)信号的子载波(单周期方波)的极性跳变点.适合这一功能的小波算子有很多,对于奇异性检测,一般有如下原则:①$\Psi(t)$有紧支集;②$\Psi(t)$连续可微;③$\Psi(t)$有 N 阶消失矩;④$\Psi(t)$具有对称性(由于 BOC用方波作为子载波,必须使用反对称的小波).

同时满足条件①~④的正交小波基是函数奇异性分析的有力工具.高斯小波是常用检测奇异信号的小波基,因为它能保证极大曲线延伸至最细的尺度而不中断,采用高斯函数的小波模极大计算方法如下:

设 $g_s(t)$为一阶高斯小波,它具有 n阶消失矩并具有反对称的波形,压缩后基带信号的小波变换的卷积形式可写为

$$R(u,s) = r(t) \cdot \bar{g}_s(t) = \sum_k a_k N[c(t-\tau_k) \cdot \bar{g}_s(t)] \qquad (8)$$

由于 $c(t)$为一个周期的方波,式括(8)号中其实是其高斯小波变换,其结果为一个凸脉冲.在 k路多径中,直达路径的能量为最大,因此直达路径的相位延迟可以用式(9)估计:

$$\tau_0(s) = \arg\max_{\tau}\{R(u,s)\} \qquad (9)$$

2 3　Haar小波估计与 DLL方法的原理一致性

Haar小波不是连续可微的,但却有计算简单的优势,本文的仿真表明用它进行相位估计仍然有良好的效果,而且如果适当选取 Haar小波的尺度 s,使小波与 BOC(1,1)的一个方波周期具有相同的长度,显而易见,用式(9)计算得到的结果与传统的 DLL是相同的.区别仅在于传统的 DLL由于没有采用压缩信号的相关计算方法,其计算的相关延迟点数更少,从而精确性也差些.因此,在这种极限情况下,两者是等价的.

3　小波分析方法的性能仿真

为评估小波方法对 BOC信号的估计性能,本文采用了两种理论标准.一种是比较经典的多径误差包络方法,另一种是对多径误差包络进行运行平均(running average)[1].后者更加接近信号真实的传播环境,也更有实际意义.

为便于阐述,仍以 BOC(1,1)为例.把本文提出的小波方法与两种传统的抗多径方法进行了对比,这两种方法是窄相关技术和双 Delta技术,双 Delta技术也被称之为 ELS技术.

3 1　多径误差包络分析

多径误差包络分析是一种典型的比较不同估计方法的多径性能的方法.该方法在信号人为插入一个多径分量,然后使用估计方法对信号直达路径进行相位估计,得到一个含有误差的估计包络.将不同的方法得到的包络进行对比,可以清晰地显示出不同方法的性能差异.通常,这个特意插入的分量具有特定的幅度系数.图 2即为对小波方法进行的多径误差包络分析结果.

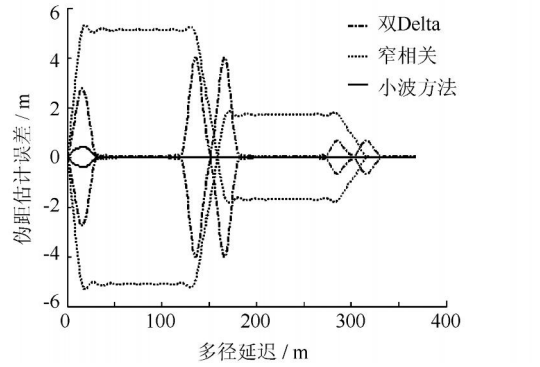

图 2　不同方法的多径误差包络

在分析中,窄相关技术采用了 0.25码片的间隔,双 Delta采用了式(4)的方法,小波方法采用 Haar小波.由图可见,小波方法具有最小的误差包络,在包含多径的信道中,能较大的改进直达路径的相位估计误差.

3 2　多径误差的统计加权分析

另外一种性能评价方法是把多径信道的统计特征考虑进去.这种方法对误差包络进行加权平均,其依据是多径分量的统计分布[1].本文采取以下多径分布模型:

$$D(\tau) = e^{-\frac{\tau}{\tau_0}} \qquad (10)$$

式中,τ_0是某个无线通信环境中的典型路径延迟,取其值为 57m(这是城市无线信道的典型延迟),本文分析的结果见图 3.

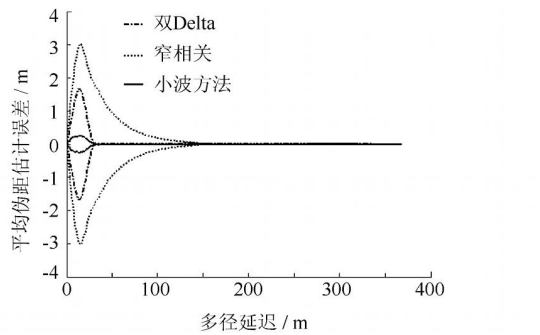

图 3　统计平均的多径误差包络

由图 3可见, 相比传统的两种方法而言, 小波方法在统计平均的仿真结果中仍然具有最小的误差包络, 在当多径分量与直达分量距离十分相近时也有很好的性能.

5 结 论

针对卫星导航定位中的多径误差问题, 本文通过分析多径信号的特征, 提出了一种基于小波分析的多径抑制算法. 全文针对 BOC(1, 1)信号进行了仿真, 并与两种传统的方法进行了对比, 证明了小波方法的有效性. 小波方法不仅能提供更好的性能, 同时具有很低的算法复杂度. 特别是当应用 Harr小波的时候, 与传统的相关器方法相比复杂度相近, 在极限情况下与相关器方法是等价的. 小波相位估计方法通过与波形压缩技术联合使用能更加降低计算复杂度, 与 MMT技术相比更有优势.

参考文献 (References)

[1] Van Dierendonck A J, Fenton P, Ford T. Theory and performance of narrow correlator spacing in a GPS receiver[J]. Journal of the Institute of Navigation, 1992, 39(3): 34-41

[2] Garin L, Van Diggelen F, Rousseau J. Strobe and edge correlator multipath mitigation for code[C]//Proceedings of ION GPS-96. Kansas City: Institute of Navigation, 1996: 657-664

[3] Weill L R. GPS multipath mitigation by means of correlator reference waveform design[C]//Proceedings of the ION 1997 National Technical Meeting. Santa Monica, CA: Institute of Navigation, 1997: 197-206

[4] Weill L. Multipath mitigation using modernized GPS signals: how good can it get[C]//ION GPS 2002. Portland, Oregon: Institute of Navigation, 2002: 24-27

[5] Weill L R. Application of super resolution concepts to the GPS receiver of multipath mitigation problem[C]//Proceedings of the ION 1998 National Technical Meeting. Long Beach, CA: Institute of Navigation, 1998: 673-682

[6] Irsigler M, Avila-Rodriguez J-A, Hein G. Criteria for GNSS multipath performance assessment[C]//Proceedings of ION GNSS 2005. Long Beach, CA: Institute of Navigation, 2005: 104-108

[7] Jones J, Fenton P, Smith B. Theory and performance of the pulse aperture correlator[EB/OL]. Calgary, Alberta, Canada: NovAtel Technical Report, NovAtel, Inc, 2004[2008-06-17]. www.novatel.com/Documents/Papers/PAC.pdf

(责任编辑: 张 嵘)

(上接第 785页)

[2] Achenbach E, Heinecke E. Vortex shedding from smooth and rough cylinders in range of Reynolds numbers of $6\times10^3\leqslant Re\leqslant5\times10^6$[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981, 109: 239-251

[3] Lazos B S, Wilkinson S P. Turbulent viscous drag reduction with thin-element riblets[J]. AIAA Journal, 1988, 26(4): 496-498

[4] 谭广琨, 王晋军, 李秋胜. 圆柱体减租技术及其机理初步研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(6): 658-661
Tan Guangkun, Wang Jinjun, Li Qiusheng. Drag reduction technique of cylinder and mechanism research[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(6): 658-661(in Chinese)

[5] Ozono S. Flow control of vortex shedding by a short splitter plate asymmetrically arranged downstream of a cylinder[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(10): 2928-2934

[6] Mittal S. Effect of a "slip" splitter plant in vortex shedding from a cylinder[J]. Physics of Fluids, 2003, 15(3): 817-820

[7] Lesage F, Gartshore I S. A method of reducing drag and fluctuating side force on bluff bodies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1987, 25(2): 229-245

[8] Sakamoto H, Tan K, Takeuchi N, et al. Suppression of fluid forces acting on a square prism by passive control[J]. Journal of Fluid Engineering, 1997, 119(3): 506-511

[9] Wang Jinjun, Zhang Panfeng, Lu Sufen, et al. Drag reduction of a circular cylinder using an upstream rod[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2006, 76(1): 83-101

[10] Zhang Panfeng, Wang Jinjun, Lu Sufen, et al. Aerodynamic characteristics of a square cylinder with a rod in staggered arrangemen[J]. Experiments in Fluids, 2005, 38(4): 494-502

[11] Zhang Panfeng, Gao Lei, Wang Jinjun. Drag reduction of a disk with an upstream rod[J]. Wind and Structures, 2006, 9(3): 245-254

[12] 王晋军, 高磊, 潘翀. 来流扰动对圆盘绕流结构影响的实验研究[J]. 空气动力学学报, 2008, 4: 440-445
Wang Jinjun, Gao Lei, Pan Chong. Experimental study on effects of upstream interference on the flow structure around a disk[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 4: 440-445(in Chinese)

[13] 高磊, 王晋军, 张攀峰. 二维扰动对圆盘绕流压力分布影响的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(4): 383-387
Gao Lei, Wang Jinjun, Zhang Panfeng. Experimental study on the effects of two-dimensional on the interference pressure distribution of a circular disk[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(4): 383-387(in Chinese)

[14] Hoerner S F. Fluid-dynamic drag[M]. Brick Town, NJ: Horner Fluid Mech, 1965

[15] Berger E, Scholz D, Schumm M. Coherent vortex structures in the wake of a sphere and a circular disk at rest and under forced vibration[J]. Journal of Fluids and Structures, 1990, 4(3): 231-257

(责任编辑: 刘登敏)