卫星导航用户机空时滤波抗干扰技术

张 琳 初海彬

(哈尔滨工业大学 电子与信息技术研究院,哈尔滨 150001) (深圳国际技术创新研究院,深圳 518075)

张乃通

(哈尔滨工业大学 电子与信息技术研究院,哈尔滨 150001)

摘 要:卫星导航用户机在多个干扰源(包括宽带和窄带)或导航信号和干扰信号空间角谱接近的情况下,系统定位精度降低甚至无法满足定位要求.为此提出具有方向约束条件的改进联合空时处理算法,将干扰源来向检测和获取的导航卫星信息作为条件约束判据引入联合空时滤波处理算法,在抑制干扰信号的同时使靠近干扰源来向的卫星信号正常接收.仿真表明,在有限阵元规模情况下,保证干扰信号的高抑制度(大于 40 dB),并提高干扰抑制自由度,最重要的是当导航卫星信号与干扰信号的空间角谱接近时(10°左右),在部分区域内有效抑制干扰的同时接收机仍然能够正常工作.该算法在一定程度上提高区域导航卫星系统在复杂电子环境下的抗干扰能力.

关 键 词:空时联合处理;自适应阵列天线;抗干扰

中图分类号:TP 927.23

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2007)01-0076-05

Space-time interference suppression technology of satellite navigation receiver

Zhang Lin

(School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Chu Haibin

(Shenzhen International Technology Creative Institute, Shenzhen 518075, China)

Zhang Naitong

(School of Electronics and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: If several interferences (including broadband and narrowband) appear or satellite signal and interference have similar direction of arrival, the location precision decreases below the normal level required in satellite navigation receiver. Therefor a constrained space-time adaptive processing (STAP) approach was proposed to ensure low suppression of satellite signal which is direction similar with interference by obtaining direction information of satellite and interference as constraint ahead. Simulation suggestes that it maintains high interference suppression degree (above 40dB), increases suppression freedom of degree, and ensures the normal reception of satellite signal while satellite and interference are direction similar (almost 10°). The method can increase the anti-jamming ability of the regional satellite navigation receiver in complex electrical surroundings.

Key words: STAP(space-time adaptive processing); adaptive array antenna; anti-jamming

收稿日期:2006-01-13

作者简介:张 琳(1980—),女,黑龙江哈尔滨人,博士生,lin_zhang@hit.edu.cn.

卫星导航系统由于卫星信号功率很低(最低−133 dBm),易受到多种形式的有意或无意干扰,导致用户机导航定位性能下降,甚至无法正常工作.目前,在导航系统抗干扰技术领域中,主要考虑 2 个关键问题:第一是宽带干扰信号(多为恶意干扰)覆盖了整个导航信号频谱,最有效的宽带干扰抑制方法是空域自适应滤波技术[1];第二是同时抑制多个干扰.空域自适应滤波技术抑制干扰的自由度为阵元数减一,而阵元数量受限于用户机的功率、成本及尺寸要求.文献[2−4]提出联合空时处理技术(STAP,Space-Time Adaptive Processing),同时调整空域响应以及天线阵元的时域响应,在不消耗空域自由度的情况下抑制窄带干扰和相关多径干扰,提高干扰抑制自由度.

区域卫星导航系统用户机抗干扰技术还需要考虑另一个关键问题,干扰信号易出现在卫星信号来向附近,在空域或联合空时滤波零陷干扰信号的同时,该卫星信号也会受到零陷影响而被大幅度衰减以致用户机无法正常接收此卫星信号.

本文提出一种改进的联合空时滤波方法,利用干扰源来向检测和线性约束最小方差准则下的全盲空域滤波技术产生约束判据进行联合空时滤波处理,不仅能够在部分仰角范围内正常接收与干扰信号空间角谱接近(约 10°)的卫星信号,同时能够保证干扰抑制的自由度,实现对多个干扰的同时有效抑制.仿真试验表明,对于存在多个宽带和窄带干扰,并且部分区域内存在干扰与信号来向夹角很近的情况,本文处理算法能够达到很高的干扰抑制指标,并通过接收机的载波和码环路仿真验证算法抗干扰的有效性.

1　单纯空域及联合空时滤波算法

单纯空域自适应滤波的系统组成框图如图 1 所示,包括:天线阵,多通道信道接收机,数字波束形成网络,自适应处理器.自适应处理器在对阵列天线接收到的信号进行处理后,自适应调整波束形成网络中的可变加权系数,使各阵元的增益或相位发生改变,从而在阵列天线的方向图中产生针对干扰源方向的零陷,以降低干扰源对接收系统的影响.自适应处理器分为信号处理器和自适应算法控制器两部分,是空域自适应滤波系统的核心.

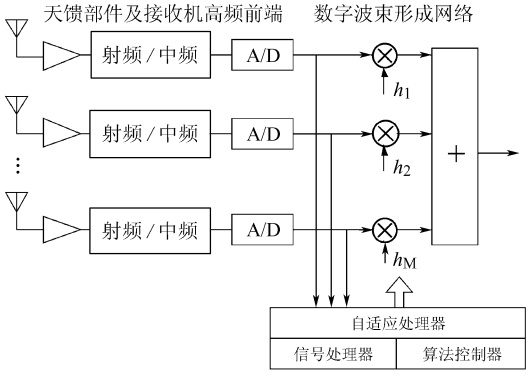


图 1　单纯空域滤波结构框图

算法控制器依据优化准则自适应地调整加权矢量,以跟踪信号环境的变化[5].线性约束最小方差准则(LCMV,Linearly Constrained Minimum Variance)下的空域滤波可以实现全盲自适应滤波,在毫无先验信息的条件下抑制干扰,其波束图在所有信号方向产生零陷,且信号愈强,对应方向零陷愈深[6].由于系统采用直接扩频信号,卫星信号低于接收机内部噪声 20～30 dB,对天线波束形成几乎无影响,而外界强干扰将对应于深的波束零陷.但是其干扰抑制自由度受限于阵元个数减一,因此可将其扩展至空时二维.

STAP 不仅调整天线阵元的空域响应,而且还要调整天线阵元的时域响应,在不消耗空域自由度的情况下抑制窄带干扰和相关多径干扰,提高干扰抑制自由度.STAP 是一个类的范畴,它包含具体的空域以及时域自适应调整方法.在时域上,对每一个天线阵元采用了一个有限冲激响应滤波器[4].在空域上,卫星信号和干扰信号通过一组阵列天线接收,天线阵元在空间上的分布使得不同方向到来的信号在空间相异的每个阵元的接收端具有不同的相位特征,这种相位特性与信号来向是相互对应的.

2　改进的约束联合空时滤波算法

在 STAP 技术的应用中,对于卫星信号与干扰信号来向的夹角很小的情况,当干扰来向上实现天线增益陷零时,邻近来向的卫星导航信号同时被极大衰减,导致输出的信号干扰噪声谱密度比(SINR,Signal to Interference and Noise Ratio)无法满足用户接收机正常捕获跟踪的要求.

为了解决这个问题,本文在联合空时滤波算法中,加入该导航信号来向的方向约束条件,这种改进的约束联合空时滤波方法的实现框图如图 2 所示,用户接收机向算法控制器提供空间角谱接近于干扰信号的卫星信号星历作为条件判据,应用于约束联合空时滤波算法,达到提高该卫星信号对应的输出载波噪声谱密度比的作用.

条件约束联合空时滤波方法的主要流程如图 3 所示.首先获取导航卫星位置信息,这一信息来

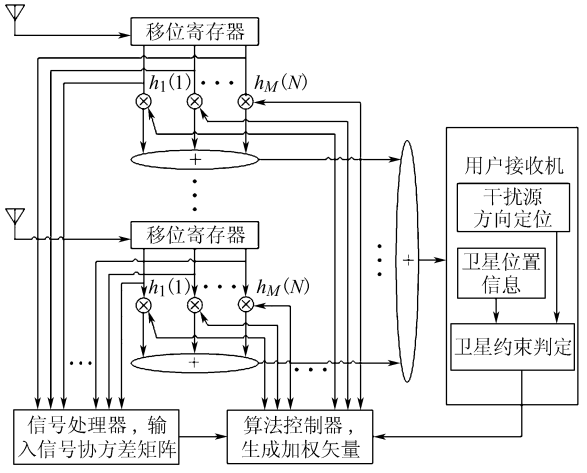


图2 条件约束的联合空时滤波方法实现框图

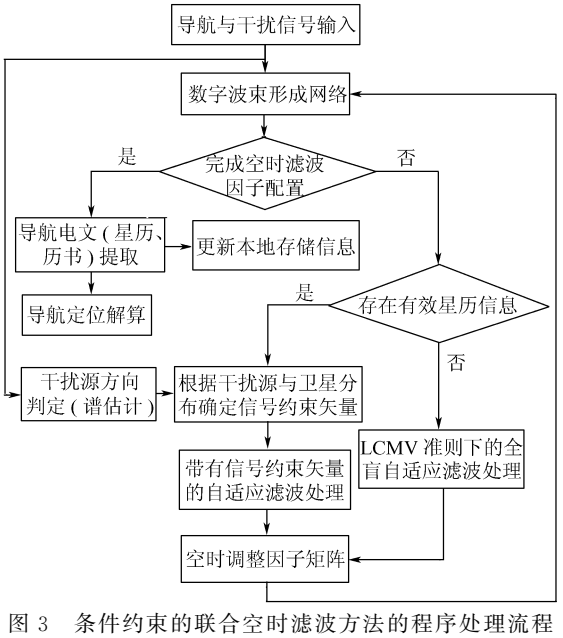


图3 条件约束的联合空时滤波方法的程序处理流程

自存储有效星历信息，或者由接收机可以捕获的其他卫星星历信息解析出来. 线性约束最小方差准则下的联合空时滤波可以实现全盲空域滤波，虽然这一方法存在一定的缺点，但是可以在强干扰环境下大幅度抑制干扰信号，捕获部分卫星信号，获取星历信息. 另外，算法还需要进行干扰源方向定位判定，并由此计算出哪一颗卫星处于干扰源附近，进而产生操纵矢量，进入条件约束联合空时滤波处理.

以下为基于LCMV准则的约束空时滤波技术的数学推导.

定义 $\boldsymbol{x}_n=[x_1(n),x_2(n),\cdots,x_M(n)]^{\mathrm{T}}$ 为第 n 个采样时刻下，M 个天线阵元的采样数据. $MN\times 1$ 维空时采样 $\boldsymbol{x}=[\boldsymbol{x}_1;\boldsymbol{x}_2;\cdots;\boldsymbol{x}_N;]$ 由 $\boldsymbol{x}_n$，$n=1,\cdots,N$ 组成，其中";"表示按列级联各矢量. 同样，第 n 个采样时刻下，各个阵元的加权值为 $\boldsymbol{h}_n=[h_1(n),h_2(n),\cdots,h_M(n)]^{\mathrm{T}}$，$MN\times 1$ 维的空时联合加权值 $\boldsymbol{h}=[\boldsymbol{h}_1;\boldsymbol{h}_2;\cdots;\boldsymbol{h}_N]$ 由 $\boldsymbol{h}_n$，$n=1,\cdots,N$ 组成.

天线阵元在空间上的分布使得不同方向到来的信号在空间相异的每个阵元的接收端具有不同的相位特征.

STAP的输出功率为 $E\{|\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{x}(n)|^2\}=\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{h}$，其中，$\boldsymbol{K}=E\{\boldsymbol{x}(n)\boldsymbol{x}^{\mathrm{H}}(n)\}$.

由LCMV准则可列出条件方程

$$\left.\begin{aligned}&\min\{\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{h}\}\\&\text{s.t.}\ \boldsymbol{A}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}=\boldsymbol{\beta}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{\beta}$ 为 $N\times 1$ 维全1矢量；$\boldsymbol{A}_k=\boldsymbol{I}\otimes\boldsymbol{a}(\boldsymbol{r}_k)$；$\boldsymbol{I}$ 为 N 维单位阵；$\otimes$ 为Kronecker内积；$\boldsymbol{a}(\boldsymbol{r}_k)=[\mathrm{e}^{\mathrm{j}\times 2\pi\times r_k\cdot\alpha_1},\mathrm{e}^{\mathrm{j}\times 2\pi\times r_k\cdot\alpha_2},\cdots,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\times 2\pi\times r_k\cdot\alpha_M}]^{\mathrm{T}}$ 为第 k 个卫星信号在各个阵元的相位延迟分布，$\boldsymbol{\alpha}_i$（$i=1,2,\cdots,M$）为每个阵元天线的位置矢量；$\boldsymbol{r}_k=[\cos\phi_k\sin\theta_k,\sin\phi_k\sin\theta_k,\cos\theta_k]^{\mathrm{T}}$ 为卫星来向的单位矢量，(ϕ_k,θ_k)为卫星的方位角和俯仰角.

上述方程组得解为

$$\boldsymbol{h}=\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{A}_k[\boldsymbol{A}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{K}^{-1}\boldsymbol{A}_k]^{-1}\boldsymbol{\beta}\tag{2}$$

抗干扰性能常采用算法收敛后输出的信号干扰噪声谱密度比评估，SINR由下式得出[4]：

$$R_{\mathrm{out}}=\frac{\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{ss}}\boldsymbol{h}}{\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{JJ}}\boldsymbol{h}+\sigma_n^2\boldsymbol{h}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}}\tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{ss}}$，$\boldsymbol{R}_{\mathrm{JJ}}$ 分别为卫星信号与干扰信号的自相关矩阵；σ_n 为噪声的标准偏差.

3 仿真试验

仿真试验针对3个方面：约束空时滤波算法在多个干扰源条件下与空时滤波算法的比较；干扰源与卫星信号来向夹角很小的情况下，约束空时滤波算法的干扰抑制性能的仿真分析；多个干扰源以及干扰与卫星信号来向夹角较近情况下，通过用户机载波和码环仿真验证约束空时滤波算法的干扰抑制有效性.

仿真使用Matlab7.0数学仿真平台，以与卫星信号不相关的大功率扩频信号模拟干扰信号，宽带干扰带宽为2 MHz（覆盖整个卫星信号频谱范围），窄带干扰信号带宽20 kHz（卫星信号带宽的1/100）. 干扰信号功率比 $J/S=52$ dB，噪声水平 $C/N_0=40$ dB/Hz. 用户机正常工作门限 $R=38.5$ dB/Hz.

3.1 多个干扰源条件下的算法仿真

仿真采用5阵元均匀圆阵，在多个干扰源的情况下，不同滤波算法的输出信号噪声谱密度比 R_{out} 由表1和表2给出. 可以看出随着干扰信号数

量的增多,天线阵抑制干扰的性能逐渐下降,输出信号干扰噪声谱密度比在自由度范围内均在39 dB/Hz左右.但是对于阵元数为 5 的阵列,当干扰源数目为 5 和 6 个时,单纯空域滤波处理的干扰抑制效果明显下降,而先验信息约束联合空时处理的干扰抑制效果基本保持不变,具有较好的干扰抑制性能.

从理论上讲,5 个阵元天线及 5 个时域抽头干扰抑制自由度为 9,即同时可以抑制 9 个干扰信号(包括宽带和窄带信号),但是由于抑制干扰的同时可能会大幅度衰减导航信号的功率,无法达到抑制干扰的理论极限.在本文的仿真研究过程中,当同时存在 3 个宽带干扰和 3 个窄带干扰时,可以满足用户机正常的捕获跟踪和保证相应的测量精度,如表 2 所示.然而,当同时存在多于 3 个宽带和 3 个窄带干扰的情况下,仿真发现,在某些导航信号和干扰分布条件下,在抑制干扰信号的同时,导航信号功率衰减很大,无法满足用户机正常捕获跟踪要求.因此,本文在 5 个阵元和 5 个时域抽头情况下,可以最多同时可靠抑制 3 个宽带和 3 个窄带干扰信号.

表 1　单纯空域滤波的 R_{out}

干扰个数	宽带干扰来向(方位角/(°),俯仰角/(°))	窄带干扰来向(方位角/(°),俯仰角/(°))	R_{out}/(dB·Hz^{-1})
1	(45,80)		41.953
2	(45,80)(100,75)		40.348
3	(45,80)(100,75)	(80,30)	39.414
4	(45,80)(100,75)	(80,30)(35,90)	38.303
5	(45,80)(100,75)(100,75)	(80,30)(35,90)	29.206
6	(45,80)(100,75)(100,75)	(80,30)(35,90)(90,100)	29.137

表 2　约束空时滤波的 R_{out}

干扰个数	宽带干扰来向(方位角/(°),俯仰角/(°))	窄带干扰来向(方位角/(°),俯仰角/(°))	R_{out}/(dB·Hz^{-1})
1	(45,80)		40.439
2	(45,80)(100,75)		39.746
3	(45,80)(100,75)	(180,80)	38.866
4	(45,80)(100,75)	(180,80)(124,70)	39.028
5	(45,80)(100,75)	(180,80)(124,70)(180,45)	39.083
6	(45,80)(100,75)(125,60)	(80,30)(35,90)(180,45)	39.1

3.2 干扰与卫星信号来向接近条件下的算法仿真

图 4 是空域滤波算法在不同的仰角条件下,满足用户机正常工作的卫星信号与干扰信号的最小夹角分析图.在干扰和卫星信号夹角较小的情况下(低于 20°),天线增益在卫星导航信号来向衰减很大,用户机无法正常工作,只有在较高仰角范围内(60°～140°),最小工作夹角才可以达到 20°～30°.

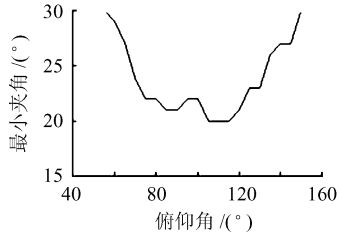


图 4　空域滤波的最小工作夹角分析图

考虑到阵元规模不能太大,并且要求具有较好的抗干扰性能,本文设计选用 7 阵元线性均匀圆阵,5 个时域抽头(仿真表明时域抽头大于 5 个时,增大抽头数量,抗干扰改进效果不明显).图 5 是约束空时滤波算法满足用户机正常工作的卫星信号与干扰信号最小夹角分析图.在高仰角区域,存在一个空间可以满足,当干扰与卫星信号在较低夹角下用户机保持正常工作,最低情况下夹角为 7°.有效范围如下:干扰与信号工作最小夹角低于 10°,仰角范围 67°～110°;干扰与信号工作最小夹角低于 15°,仰角范围 63°～119°;干扰与信号工作最小夹角低于 25°,仰角范围 44°～123°.

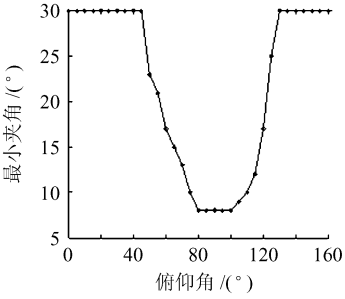


图 5　约束空时滤波的最小工作夹角分析图

图 6 是在不同俯仰角度的情况下,干扰与卫星信号来向夹角对约束空时滤波输出的信号干扰噪声谱密度比.在高仰角条件下,较小的干扰与卫星信号夹角可以有较高的输出信号干扰噪声谱密度比,从而保证用户机的正常工作,而在较低仰角条件下,则无法满足用户机的正常工作要求.

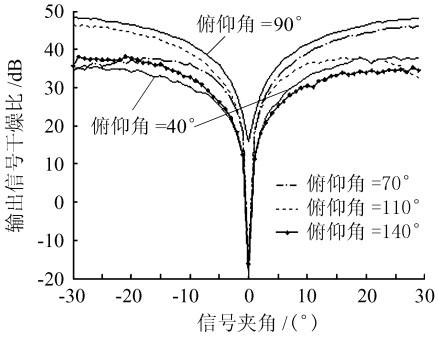
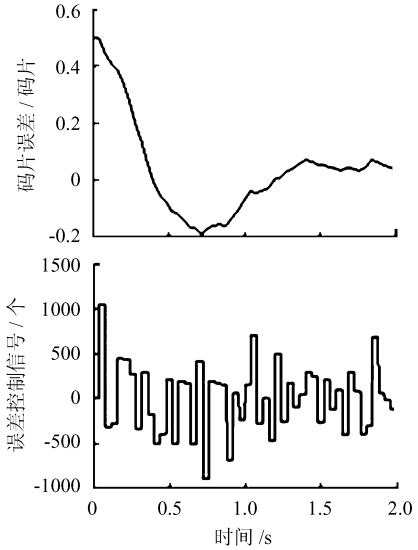
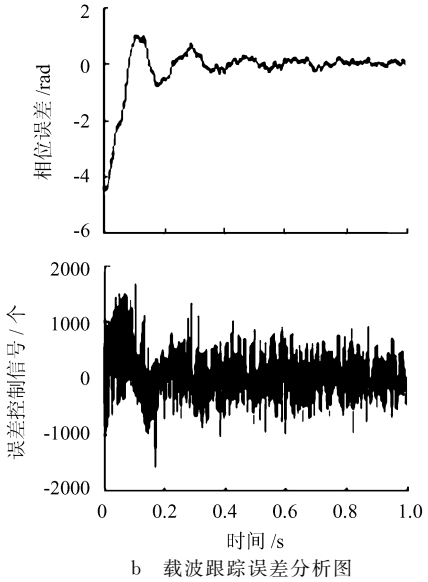


图 6　约束空时滤波算法 R_{out}

图7是约束空时滤波同时处理4个干扰源(2个宽带干扰、2个窄带干扰，$J/S=52$ dB，码速率1 MHz，数据周期20 ms，码环、载波环阶数3阶，码环工作带宽1 Hz，载波环工作带宽18 Hz，预检测积分时间1 ms)后，用户接收机的码和载波环路工作情况，从图7可以看出码环和载波环能够正常工作，从而证明所设计的约束空时滤波处理算法的有效性.



a 码跟踪误差分析图



b 载波跟踪误差分析图

图7 约束空时滤波的用户机码、载波工作图

4 结束语

本文针对区域卫星导航系统抗干扰的自由度受限问题，以及因为干扰信号与卫星信号空间角谱接近，使得该卫星信号造成极大衰减，降低抗干扰性能的问题，采用一种改进的约束空时滤波处理技术. 仿真结果表明，可以实现对多个干扰的有效抑制，干扰的抑制程度大于40 dB；另外，较高仰角区域范围内可以满足在接近10°的卫星信号与干扰信号夹角条件下，接收机仍然保持正常工作.

参考文献 (References)

[1] Myrick W L, Zoltowski M D, Goldstein J S. Exploiting conjugate symmetry in power minimization based pre-processing for GPS: reduced complexity and smoothness [C]// Huseyin Abut. 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Istanbul: Signal Processing Society of IEEE, 2000,5(6):2833－2836

[2] Zatman Michael. Circular array STAP [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2000, 36(2):510－517

[3] Myrick W L, Zoltowski M D, Goldstein J S. Low-sample performance of reduced-rank power minimization based jammer suppression for GPS [C]// Yeheskel Bar-Ness. 2000 IEEE Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Parsippany, New Jersey, USA: ccspr, 2000,1(9):93－97

[4] Melvin W L. A STAP overview[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2004,19(1):19－35

[5] Xiong Ping, Medley M J, Batalama S N. Spatial and temporal processing for global navigation satellite systems: the GPS receiver paradigm [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003,39(10):1471－1484

[6] McDonald K F, Raghavan R, Fante R. Lessons learned through the implementation of space-time adaptive processing algorithms for GPS reception in jammed environments [C]//Bahar bttam. Position Location and Navigation Symposium. Monterey, CA, USA: IEEE and the Institute of Navigation, 2004,(4):418－428

(责任编辑:娄 嘉)