

文章编号: 1001-9014(2007)06-0409-05

红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究进展

张天序, 施长城, 李洁璐, 刘慧娜, 袁雅婧, 周 泐

(华中科技大学 图像识别与人工智能研究所多谱信息处理技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 实现红外焦平面阵列非均匀性自适应校正是高级红外探测系统追求的重要目标, 对提高红外探测系统的空间分辨率、温度分辨率、探测距离以及辐射量的正确度量具有重要意义. 归纳总结了国内外关于凝视红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法的部分研究工作及其进展, 比较了典型自适应算法的性能和适用条件, 为进一步开展红外焦平面阵列非均匀性自适应校正研究提供参考意见.

关键词: 红外焦平面阵列; 非均匀性; 自适应校正算法

中图分类号: TN215 **文献标识码:**

OVERVIEW OF RESEARCH ON THE ADAPTIVE ALGORITHMS FOR NONUNIFORMITY CORRECTION OF INFRARED FOCAL PLANE ARRAY

ZHANG Tian-Xu, SHI Chang-Cheng, LI Jie-Jun, LIU Hui-Na, YUAN Ya-Jing, ZHOU Yang

(National Laboratory for Multi-spectral Information Processing Technologies, Institute for Pattern Recognition and Artificial Intelligence, Huazhong University of Science of Technology, Wuhan 43007, China)

Abstract: It has been the most important goal for an advanced infrared detecting system to realize adaptive nonuniformity correction of infrared focal plane array (IRFPA), which is also significant to improve spatial resolution, temperature resolution, detecting range and radiometric accuracy. Some important researches and progress on the adaptive algorithms for nonuniformity correction of staring IRFPA were summarized. The comparison among the performance and applicable conditions of typical adaptive algorithms was given in order to bring forward the suggestion to the further development of adaptive algorithms for nonuniformity correction of IRFPA.

Key words: infrared focal plane array; nonuniformity; adaptive correction algorithms

引言

红外成像系统随着红外探测器的发展而发展^[1]. 在第一代红外成像系统中, 采用线列探测器, 通过一维光机扫描实现成像. 随着 CCD 相关技术的成熟, 到了 20 世纪 70 年代中期, 红外焦平面阵列探测器 (IRFPA, Infrared Focal Plane Array) 的出现标志着第二代红外成像系统——凝视红外成像系统的诞生. 与线列探测器相比, 焦平面探测器成像具有空间分辨率高、探测能力强、帧频高等优点, 正迅速成为红外成像技术的主流器件. 然而, 红外焦平面阵列存在的非均匀性严重影响了系统的成像质量, 降低了系统的空间分辨率、温度分辨率、探测距离以及辐射

量的正确度量, 直接制约着系统的最终性能. 针对红外焦平面阵列的非均匀性问题, 人们提出相应的校正方法, 主要分为两大类: 一类是基于定标的校正方法, 该类方法原理简单, 硬件易于实现和集成; 校正精度高, 可用于场景温度的度量; 对目标没有任何要求, 是实际 IRFPA 组件产品中主要采用的方法. 但这类方法受限于 IRFPA 响应漂移带来的校正误差; 实际校正时需要参考源进行标定, 使得设备装置相对复杂; 同时在实际应用中需要进行周期性的定标, 定标频率取决于系统的稳定性, 对于机载、弹载探测器不易做到快速反应. 另一类是基于场景的自适应校正方法. 这类方法可以在一定程度上克服 IRFPA 响应漂移带来的校正误差, 不要求或只需要简单的

收稿日期: 2006-12-19, 修回日期: 2007-05-06

基金项目: 国家自然科学基金 (10577009) 资助项目

作者简介: 张天序 (1947-), 男, 重庆人, 博士, 教授, 主要研究方向为图像分析与智能系统、机器视觉、医学图像处理和实时并行处理等

Received date: 2006-12-19, revised date: 2007-05-06

定标,根据场景信息适应性的更新校正系数,成为目前算法研究和系统应用的重要研究方向。

国外研究人员在校正算法方面持续地开展研究,发表了大量的论文,包括校正算法和实现的硬件结构。国内对于红外焦平面非均匀性自适应校正算法的研究起步较晚,不过之后的发展较快,从刚开始仅仅实现和改进国外文献中的校正方法到近几年提出一些思路新颖的校正方法。有必要总结分析目前的研究进展和存在的问题,找准进一步工作的方向,避免低水平重复研究。为此本文针对部分红外焦平面自适应非均匀性校正算法进行讨论和综合比较。

1 基于人眼视觉神经机理的自适应校正算法

1981年,P. M. Narendra等人提出了第一种基于场景的自适应校正方法——等统计量方法^[2]。不过在后来的十年中,研究的重点一直都在定标类的校正算法研究中,关于自适应校正算法的研究并没有太大进展,直到20世纪90年代,才开始重点研究自适应的校正算法。

1990年以来,美国海军研究实验室的D. A. Scribner等人基于人眼视觉神经机理的现有研究成果,提出了两种自适应非均匀校正算法^[3,4]。一种是时域高通滤波校正算法(简称THPF-NUC),该方法参考人眼水平细胞(Horizontal Cell)对光信号的时域低通滤波特性,结合双极细胞(Polarize Cell)和感光器(Photoreceptor)综合处理能力,构造时域高通滤波器来实现对偏移响应系数的校正。该算法的优点是运算简单,易于硬件实现,对1/f噪声引起的非均匀性有抑制作用;不足之处在于缺乏对增益响应系数的校正,同时当场景静止时,有目标退化和“鬼影”现象。

还有一种是以神经网络计算为核心的自适应非均匀校正算法(简称NN-NUC),该算法是空域运算方法的代表,利用视网膜的视细胞之间存在横向联系和反馈回路的研究结果,采用神经网络结构,以四邻域均值作为期望,用最陡下降法对校正系数迭代更新,实现对IRFPA的自适应校正。优点在于同时完成对增益和偏移响应系数的校正,对空间高频噪声抑制效果较好,但同样存在目标退化和“鬼影”现象,而且收敛速度较慢。

2003年,张小军等人针对既有加性噪声,又有乘性噪声,且加性噪声较强的情况,提出了先用时域高通滤波校正再用神经网络算法校正的二次校正算

法^[5]。该算法同样需要场景运动,且实时性能不高。2006年,杨少林等人针对传统神经网络校正算法收敛速度慢和校正精度不高的缺点,基于校正误差的均方值和增益因子的均值包含的信息,提出了一种新的误差函数以及增益和偏移校正因子的迭代公式^[6],并设计了一个自适应步长调节因子。文中对仿真图像实验有较好的效果,但对真实红外图像的校正效果有待进一步检验。

1995年,University of Florida的J. G. Harris等人,在美国海军的资助下对恒定统计量方法进行了计算上的改进,将其称为CS-NUC算法(Constant-Statistics Constraint NUC),并研究了算法模拟电路实现^[7,8]。该方法在神经生物学研究的启示下,基于众多视觉实验现象,总结生物系统对刺激的长期平均适应性,将其运用到IRFPA的非均匀校正。在两项约束条件下,建立校正参数的统计模型,再使用大量的图像序列对校正参数进行估计,实现红外焦平面的非均匀校正。校正公式为

$$x = \frac{y - m_y}{s_y}, \quad (1)$$

其中 x 为校正后图像, y 为校正前原始图像, m_y 和 s_y 分别为每个像元时域的均值和L1范数下标准差,通过每帧图像迭代的方式得到它们的估计

$$\hat{m}_y = \frac{y(n) + (n-1)\hat{m}_y(n-1)}{n}, \quad (2)$$

$$\hat{s}_y = \frac{|y(n) - m_y| + (n-1)\hat{s}_y(n-1)}{n},$$

该算法有效地消除了非均匀性带来的固定图案噪声,运算简洁,易于硬件实现,但需要大量图像序列进行参数估计,也有“鬼影”问题,同时算法对水平条纹噪声抑制效果不佳。

1999年,文献[9]对两种代表性的自适应校正方法(CS-NUC和NN-NUC)在ADSP21060开发平台上进行了实验研究,结果表明对于128×128规格且帧频为100Hz的IRFPA,对当时的DSP芯片处理能力而言仍然是比较繁重的。2003年,文献[10]提出了一种能更好保持场景细节的基于神经网络校正的改进算法,并运用TMS320C6201B DSP进行了算法的实现。但文中没有对该算法的运算速度进行分析,其算法实时性与实用性有待进一步检验。

2 基于图像配准的自适应校正算法

2000年,R. C. Hardie等人提出基于配准的校正方法^[11],该方法依据各探测元对相同场景的响应也

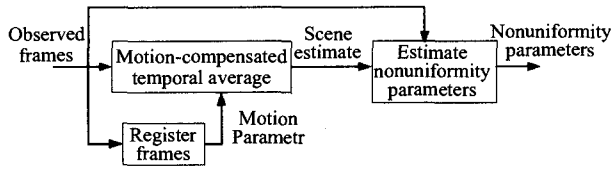


图1 基于图像配准的自适应校正算法流程图
Fig. 1 Block diagram of the adaptive NUC with image registration

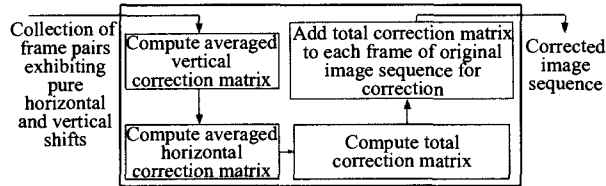


图2 代数自适应校正算法流程图
Fig. 2 Block diagram of algebraic algorithm for NUC

应相等这个事实,通过图像配准技术实现对中轻度非均匀性噪声污染的图像进行校正.该方法最大优点在于对响应参数估计时只需要较少的几十帧图像,可以达到自适应校正实时性的要求.不足之处在于需要序列场景图像做全局运动,同时序列图像中目标需亮度保持不变.由于配准的精确度受非均匀性噪声程度的影响明显,因此在重度噪声下由于无法准确配准图像,导致校正效果不佳.

2004年,徐田华等人运用时域高通滤波器对图像序列进行预处理,得到固定图案噪声估计的初值,同时结合传统的图像配准的校正算法进一步校正^[12],该算法在较高强度固定图案噪声情况下有一定优越性.

2002~2005年间,Ratliff等人提出了代数校正算法(Algebraic Algorithms for NUC)以及对它的改进^[13].这些算法通过对帧间子像素级的移动估计和线性插值模型,来实现对偏移系数的校正.优点在于只需相对较少帧的图像就可以生成有效的校正参数矩阵,并对场景没有时空多样性的要求.与基于图像配准的校正方法相似,该算法同样要求序列图像只能有单纯水平或垂直方向移动,并且场景中目标亮度不变,算法性能受子像素级移动估计精度的影响,对重度噪声下的非均匀性校正需预先进行平滑滤波处理.

3 基于统计模型和滤波技术的自适应校正算法

上世纪末至今,在自适应校正算法方面,也陆续

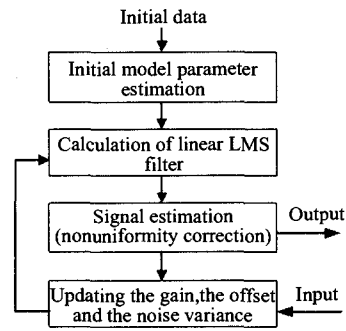


图3 统计校正算法流程图
Fig. 3 Block diagram of the statistical NUC algorithm

出现了一些复杂算法.如1999年M. Hayat等人发展的统计校正算法^[14](Statistical Algorithm for NUC),其假设统计的时间内所有探测元的输入辐照度范围相同,并服从均匀分布.先用一组序列估计出各种参数的数值,随之再用新的场景序列图像对参数进行更新,用更新的参数再对图像进行校正.该方法最大的特点是在校正公式中添加了一个噪声项,通过大量的场景数据,对增益、偏移以及噪声校正参数进行估计,实现自适应校正.算法流程见图3.

该算法局限之处在于要求尽量使每个探测元都充分暴露于相同的辐射能量范围内,且需要大量的图像序列.

Sergio N. Torres等人在2003~2006年间提出并研究了基于卡尔曼滤波(Kalman Filtering)的红外焦平面自适应校正算法^[15~17].该算法将增益和偏移视为离散高斯-马尔可夫过程中的随机状态变量,基于增益和偏移的时域统计模型,在其发生漂移时,运用卡尔曼滤波器对它们的估计进行更新,以达到自适应校正的目的.该算法特点在于建立了关于增益和偏移响应系数漂移的时域统计模型,对响应系数的时域漂移有较好的补偿;不过该算法同样需依赖场景多样性和恒定辐射范围的前提.

2005年,牛照东等人基于场景统计非均匀性校正算法对场景分布的假定,获得探测单元接收红外能量的一、二阶矩,进而估计探测单元的响应参数,并应用交互多模IMM算法^[18,19],建立两个状态模型拟合响应参数不存在漂移和漂移剧烈的极限情况,融合估计探测单元的响应参数.仿真实验结果表明IMM算法有较好的收敛性,并扩展了卡尔曼滤波算法的适用范围,但算法的运算量较大,难以达到实时性要求.2006年,李庆等人提出了以二次方程表征的响应特性数学模型,利用卡尔曼滤波对非均匀性图像实施双校正^[20].该算法较好地补偿响应非线性

的影响,当探测动态范围较大时,它得到较高的校正准确度.

2005年,甄德根等人提出了基于Wiener滤波的非均匀性校正算法^[21],主要讨论了滤波器结构,滤波器阶数的确定方法以及期望响应的提取方式等关键问题.

2005年,黄竹邻等人分析了红外焦平面阵列非均匀性的噪声特性,提出了反中值滤波为核心的红外焦平面自适应校正的方法^[22].该方法在静止目标保持能力及硬件实现等方面都有较好的表现,但对伪像的抑止效果不佳.

2001年,姜光等人以小波变换中的滤波器理论为基础,通过将图像序列在时间域的尺度分解和相应统计量计算,获得在红外焦平面校正中起影响的偏置和增益系数^[23].文中以仿真图像验证算法合理性,对实际红外图像的校正效果有待进一步验证.

4 高精度和智能型校正算法

文献[24]基于最小均方拟和方法,建立高次函数校正模型进行多点定标校正,并运用基于场景的运动估计对响应漂移进行补偿.该算法更好的反映阵列元响应的非线性,在探测动态范围较大时有校正精度高的优点,但算法的实时性与灵活性不强.

2006年,吴健飞等人提出了基于可变积分时间和均衡噪声的校正算法^[25],该算法结合了基于定标和基于场景的校正算法的优点,一方面考虑探测器使用时积分时间不同带来的影响,记录几组常用积分时间下的定标系数以便选择使用;另一方面自适应调节增益系数,有效地均衡了各探测元噪声影响,使弱目标的信噪比达到较高效果.

2005年,张天序等人分析了红外焦平面阵列非均匀性噪声的空间频率特性,指出空间低频噪声为其中的主要成分^[26].针对传统空域自适应校正方法去除低频空间噪声存在的不足,提出采用一点校正与神经网络自适应校正相结合的方法.该方法在空间低频噪声占优时能获得好的校正效果,但算法仍需结合定标运算,算法适用条件受到限制.

同年,张天序等人^[27,28]深入分析了神经网络校正法出现目标退化和伪像的成因,指出没有考虑目标边缘而盲目更新系数是产生问题的根源.在此基础上,提出了防止目标退化与伪像的基于边缘指导的神经网络自适应校正方法,该方法在边缘提取效果较好的前提下能有效的抑止目标退化和伪像,但边缘提取运算带来算法实时性的降低.

5 总结与展望

纵观国内外十多年来红外焦平面非均匀性校正自适应算法的发展,主要的研究途径和研究重点可按不同的观点分类.若按处理的时空域来分,一方面有时域处理算法,如时域高通滤波法、小波分析、Winner滤波和卡尔曼滤波;另一方面有空域处理算法,如神经网络法和中值滤波法;再有就是时空域处理结合的算法,典型的有基于配准的校正算法和代数校正算法.按照算法采用的探测元响应模型来分,首先有只校正偏移响应非均匀性的,如时域高通滤波法和代数校正算法;再有同时校正增益和偏移响应非均匀性的,如神经网络法和恒常统计约束法,还有考虑增益、偏移和读出噪声三者非均匀性的,如恒定范围统计法和卡尔曼滤波法.今后IRFPA非均匀校正自适应校正算法的研究工作可以从以下几方面来开展:首先,通过对实际红外非均匀性图像数据的分析,研究不同条件(如环境温度和季节气候等)下探测器响应参数时间、空间和频域的统计分布,进一步建立更加准确的焦平面响应的多参数模型;其次,基于生物视觉的研究进展,提出新的视觉仿生学的非均匀性自适应校正算法;再次,扩展算法的适用条件,发展针对不同应用对象和应用环境的自适应校正算法,特别是对于弱小目标检测系统的非均匀性校正算法研究尤为重要;另外,针对实际应用背景,设计合理的主/客观评价相结合的非均匀校正算法性能评价准则;最后,自适应校正算法实时快速地硬件实现和专用ASIC芯片的实现是实际非均匀性校正应用中亟待解决的问题.

REFERENCES

- [1] WU Zong-Fan, LIU Mei-Lin, ZHANG Shao-Ju. *Infrared and Low-level Light Technology* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (吴宗凡, 柳美琳, 张绍举. *红外与微光技术*. 北京: 国防工业出版社), 1998: 4: 93—100, 126—130.
- [2] Narendra P M, Foss N A. Shutterless fixed pattern noise correction for infrared imaging arrays [C]. Proc. SPIE, 1981, 282: 44—51.
- [3] Scribner D A, Sakady K A, Caulfield J T, et al. Nonuniformity Correction for staring IR focal plane arrays using scene-based techniques [C]. *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays*, SPIE, 1990, 1308: 224—233.
- [4] Scribner D A, Sarkady K A, Krueger M R, et al. Adaptive retina-like preprocessing for imaging detector arrays [J]. Proc. IEEE 1993, 1955—1960.
- [5] ZHANG Xiao-Jun, ZHAO Yi-Gong. Combined algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology* (张小军, 赵亦工. *红外焦平面非均匀*

- 校正的综合处理算法. 红外技术), 2003, 25(6): 34—38.
- [6] YANG Shao-Lin, YU Hui-Min. Scene-based nonuniformity correction algorithm in focal plane arrays [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)* (杨少林, 于慧敏. 基于场景的焦平面阵列非均匀性校正算法研究. 浙江大学学报(工学版)), 2006, 40(7): 1150—1153.
- [7] Harris J G, Chiang Y M. Nonuniformity correction using the constant-statistics constraint: analog and digital implementations [C]. Proc. SPIE, 1997, 3061: 895—905.
- [8] Harris J G, Chiang Y M. Minimizing the ghosting artifact in scene-based nonuniformity correction [C]. Proc. SPIE, 1998, 3377: 106—113.
- [9] Cao Zhiguo, Sang Nong, Li Wei, et al. Digital implementation of nonuniformity correction for IRFPAs [C]. Proc. SPIE, 1999, 3698: 807—814.
- [10] Li Yongliang, Ni Guoqiang, Zhang Jian, et al. Speckle reduction of infrared image and its hardware realization [C]. Proc. SPIE, 2003, 5203: 607—614.
- [11] Hardie R C, Hayat M M, Armstrong E, et al. Scene-based nonuniformity correction using video sequences and registration [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(8): 1241—1250.
- [12] XU Tian-Hua, ZHAO Yi-Gong. Research on the algorithm for nonuniformity correction of infrared focal plane [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command* (徐田华, 赵亦工. 红外焦平面阵列非均匀校正算法的研究. 遥测遥控), 2004, 25(6): 44—47.
- [13] Ratliff B M, Hayat M M, Tyo J S. Generalized algebraic scene-based nonuniformity correction algorithm [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2005, 22: 239—249.
- [14] Hayat M M, Torres S N, Armstrong E, et al. Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(8): 772—780.
- [15] Torres S N, Hayat M M. Kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared focal-plane arrays [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2003, 20: 470—480.
- [16] Torres S N, Pezoa J E, Hayat M M. Scene-based nonuniformity correction for focal plane arrays by the method of the inverse covariance form [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(29): 5872—5881.
- [17] Pezoa J E, Hayat M M, Torres S N. Multimodel kalman filtering for adaptive nonuniformity correction in infrared sensors [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23: 1282—1291.
- [18] NIU Zhao-Dong, WANG Wei-Hua, CHEN Zeng-Ping. Application of IMM algorithm in nonuniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *Optoelectronic Technology* (牛照东, 王卫华, 陈曾平. IMM算法在红外焦平面阵列非均匀性校正中的应用. 光电子技术), 2004, 24(4): 238—242.
- [19] NIU Zhao-Dong, WANG Wei-Hua, JIANG Wei-Dong. Scene-based statistical algorithms for nonuniformity correction of infrared images [J]. *Infrared and Laser Engineering* (牛照东, 王卫华, 姜卫东, 等. 场景统计类红外图像非均匀性校正算法研究. 红外与激光工程), 2005, 34(3): 261—265.
- [20] LI Qing, LIU Shang-Qian, LAI Rui, et al. A scene-based nonuniformity correction algorithm of IRFPA [J]. *Acta Photonica Sinica* (李庆, 刘上乾, 赖睿. 一种基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正算法. 光子学报), 2006, 35(5): 720—723.
- [21] ZHEN De-Gen, JIANG Ya-Dong, WU Zhi-Ming, et al. A new algorithm of uncooled infrared focal plane array nonuniformity correction based on wiener filter theory [J]. *Infrared Technology* (甄德根, 蒋亚东, 吴志明, 等. 基于Wiener滤波理论的非制冷红外焦平面非均匀校正新算法. 红外技术), 2005, 27(4): 311—313.
- [22] HUANG Zhu-Lin, LIU Gang, HE Zhao-Xiang, et al. Adaptive nonuniformity correction based on inverted median filtering of infrared focal plane [J]. *Optics & Optoelectronic Technology* (黄竹邻, 柳刚, 何兆湘, 等. 基于反中值滤波的红外焦平面自适应非均匀性校正方法. 光学与光电技术), 2005, 3(3): 62—64.
- [23] JIANG Guang, LIU Shang-Qian. Adaptive nonuniformity correction of IRFPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (姜光, 刘上乾. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法研究. 红外与毫米波学报), 2001, 20(2): 93—96.
- [24] ZHANG Jun-Ju, XING Su-Xia, Chang BenKang, et al. A nonuniformity correction algorithm for infrared focal-plane arrays [C]. Proc. SPIE, 2005, 5640: 425—433.
- [25] WU Jian-Fei, LI Fan-Ming, ZHUANG Liang, et al. Study on IRFPA nonuniformity correction in dim target detection system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (吴健飞, 李范鸣, 庄良, 等. 弱目标检测系统中红外焦平面阵列非均匀性校正算法的研究. 红外与毫米波学报), 2006, 25(5): 372—376.
- [26] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan, CAO Zhi-Guo. Study on the property of spatial frequency of nonuniformity noise in IRFPA and the important of spatial adaptive nonuniformity correction technique [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 石岩, 曹治国. 红外焦平面非均匀性噪声的空间频率特性及空间自适应非均匀性校正方法改进. 红外与毫米波学报), 2005, 24(4): 255—260.
- [27] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan. Eliminating the “ghosting” artifact and target fade-out in adaptive nonuniformity correction for IRFPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张天序, 石岩. 红外焦平面阵列非均匀性自适应校正算法中目标退化与伪像的消除方法. 红外与毫米波学报), 2005, 24(5): 335—340.
- [28] ZHANG Tian-Xu, SHI Yan. Edge-directed adaptive nonuniformity correction for staring infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(1): 1—11.