

野生动物互联网跟踪技术 ICARUS

蒋志刚^{1,2}

1. 中国科学院动物研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049

E-mail: jainzg@ioz.ac.cn

最近, *Nature* 以德国拉多夫泽尔马普鸟类研究所动物行为学家 Martin Wikelski 博士的研究为例, 介绍了野生动物互联网跟踪技术(International Cooperation for Animal Research Using Space, ICARUS)的新进展, 探讨了野生动物跟踪互联网技术拯救濒危野生动物的前景^[1]。这是一项具有革命性意义的新进展。

在野外识别野生动物个体、追踪个体行踪、研究群体中个体之间的关系、探测其生存的微环境, 一直是野生动物研究的难点。在过去的几十年里, 使用无线电项圈技术跟踪野生动物, 改变了研究人员研究野生动物行为的方式^[2]。现在, 通过使用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)项圈、手机和无线电技术, 研究者可以追踪地球上各种各样的动物, 如鲸鱼、候鸟、海龟、虎(*Panthera tigris*)和非洲象(*Loxodonta africana*)的迁移运动^[3]。然而, 这些动物多数是大型动物。

通过接收在动物身上安装的无线电项圈和 GPS 项圈发射的定位信息, 人们已经发展出成熟的计算技术, 跟踪研究个体运动, 了解动物个体空间分布、个体生理状况、个体采食、休息行为, 研究动物的记忆、家域大小、群体分布和社会互动模式、推断野生动物扩散和遇见率, 分析野生动物种群动态^[4,5]。野生动物跟踪技术的发展过程可以分为以下 3 个阶段。

1 野生动物无线电跟踪技术

20 世纪初, 人们曾尝试利用无线电技术监测野生动物。然而, 由于早期的半导体三极管、二极管体积庞大, 当时的无线电发射装置和接收装置是台式装置, 人们无法制作可以安装在野生动物身上的便携式无线电发射装置。20 世纪中叶问世的晶体管无线电发射与接收装置, 其体积仍然很大, 不可能安装在野生动物身上。直到大规模集成电路技术的出现, 人们开始生产体积小、重量轻的无线电发射机, 野生动物无线电监测技术才走向逐步实用^[6]。

用于野生动物跟踪研究的无线电发射与接收装置是一类甚高频无线电发射与接收装置。研究人员将无线电发射机制成可以套在动物脖子上的无线电发射项圈或用绑带或胶固定在动物背上的无线电发射机背包。研究人员



蒋志刚 加拿大阿尔伯塔大学野生动物生态学博士, 致力于濒危物种、生物多样性、红色名录、动物行为与保护研究。任中国科学院动物研究所研究员、中国科学院大学岗位教授、国家濒危物种科学委员会常务副主任、中国动物行为学会理事长、中国野生动物保护协会副会长兼科技委主任。IUCN(International Union for Conservation of Nature)/SSC(Species Survival Commission)成员。获国家杰出青年科学基金(1997)和惠特莱自然保护奖(2006)。

在野外捕捉到野生动物个体后, 给他们佩戴上无线电项圈或背包, 然后将这些野生动物放归自然。这些无线电发射机会按照预先设定的时间间隔发出预定频率的无线电信号。研究者利用无线电接收装置接收监测发出的信号, 利用甚高频无线电信号的频率区别不同的无线电项圈, 探知定位动物所处的方位。那时, 研究者通常需要位于不同地点的两套接收机, 在地图上测定同时接收到的无线电信号源到研究者的夹角, 从而确定监测个体的位置^[2,7]。

利用无线电遥测技术, 除了在野外识别和定位野生动物个体以外, 还可以获得研究对象的生理指标与行为信息^[8]。例如, 可以利用带活动传感器的无线电遥测装置来监测记录野生动物的呼吸、脉搏、体温, 测定动物活动频率(如步频、扇翅频率, 感应动物的运动状态如行走、卧息), 识别陷入陷阱或活捕笼的动物; 根据发出的信号判断佩戴无线电/GPS 项圈个体是否已经死亡等^[6]; 还可以利用无线电遥测装置上的传感器监测动物体表以及微环境温度、风速或其他环境变量。

无线电跟踪技术为野生动物研究带来了一场革命。由于过去无线电接收装置一般是车载或飞机载运的装置, 对其重量和体积要求不高, 但限制了无线电跟踪研究的范围。在野外研究必须使用便携式手持无线电接收机, 于是, 人们为野外无线电跟踪研究开发生产了一系列体积小、重量轻、电池工作时长、抗摔的小型无线电接收装置, 以适

合在不同野生动物类群中应用。松鼠、黄鼠、鼯鼠等啮齿动物会钻入地下活动,这些动物带上无线电颈圈后,由于地层的屏蔽,无线电颈圈在地下发出的无线电信号微弱。于是,人们还生产了用于探测地下活动动物的特种天线,与适当的接收机配用,能以 10 cm×10 cm 的精度探测到来自地下的无线电信号。

然而,重量仍是限制无线电颈圈的关键因素。一般要求无线电颈圈的重量的不超过定位对象体重的 3%,否则,过重的无线电颈圈会影响定位对象的行为和生存。电池一直占无线电发射装置重量的很大比例。尽管芯片的体积越来越小,而电池体积与重量却没有多大变化,电池占无线电颈圈重量的相对比例越来越大,成为限制无线电颈圈用于野生动物跟踪研究的关键因子。马鹿(*Cervus elaphus*)、北极熊(*Ursus maritimus*)等大型哺乳动物佩带无线电发射机发出的信号,其接受范围也不超过数千米。尽管如此,在 20 世纪末叶野生动物无线电遥测技术日臻成熟,成为研究野生动物的常规手段^[9,10]。

2 野生动物 GPS 跟踪技术

随着 GPS 进入民用,人们在 1995 年开始研制野生动物用 GPS 定位系统。1996 年开始了第一次野生动物 GPS 定位野外实验,1997 年制成第一只 GPS-Simplex™ GPS 定位系统颈圈^[9]。1999 年人们在 GPS 定位系统颈圈装上了液晶显示屏。2000 年人们制成了接收数据速度比原来快 5 倍的新 GPS 定位系统接收机、天线和软件。GPS 定位系统开始被广泛应用于野生动物定位跟踪研究^[11]。

野生动物研究人员使用 GPS、环境传感器和自动数据检索技术,在预定的时间间隔记录和存储定位对象的位置和从传感器获得的数据。这些数据可以存储在定位装置,或使用 GPRS 网络、无线电或卫星调制解调器中继到中央数据存储或联网计算机,在终端上用 GIS 软件包或定制软件实时绘制野生动物的位置和运动轨迹^[12]。像无线电定位颈圈一样,野生动物用 GPS 定位系统也制成颈圈或背包,固定在动物颈上或体表。人们可以在千里之外的实验室中实时监测自然环境中的野生动物。

GPS 定位系统颈圈上除了 GPS 定位系统之外,还有一只常规的高频无线电信号发射机。这样,GPS 定位系统颈圈与常规的无线电定位颈圈的功能相仿。研究人员可以根据接收到的 GPS 定位系统颈圈上的甚高频常规无线电信号发射机发出信号的频率区别不同的颈圈。GPS 定位系统颈圈还附带了定时脱落装置,可以预设从动物带上 GPS 定位系统颈圈起 2000 天内的颈圈脱落时间。颈圈脱离后,仍会发出无线电定位信号,便于研究者找回。从而解决了 GPS 定位系统回收的问题。

与无线电定位装置相似,GPS 定位系统也必须定时更换电池。电池较大的 GPS 定位系统在野外可以使用较长的

时间,定位较多的位点。例如,用于大型草食动物定位研究的 GPS 颈圈重 1800 g,可以提供 3 万个定位点,而重 475 g 的 GPS 颈圈只能提供 600 个定位点。

GPS 定位系统颈圈也装上了各种感应器,包括感应动物死活的装置。当动物死亡时,甚高频无线电信号发射机发射的信号频率会改变。当 GPS 定位系统颈圈的主电池组电量非常低时,其备用电池自动启动。使用备用电池的 GPS 定位系统颈圈不再发射 GPS 定位信号,仅维持常规无线电发射机的工作。常规无线电发射机仍会在一段时间内发射固定频率的双脉冲定位信号,便于人们找回电量即将耗尽的 GPS 定位系统颈圈。

野生动物卫星定位系统已经得到大规模应用,成为研究野生动物的常规手段。用于非洲象、海龟、迁徙鸟类、鲸鱼、鲨鱼^[13]等。加拿大野生动物研究人员利用 G755-卫星定位颈圈在加拿大西北部研究了一只棕熊(*Ursus Arctos*)的活动。从 2001 年 6 月 1 日工作到 2001 年 10 月 10 日,收集到 2379 个定位点数据,数据发射成功率为 80%。人们在非洲东南部利用 GPS 颈圈研究了非洲象的迁徙,探索了建立非洲象迁徙通道,减少人象冲突的可能^[14,15]。2014~2018 年,我们在执行国家科技基础性工作专项“中俄哈蒙边境地区特有动物与生物地理区系科学考察”中,利用 GPS 颈圈研究野放普氏野马(*Equus ferus*)和狼(*Canis lupus*)的家域。发现野马的家域面积达 1400 km²,狼的家域达 3728 km²^[17]。2015 年,一位美国业余猎手猎杀了一头名为 Cecil 的非洲狮(*Panthera leo*),事件发生后不久即引发了全球的关注^[18]。Cecil 是英国牛津大学动物学系大型野生动物研究组的研究对象,该组研究人员为 Cecil 佩戴了 GPS 颈圈。Cecil 被射杀后,其佩戴的 GPS 颈圈发出了死亡信号,引起了远在数千里之外的牛津大学研究人员的警觉。该研究人员当即告知了津巴布韦当地国家公园管理人员,从而查获了这起盗猎案,这一案例成为 2015 年世界性轰动新闻。

3 野生动物互联网技术

野生动物 GPS 跟踪装置的重量不得超过研究对象体重的 3%仍是一项硬指标。目前最轻的 GPS 颈圈的重量的大于 3 g。受 GPS 颈圈体积大小和重量限制,所有体重不足 100 g 的野外动物都被排除在适合 GPS 跟踪装置研究的动物之外。这样,75%的鸟类、哺乳动物以及所有昆虫都不能佩戴 GPS 跟踪装置。此外,一个野生动物 GPS 跟踪装置造价数千美元,有限的科研经费限制了大规模野生动物 GPS 跟踪研究的开展。

Martin Wikelski 博士在世界各地开展过野生动物野外跟踪实验。他发现了传统无线电/GPS 监测技术的问题^[1]。他瞄准了开发体积更小、性价比更高、能大规模应用的野生动物互联网技术。他希望开发出一个像手机应用程序一样的,可以精确定位大象、莺、小海龟的社交网络式的“野

生动物互联网”——国际合作利用太空开展动物研究计划(International Cooperation for Animal Research Using Space, ICARUS)。Wikelski 博士设想的动物互联网将能够解答一些研究人员目前尚不知道的问题,将利用野生动物运动和习性来揭示其生存模式。例如,阐明一些候鸟和蝙蝠物种正在消失的原因,绘制出禽流感 and 埃博拉等病原体传播路径图,还可以提供害虫爆发早期预警,甚至预警地震,因为动物在地震发生之前会表现异常行为。

2001 年开始, Martin Wikelski 博士到处介绍他的计划。尽管多次碰壁,但是他最终获得了德国宇航局 2 千 7 百万欧元(当时相当 3 千 5 百万美元)的资助。他还设法说服了俄罗斯宇航管理部门,让俄罗斯宇航员在国际空间航天站上安置了“野生动物互联网”的第一根天线。他预测在 10 年内将有一个卫星网络用于实时跟踪地球上成千上万的野生动物。

Martin Wikelski 博士设计的跟踪装置使用太阳能电池,利用太阳能给 GPS 跟踪装置充电,解决了野生动物无线电/GPS 跟踪装置安装后不能充电的问题。他制作了重量只有 5 g 造价仅数百美元的小型监测器,可以安装在雀形目鸟类背上,为开展大规模鸟类迁徙跟踪研究提供了手段。一旦 ICARUS 系统完全投入使用,每只发射器将一次向国际空间站传输 20 个 GPS 的坐标信息,可以描绘动物任何一天活动轨迹。ICARUS 监测器还有一个可以存储 500 兆字节数据的内存芯片,足够记录动物一生的旅行、运动和能量消耗。ICARUS 监测器可以被回收和再利用。ICARUS 系统大规模应用后,其造价将会大规模下降。

4 前景展望

世界上大多数野生动物的活动仍在研究人员视域之外。现实中,野生动物活动地点常常是研究人员无法到达的。此外,野生动物设法避开人类活动。我们迫切需要实时跟踪野生动物。ICARUS 利用卫星天线探测鸟类或其他动物佩戴的 ICARUS 感应器。每一只 ICARUS 感应器可以实时记录个体的位置、加速度和周边的气候变量,有着广

泛的应用前景。

ICARUS 除了通过大规模的迁徙鸟类跟踪,提供高分辨率的动物疾病传播路径,如 H5N1 禽流感毒株的传播,有助于预警、控制动物传播的传染病之外,还可以提供目前常规气候站之外的地点,如公海的气候数据。ICARUS 可以追踪数千只鸟类,相当于在全球范围内建立了一个低成本、多位点的天气监测系统。

通过结合 ICARUS 附加的加速度传感器,研究者可以探究鸟类为何选择特定的飞行路线。传感器还可以传感鸟类飞行重拍打翅膀的次数、位置以及途中的风速和降水记录。科学家们可以用这些数据比较分析鸟类迁飞的能量消耗,开展迁徙鸟类的生理、能量代谢、行为学和仿生学研究。

跟踪非法野生动物、木材和鱼类产品从源头流向消费者的过程中,需要实时跟踪非法贩运路线和走私者,为打击非法野生动植物贸易执法提供线索。人们曾利用 GPS 追踪器嵌入包括象牙在内的非法野生动物制品,追踪非法交易大宗商品供应链。ICARUS 追踪设备体积小和性价比高,有望成为监测非法野生动物及其产品贸易的另一个利器。

如何获得足够的经费赞助、争取尽可能多的用户、在空间站上安装足够多的天线、建立可靠的野生动物互联网,是 ICARUS 成功与否的关键。此外,国际关系也是影响 ICARUS 的一个重要决定因素。

在西方国家,野生动物跟踪设备是野生动物研究设备产业中一项重要产业。我国的野生动物研究设备产业起步较晚。中国研究者早期使用的野生动物无线电跟踪多是进口产品^[18]。然而,目前中国研制的野生动物跟踪 GPS 颈圈进展很快。中国北斗星导航系统的研发为中国野生动物跟踪研究提供了新的机遇。中国北斗星导航系统是中国自主建设、独立运行的卫星导航系统,为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务。2020 年,中国北斗星卫星导航将全面建成^[19]。届时,中国北斗星导航系统将野生动物卫星跟踪研究提供新的选项,不仅为中国野生动物研究人员抢占学科制高点提供条件,也为全球的野生动物研究者提供新选项。

致谢 感谢中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA23100203)和国家重点研发计划(2016YFC0503303)资助;感谢两位审稿人和 Marc Foggin 博士的宝贵修改意见。

推荐阅读文献

- Curry A. The internet of animals that could help to save vanishing wildlife. *Nature*, 2018, 562: 322–326
- Jiang Z G. Field Methods for Nature Conservation (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2002 [蒋志刚. 自然保护野外研究技术. 北京: 中国林业出版社, 2002]
- Jiang Z G, Mei B, Tang Y Z, et al. Methods in Animal Behavior (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012 [蒋志刚, 梅兵, 唐业忠, 等. 动物行为学方法. 北京: 科学出版社, 2012]
- Amlaner C J Jr, MacDonald D W. A Handbook on Biotelemetry and Radio Tracking. Oxford: Pergamon Press, 1979

- 5 Hooten M B, Johnson D S, McClintock B T, et al. *Animal Movement: Statistical Models for Telemetry Data*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2017
- 6 Alkon P U, Cohen Y, Jordanm P A. Towards an acoustic biotelemetry system for animal behavior studies. *J Wildl Manage*, 1989, 53: 658–662
- 7 Mackay R S. *Bio-medical Telemetry: Sensing and Transmitting Biological Information from Animals and Man*. New York: IEEE Press, 1993. 540
- 8 Tomkiewicz Jr S M. Advancements in the use of GPS technology in obtaining position information from free-ranging wildlife. In: Austin J E, Pietz P J, eds. *Forum on Wildlife Telemetry: Innovations, Evaluations, and Research Needs*. Jamestown, ND: Northern Prairie, 1997. 70
- 9 Kenward R. *Wildlife Radio Tagging, Equipment, Field Techniques and Data Analysis*. London: Academic Press, 1987
- 10 Rodgers A R, Lawson E J G. Field trials of the Lotek GPS collar on moose. In: Austin J E, Pietz P J, eds. *Forum on Wildlife Telemetry: Innovations, Evaluations, and Research Needs*. Jamestown, ND: Northern Prairie, 1997. 58
- 11 Ceruzzi P E. *GPS*. Cambridge: MIT Press, 2018
- 12 Smith A E, Cary J R. Use of ArcView spatial analyst with wildlife telemetry data. In: Austin J E, Pietz P J, eds. *Forum on Wildlife Telemetry: Innovations, Evaluations, and Research Needs*. Jamestown, ND: Northern Prairie, 1997. 13
- 13 Queiroz N, Humphries N E, Couto A, et al. Global spatial risk assessment of sharks under the footprint of fisheries. *Nature*, 2019, 572: 461–466
- 14 Adams T S, Chase M J, Rogers T L, et al. Taking the elephant out of the room and into the corridor: Can urban corridors work? *Oryx*, 2017, 51: 347–353
- 15 Schlossberg S, Chase M J, Griffin C R. Poaching and human encroachment reverse recovery of African savannah elephants in South-east Angola despite 14 years of peace. *PLoS One*, 2018, 13: e0193469
- 16 Nelson M P E, Bruskotter J T, Vucetich J A, et al. Emotions and the ethics of consequence in conservation decisions: Lessons from Cecil the Lion. *Conserv Lett*, 2016, 9: 302–306
- 17 Wang Y, Chu H J, Han L L, et al. Home range and its influencing factors of re-wild Przewalski's wild horse *Equus przewalskii* (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2016, 36: 545–553 [王渊, 初红军, 韩丽丽, 等. 野放普氏野马(*Equus przewalskii*)家域面积及其影响因素. *生态学报*, 2016, 36: 545–553]
- 18 Hu H, Jiang Z. Experimental release of Père David's deer in Dafeng Reserve, China. *Oryx*, 2002, 36: 196–199
- 19 The State Council Information Office of the People's Republic of China. White Paper on China's Beidou Navigation Satellite System (in Chinese). Beijing: The State Council Information Office of the People's Republic of China, 2016 [中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国北斗卫星导航系统白皮书. 北京: 中华人民共和国国务院新闻办公室, 2016]

Summary for “野生动物互联网跟踪技术 ICARUS”

Using the new technologies and the Internet to track wild animals, bringing new opportunities for wildlife research and conservation

Zhigang Jiang^{1,2}

¹ Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

E-mail: jainzg@ioz.ac.cn

Identifying individual wild animals in the field has always been challenging; even more so has been tracking their movements. However, the advent of Global Positioning Systems (GPS)-enabled radio collars (tags) around the end of last century has marked a new era in wildlife research. Radio/GPS collars are powerful tools for the remote identification and real-time geolocation (through telemetry) of individual wild animals. Since the beginning, though, the main limiting factor for application of radio/GPS telemetry in wildlife monitoring has been battery weight. It is generally accepted that the weight of a radio/GPS collar and battery should not exceed 3% of the weight of the target animal; otherwise the excessive burden is likely to affect the behavior and survival of the target individual. For animals that weigh less than 100 grams, even the smallest currently available radio/GPS collars are too heavy, and 75% of all bird and mammal species, and all insects, fall in this category. Although smaller and lighter integrated circuit chips are being developed, the weight of the batteries used in radio/GPS collars has remained virtually unchanged over the past couple decades.

German animal behavior scientist Dr. Martin Wikelski has worked on tracking wild animals over the past decade, and has developed a novel internet-based approach to tracking of wildlife, namely the International Cooperation for Animal Research Using Space (ICARUS) system. The ICARUS system uses solar energy to charge the solar cells integrated with tracking devices, which recently have been developed to weigh as little as 5 grams. This system will enable researchers to connect to so many species, from rhinos and starlings to baby sharks, such that it could lead to the creation of an “internet of animals”. ICARUS provides us with the means to carry out large-scale research, tracking bird migration and small animal movements using simple mobile phone applications. The system would allow each transmitter to track an animal’s movements at preset intervals as well as record its lifetime travel, activities, and energy expenditure—Such that wildlife biologists could readily know where any tracked wild animal is located and what it is doing in field along with its longer-term behavioural and geospatial statistics. ICARUS monitors are less expensive than the previous generations of GPS collars and they can be recycled and reused, thus saving on cost and increasing the feasibility of conducting more extensive large scale satellite tracking of wild animals.

After several attempts, Dr. Wikelski finally has managed to trial this new technology in the field with support of the Russian space station. It is a new step in the battle to save endangered wildlife, particularly wide ranging migratory species, enabling us to understand their geographic patterns and behaviors. This technology also should enable us to learn about more complex matters such as the movement of pathogens carried by bats, or abnormal animal behaviors that could be instrumental for the early detection (and warning) of imminent earthquakes.

As China’s wildlife research equipment industry started later than several other countries, its field research studies based on radio and GPS telemetry mostly use foreign equipment. However, China recently has been making rapid progress in the development of GPS collars for monitoring wildlife. The development of the Beidou Satellite Navigation System in particular offers a range of new opportunities for tracking wildlife, and hence new options for wildlife researchers in China and around the world.

radio telemetry, GPS collar, wild animals, International Cooperation for Animal Research Using Space (ICARUS) Project, Beidou Satellite Navigation System

doi: 10.1360/TB-2019-0522