

基于无限状态马尔可夫链的新型贝叶斯方法，利用哨兵-1 时间序列及时检测森林损失

全球森林因森林损失而发生了重大变化[7]，这说明迫切需要对森林进行实时监测，以减少植被的进一步损失，并及时采取干预措施。一直以来，森林监测主要依赖光学图像[3]，而光学图像容易受到云层覆盖的影响，尤其是在热带地区。近年来，出现了基于合成孔径雷达 (SAR) 的系统，它具有全天候可操作的优势 [2]、[5]、[6]。然而，基于合成孔径雷达的方法也面临挑战，例如土壤水分变化等因素导致的反向散射变化。此外，精确识别小规模干扰对合成孔径雷达系统来说仍然是个问题，部分原因是采用了空间滤波技术来减少斑点的影响。此外，在后向散射信号具有明显季节性的地区（如干旱森林和热带稀树草原）监测森林损失也存在局限性，导致对这些大面积碳汇的监测严重不足。

本研究通过无限状态马尔可夫链，利用贝叶斯推理方法，提出了一种基于合成孔径雷达的无监督森林损失识别技术。该方法将森林损失视为经辐射地形校正 (RTC) 的哨兵-1 单偏振时间序列中的变化点检测问题。值得注意的是，这种方法无需采用空间滤波即可保持测量的原始分辨率。每个新的观测数据都会对森林砍伐的可能性做出贡献，其中包含先验知识和数据模型[1]。该方法的迭代适应确保了对波动和趋势的稳健性，不仅能在茂密的森林中，而且能在受季节变化影响的地区进行森林损失监测。

在评估所提出的方法期间，通过比较代表不同保守程度的各种配置与现有的近实时 (NRT) 森林损失监测系统（包括 GLAD-L [3]、RADD [6]，以及 2020 观测年期间的全球森林观测 (GFW) 综合警报）进行了测试。具体来说，全球森林观测系统将 GLAD-L、GLAD-S2 和 RADD 的警报随时纳入其中。评估主要侧重于巴西亚马逊和塞拉多林地热带草原的小型验证多边形（即小于 1 公顷）。通过与 MapBiomass Alerta 验证数据集[4]进行比较，计算了检测、遗漏和误报等性能指标。

我们的研究揭示了在检测小规模扰动方面取得的重大进展，同时还显著减少了受检生物群落的误报率。在巴西亚马逊地区，我们的方法获得了 97.3% 的 F1 分数，超过了目前表现最好的 NRT 系统所获得的 93.1% 分数。此外，通过重点比较，我们还发现现有系统有高估森林损失的倾向，这可能是由于空间过滤影响了数据分辨率。相比之下，我们的方法在没有滤波的情况下检测更精确，而且无论配置如何，误报率都明显低于所有考虑过的系统。在塞拉多地区，我们的方法获得了 97.4% 的 F1 分数，明显超过了通过领先光学技术获得的 75.5%。总之，我们的自适应方法以较低的误报率显著提高了森林损失检测能力，在受到广泛监测的亚马逊和塞拉多地区都显示出了功效，而在塞拉多地区，季节性变化给现有系统带来了挑战，导致监测受到限制或无法监测。

我们的研究表明，我们在检测小规模干扰方面取得了重大进展，同时在所调查的生物群落中误报率显著下降。在巴西亚马逊地区，我们的方法获得了 97.3% 的 F1 分数，超过了目前表现最好的 NRT 系统 93.1% 的分数。此外，重点比较还突出了现有系统高估森林损失的倾向，这可能是由于空间过滤影响了数据分辨率。相反，与所有考虑过的系统（无论其配置如何）相比，我们的方法在没有过滤的情况下检测更准确，误报率也明显更低。在塞拉多地区，我们的方法获得了 97.4% 的 F1 分数，大大超过了领先光学技术的 75.5%。总之，我们的自适应方法以最低的误报率显著提高了森林损失检测能力，在受到广泛监测的亚马逊和塞拉多地区都表现出了很好的效果。

参考文献

- [1] R. P. Adams and D. J. MacKay, *Bayesian Online Changepoint Detection*, arXiv 0710.3742, 2007.
- [2] J. Doblas, . M. S. Reis, A. P. Belluzzo, C. B. Quadros, D. R. V. Moraes, C. A. Almeida, L. E. P. Maurano, A. F. A. Carvalho, S. J. S. Sant'Anna and Y. E. Shimabukuro, "DETER-R: An Operational Near-Real Time Tropical Forest Disturbance Warning System Based on Sentinel-1 Time Series Analysis," *Remote Sensing*, vol. 14, 2022.
- [3] M. Hansen, A. Krylov, A. Tyukavina, P. Potapov, S. Turubanova, B. Zutta, S. Ifo, B. Margono, F. Stolle and R. Moore, "Humid Tropical Forest Disturbance Alerts Using Landsat Data," *Environmental Research Letters*, 2016.
- [4] MapBiomas, Alert Project - Validation and Refinement System for Deforestation Alerts with High-Resolution Images, accessed in 2024.
- [5] S. Mermoz, A. Bouvet, T. Koleck, M. Ballère and T. Le Toan, "Continuous Detection of Forest Loss in Vietnam, Laos, and Cambodia Using Sentinel-1 Data," *Remote Sensing*, vol. 13, 2021.
- [6] J. Reiche, A. Mullissa, B. Slagter, Y. Gou, N. E. Tsendbazar, C. Odongo-Braun, A. Vollrath, M. Weisse, F. Stolle, A. Pickens, G. Donchyts, N. Clinton, N. Gorelick and M. Herold, "Forest disturbance alerts for the Congo Basin using Sentinel-1," *Environmental Research Letters*, 2021.
- [7] C. Vancutsem, F. Achard, J. F. Pekel, G. Vieilledent, S. Carboni, D. Simonetti, J. Gallego, L. E. Aragão and R. Nasi, "Long-term (1990–2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics," *Science Advances*, vol. 7, 2021.