数字对象标识符：
10.46620/22-0033

基于卫星电视广播进行机会式降雨测量的可行性研究

F. Sapienza、G. Bacci、F. Giannetti、V. Lottici、A. Vaccaro、G. Serafino、A. Ortolani、F. Caparrini、A. Antonini、S. Melani、A. Mazza、L. Baldini、E. Adirosi 和 L. Facheris

摘要——降雨量分布图通常依据传统气象设备采集的测量数据生成，例如雨量计和气象站。本文旨在展示机会式降雨测量的优势：该方法基于商用级卫星终端（例如用于电视广播的终端）提供的信号强度测量数据。为评估这种方法的可行性及其在资本支出和运营支出方面的显著优势，同时考察其精度提升，我们针对一个特定的真实测试区域开展了农业应用案例研究，并采用高斯建模合成降雨。

1. 引言与研究动机

在许多应用领域，对区域内降水的监测正变得至关重要，包括公共安全、商业服务（如农业）和个人服务（如休闲活动） [1]。例如，准确的降水分布图有助于农业部门制定战略决策，以提高生产质量并管理风险 [2]。

为确保有效性，必须通过降水分布图提供地面降水估算结果，而降水分布图必须具备以下特点：1）降水率测量准确；2）完整、连续，且具有较高的时空分辨率；3）与测量数据采集相比，地图生成延迟可忽略不计。传统上，这一目标是通过结合专业仪器采集的测量数据来实现的，例如气象站、气象雷达、雨滴谱仪和雨量计（雨量计）。过去几十年来，研究人员一直在探索利用微波（lW）链路，通过关联传播路径上的射频衰减与降水，机会性地获取降水估算值。

这包括基于卫星的雨量传感设备，它们通常利用地球静止轨道（GEO）卫星在 Ku 波段（10 , 13 GHz）进行电视广播。这种方法具有以下优势 [3]：1）无需授权，因为可以自由获取和处理卫星下行链路（DL）信号；2）接收终端的部署在技术要求上极低；3）可以使用价格低廉的家庭接收商用级设备。

本文旨在展示使用基于卫星的雨量传感设备来提高雨量监测网覆盖密度的可行性，从而提升降雨分布图的准确度和分辨率。为进行模拟，本研究采用了：1）将降水场建模为圆对称高斯降水场的合成降雨；2）基于反距离加权（IDW）插值的经典空间化方法 [4]。尽管文献中提供了许多更复杂且性能更优的空间化技术（例如 [5]），但本文采用较为简单的方法，以更好地突出基于卫星的传感器网络的潜力。

2. 系统模型

2.1 基于卫星的降雨感知基本概念

本研究采用的机会式雨量感测方法基于对 l W 链路衰减的测量，并利用了广为人知的幂律 [3]

$$A/L = \gamma = \alpha \cdot R^{\beta} \qquad (1)$$

其中，A（单位为分贝）表示降雨期间（湿润状态）信号强度相对于降雨前数值（干燥状态）的总附加衰减，L（单位为千米）为湿润无线电路径的长度，c（单位为分贝/千米）为相应的比衰减，R（单位为毫米/小时）为降雨率（假设沿路径 L 保持恒定），a 和 b 分别为与频率和极化方式相关的经验系数 [3]。

稿件收于2022年12月6日。

Fabiola Sapienza、Giacomo Bacci、Filippo Giannetti 和 Vincenzo Lottici 任职于意大利比萨 56122，Via G. Caruso 16 的比萨大学信息工程系；电子邮箱：fabiola.sapienza@ing.unipi.it、giacomo.bacci@ unipi.it、filippo.giannetti@unipi.it、vincenzo.lottici@unipi.it。

Attilio Vaccaro 和 GiovanniSerafino 任职于 MBI srl，地址：Via F. Squartini 7, 56121 比萨，意大利；电子邮箱：avaccaro@mbigroup.it、gserafino@mbigroup.it。

Alberto Ortolani、Francesca Caparrini、Andrea Antonini、Samantha Melani 和 Alessandro Mazza 任职于 Consorzio LaMMA，地址：CNR-IBE，Via Madonna del Piano 10, 50019 塞斯托菲奥伦蒂诺，意大利；电子邮箱：ortolani@lamma.toscana.it、caparrini@ lamma.toscana.it、antonini@lamma.toscana.it、melani@lamma. toscana.it、mazza@lamma.toscana.it。

Luca Baldini 和 Elisa Adirosi 任职于意大利国家研究委员会大气科学与气候研究所，地址：意大利罗马 Via Fosso del Cavaliere 100，邮编 00133；电子邮箱：l. baldini@isac.cnr.it、elisa.adirosi@isac.cnr.it。

Luca Facheris 任职于意大利佛罗伦萨 50139，Via di S. Marta 3 的佛罗伦萨大学信息工程系；电子邮箱：luca.facheris@unifi.it。

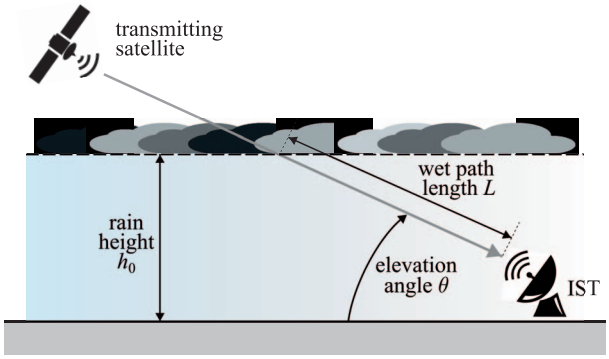

图1. 倾斜卫星湿链路的几何示意图。

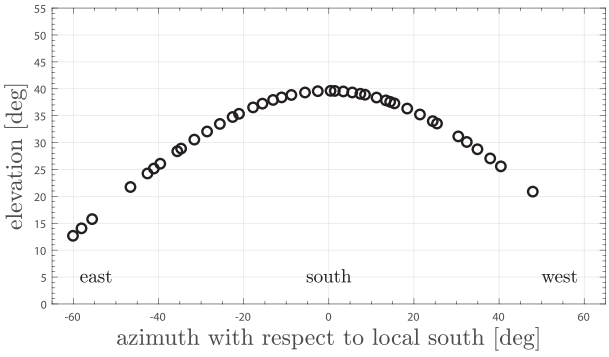

图2. 从意大利比萨所见的地球静止轨道弧。

长度 L 可根据链路几何推导得出。图1展示了穿过降雨区的倾斜卫星湿链路，并假设采用 [6] 中详述的对流层模型。卫星仰角 h 是已知的设计参数，取决于接收机位置。降雨高度 h_0 可根据短期预报或基于接收位置所取的平均值所提供的 08C 等温线高度推导得出，也可采用 [6] 中提出的方法。

衰减 A 可通过大多数商用接收机提供的信噪比（SNR）$g = E_s/N_0$ 推导得出，该比值为符号能量 E_s 与单边噪声功率谱密度 N_0之比。具体而言，$A = (g^{dry}/g^{wet})\,(1 - n) + n$，其中上标“dry”表示参考电平（在晴空时适当预先存储），上标“wet”表示降水期间的当前读数，n 是一个取决于噪声贡献的设计参数（见 [7, 式（4）]）。请注意，要准确进行降雨感知，需要对由式（1）推导的关系式作适当调整，以考虑对流层分层结构（例如，纳入融化层） [7]。

2.2 多卫星降雨感测

基于第 2.1 节所述原理，我们可以机会性地利用用于直播到户（DTH）电视广播的卫星信号。具体而言，在任何地点，通常都有多颗直播到户电视广播卫星位于地球静止轨道弧的视线范围内（即从地球上空观测到的克拉克带），且其覆盖区包含接收位置。例如，假设接收位置为意大利比萨（10.41478E, 43.71178N），则 Ku 波段中约有 40 颗广播卫星位于从 70.58E 到 37.58W 的地球静止轨道弧上，且至少有一个波束覆盖该市 [3]（图 2）。

多卫星降雨传感器（MSRS）的一种实际实现方式，是采用商用级直播到户（DTH）多波束天线，例如图 3 所示的天线，其可配置多达 16 个低噪声块降频器（LNB），覆盖一段弧形范围 408。关于 MSRS 的更详细描述，参见 [8]。每个 LNB 均可测量信噪比 g，并根据第 2.1 节所述模型估算降雨率；再利用第 3 节概述的方法生成降雨分布图。

2.3 测试区域

为开展可行性研究，我们选取一个具体案例研究：意大利托斯卡纳比萨市附近一块面积为 $12\ km^2 \times 12\ km^2$ 的区域，如图4（红框）所示。该区域设有五个雨量计（其中三个属于托斯卡纳大区水文雨量网络，通过 LaMMA大区网络 [10]接入；另外两个来自 ETG网络 [11]）和两个多卫星传感器系统，其坐标见表1。每个多卫星传感器系统均配有两个低噪声变频器。具体而言，Podere Rottaia 的低噪声变频器分别指向 Eutelsat 10A（东经108度）和 MonacoSat 卫星（东经528度），而 Centro Avanzi 的低噪声变频器则分别指向以下卫星



图3. 多低噪声变频器接收机的特写，采用 Wave- Frontier T90 双反射面环面天线 [9]。

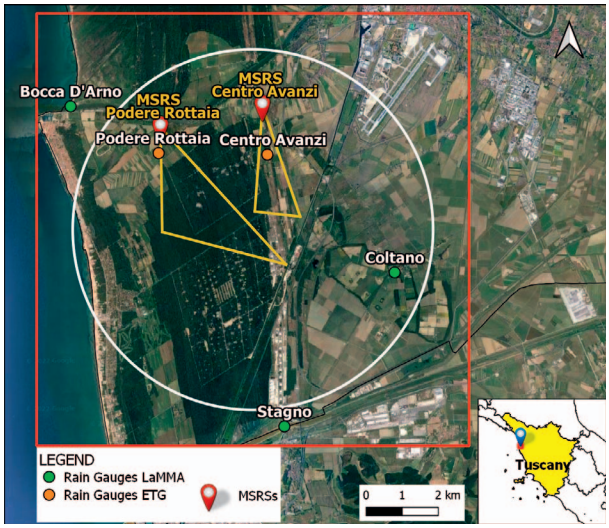

图4. 测试区域内雨量传感器的位置。

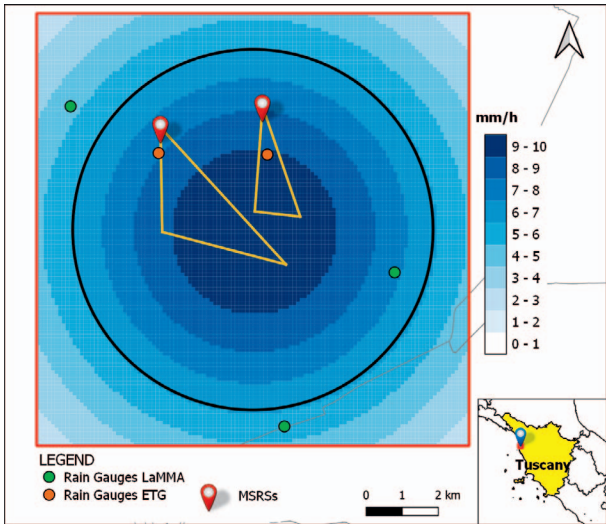

图5. 模拟降雨模型。

东经4.88度的 Astra 4A 和东经28.28度的 Astra 2G。斜路径的地面投影以黄色线条表示，假设降雨高度为2,700米。由于目前仍在研究多卫星传感器系统所采集数据的可靠性，我们建议采用第3节详述的模拟降雨模型，并假定图4中所示的所有雨量传感器均能够反演合成降雨模型。

3. 插值方法

模拟降雨模型为图5所示的圆形高斯降水场，其降雨率 R 随坐标 (x, y) 变化，并满足以下关系：

$$R(x,y) = \bar{R} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right\} \qquad (2)$$

其中，假设系统坐标的原点（x = 0, y = 0）位于西北顶点（东经10.26918度，北纬43.70408度），而$x_0 = -y_0 = 6$ km，$\bar{R}$ =10 mm/h，且r = 5 km。这对应于测试区域中心区域的一次显著降雨事件，在图4和图5中以圆形区域表示。请注意，模拟事件未设定特定持续时间，而本文的分析适用于任何事件持续时间，因为其依据是瞬时雨强。

表1. 降雨传感设备的WGS84坐标

（设备类型）ID	经度（°E）	纬度（°N）
（雨量计）Bocca D'Arno	10.2803	43.6807
（雨量计）Podere Rottaia	10.3104	43.6687
（雨量计）Centro Avanzi	10.3104	43.6687
（雨量计）Coltano	10.3909	43.6379
（雨量计）Stagno	10.3104	43.5999
（多卫星降雨传感器）Podere Rottaia	10.3112	43.6751
(多卫星降雨传感器) Centro Avanzi	10.3464	43.6800

本文不受事件持续时间影响，因为其依据是瞬时雨强。

为了还原降水场，我们对降雨传感设备测得的合成降雨率应用空间化技术。研究区域被划分为 120 3 120 个网格单元，每个网格单元的尺寸为 100 m 3 100 m。用于估算第 k 个网格单元中降雨率 R_k 的插值方法是反距离加权插值[4]，该方法根据已知点处的数值加权平均计算网格单元中的降雨率，具体如下：

$$\hat{R}_k = \left(\sum_{n=1}^{N} \frac{R(x_n, y_n)}{d_{n,k}^4}\right) \Big/ \left(\sum_{n=1}^{N} \frac{1}{d_{n,k}^4}\right) \qquad (3)$$

其中，N 为雨量传感器的数量，$R(x_n, y_n)$ 是第 n 个设备使用式 (2) 测得的降雨率，该设备位于坐标 (x_n, y_n) 处；$d_{n,k}$ 是第 k 个网格单元与 (x_n, y_n) 之间的距离。注意，与较远数值相比，距离已知点较近的数值具有更大的权重。

4. 数值结果

为了获取感兴趣区域内的降水场，我们重点考察两种情形：1）仅使用雨量计的合成测量值；2）使用LaMMA网络中三个雨量计的合成测量值，以及ETG网络中两个多卫星传感器系统的合成测量值，这两个系统分别放置在与两个雨量计相同的位置。所得降雨分布图分别见图6和图7。参见图7，两个多卫星传感器系统的每个低噪声变频器均被视为一个虚拟雨量计（红点），位于第2.3节所述卫星斜向路径地面投影的末端，并测量沿其斜向路径观测到的平均降雨率。由于我们关注的是根据（2）模拟并在图5中展示的圆形建模降雨事件，因此重点考察黑色圆圈所示的中心区域，

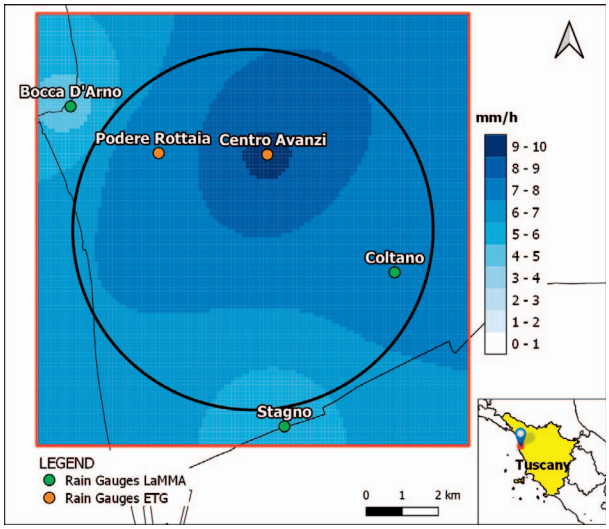

图6. 仅使用雨量计（情景A）反演得到的测试区域降雨分布图。

该区域在图6和图7中以黑色圆圈标示。可以看出，使用两个多卫星传感器系统改善了降雨分布图，因为降雨场似乎更能反映感兴趣区域内的合成事件。

为定量比较这两种情形，我们分别针对降雨分布图中的黑色轮廓圆形区域和红色轮廓扩展方形区域计算均方根误差（RMSE）。表2展示了数值结果，可作如下解读：一方面，采用所提出的多卫星降雨传感器（MSRS）可降低感兴趣区域（黑色轮廓圆形区域）内降雨分布图的均方根误差，这为将此类设备纳入降雨估算传感器体系铺平了道路。另一方面，红色轮廓方形区域内测得的均方根误差有所增加，这是由于区域顶点附近的估算误差较大

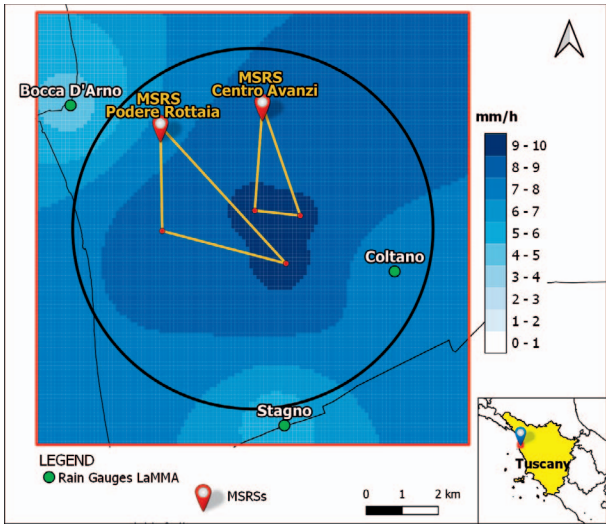

图7. 结合雨量计和多卫星传感器系统（情景B）反演得到的测试区域降雨分布图。

表2. 降雨率均方根误差(mm/h)

	情景A（仅使用雨量计）	情景B（雨量计 + 多卫星降雨传感器）
扩展区域	1.7662	1.9294
中心区域	1.1294	0.7997

（因此位于感兴趣区域之外）。这为多卫星传感器系统部署提供了设计准则：正确的做法是利用此类传感器加密感兴趣区域的监测布设，同时还可发挥第1节总结的所有优势（例如设备成本低、使用机会信号且安装灵活）。

5. 结论

测试结果表明，多卫星传感器系统可作为雨量传感器用于降雨图反演，在降低部署成本的同时提高估算精度。还应注意，使用多颗卫星可以增强网络的韧性，使其能够应对特定卫星系统偶尔出现的问题（例如信号中断和卫星重新定位）。基于多卫星降雨传感器的拟议系统正在托斯卡纳的农业环境中部署，以开展实验测试，并纳入 InsideRain 项目 [12]。这也是一项大规模实验性实地试验活动的前期阶段，该活动将在欧盟资助的 Score 项目 [13]，框架内开展，旨在增强欧洲沿海城市的气候韧性。

6. 致谢

本研究得到以下项目的支持：由意大利托斯卡纳大区政府资助的 InsideRain项目（第21885号法令，2020年12月18日）；以及由欧盟委员会“地平线2020”研究与创新计划资助的 Score 项目（资助协议编号：101003534）。本文还基于欧洲科学技术合作组织（COST）支持的 COST 行动 CA20136 OPEN-SENSE 的研究成果。

7. 参考文献

1. D. Kull、L. P. Riishojgaard、J. Eyre 和 R. A. Varley，《地面气象观测数据的价值》，技术报告，世界银行，华盛顿特区，2021 年。2. H. Das、F. Doblas-Reyes、A. Garcia、J. Hansen、L. Mariani、A. S. Nain、K. Ramesh、L. Rathore 和 S. Venkataraman，《农业气象实践指南》中的“农业天气与气候预报”，日内瓦，世界气象组织，2010 年。3. F. Giannetti 和 R. Reggiannini，“根据卫星下行链路衰减测量进行机会式降雨率估算：综述”，《传感器》，2021 年，21 卷，17 期，2021 年 8 月，第 5872 页。4. D. Shepard，“一种二维插值函数

，适用于不规则间隔数据”，ACM 全国会议，纽约州纽约市，1968 年 8 月 27–29 日。5. A. Ortolani、F. Caparrini、S. Melani、L. Baldini 和 F. Giannetti，“一种基于 EnKF 的方法：根据模拟的卫星至地面微波链路信号衰减生成降雨分布图”，《水文气象学杂志》，22 卷，5 期，2021 年 5 月，第 1333–1350 页。6. 国际电信联盟（ITU）-R，《用于预测方法的雨高模型》，建议书 P.839-4，瑞士日内瓦，2013 年。7. F. Giannetti、M. Moretti、R. Reggiannini 和 A. Vaccaro，“利用广播卫星信号的机会式应用来检测和估算降雨场的 NEFOCAST 系统”，《IEEE 航空航天与电子系统杂志》，34 卷，6 期，2019 年 6 月，第 16–27 页。

8. F. Giannetti、A. Vaccaro、F. Sapienza、G. Bacci、V. Lottici 和 L. Baldini，《多卫星降雨感测：设计准则与实施问题》，URSI 大西洋及亚太无线电科学会议（AT-AP-RASC），西班牙大加那利岛，2022年5月29日至6月3日。9. Wave-Frontier 有限公司。https://wavefront.en.ec21.com，2022。10. Consorzio LaMMA。https://www.lamma.rete.toscana.it，2022。11. ETG。https://www.etgsrl.it/settori/meteorologia，2022。12. 用于农业创新的智能降雨检测与估算仪器（InsideRain）。https://www.insiderain.it，2022。13. 欧洲沿海城市气候韧性智能控制（Score）https://score-eu-project.eu，2022。