

ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP PHẢN XẠ GNSS ĐỂ ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG PHÁT HIỆN SỰ THAY ĐỔI ĐỘ ẨM CỦA ĐẤT CÁT (APPLICATION OF GNSS-REFLECTOMETRY TO EVALUATE THE ABILITY TO DETECT MOISTURE CHANGES OF SANDY SOILS)

Hà Minh Cường¹, Vũ Phương Lan²

Viện Công nghệ Hàng không Vũ trụ - Đại học Công nghệ - ĐHQGHN ¹,

Khoa Địa lý – Đại học Khoa học Tự nhiên – ĐHQGHN ²,

Email: cuonghm@vnu.edu.vn

Abstract: *With population growth, water demand is expected to tremendously increase in the next decades. The optimization of water allocation for agriculture requires soil moisture monitoring. Recent studies suggested to take advantage of continuously emitted navigation signals by the Global Navigation Satellite System (GNSS) constellations, to retrieve soil moisture variations. This active remote sensing technique, known as GNSS Reflectometry (GNSS-R), consists in comparing the interference of reflected waves by the ground and those which come directly from satellites. It offers a wide range of applications in Earth sciences and particularly in soil moisture monitoring, this technique has shown their efficiency for soil with high clay content. It namely presents the advantage of sensing a whole surface around a reference GNSS antenna. In this article, we focus on soil moisture monitoring of sandy areas. The study site is a beach volley field, located in the Paul Sabatier University campus in Toulouse, France, the soil contains 100% of sand. We demonstrated that the waves of the GNSS signals penetrate deeply into the soil and reduce the interest of GNSS-R surface moisture measurements. However, it is possible to retrieve a correct estimate of the soil moisture at 0.1m depth and to obtain a very good temporal monitoring with the benefit of a spatial resolution directly correlated to the antenna height.*

Keywords: *GNSS-Reflectometry, Soil moisture, Signal-to-Noise-Ratio (SNR), Interference Pattern Technique (IPT)*

1. GIỚI THIỆU

Nước là nguồn tài nguyên thiết yếu quyết định sự sống còn của nhân loại, đảm bảo an ninh lương thực và sự phát triển bền vững của mỗi quốc gia. Từ đầu thế kỷ 20, nhu cầu tiêu thụ nước toàn cầu ngày càng tăng, chủ yếu do sự gia tăng dân số, quá trình mở rộng công nghiệp hóa – đô thị hóa dẫn đến việc nguồn nước bị ô nhiễm và ngày càng cạn kiệt. Dưới tác động của biến đổi khí hậu, hạn hán ngày càng nghiêm trọng ở nhiều nơi trên thế giới. Trong tương lai, khan hiếm nước sẽ là một vấn đề nghiêm trọng, đe dọa trực tiếp đến sự sinh tồn và phát triển bền vững. Ở nhiều quốc gia, đặc biệt là các nước có khí hậu khô hạn, nơi nguồn nước bị hạn chế và chủ yếu đến từ các hồ chứa nước ngầm ở mức thấp và không thể tái tạo. Khoảng 98% lượng nước trên trái đất là nước mặn, chỉ có 2% là nước ngọt. Trong số 2% đó, 70% lượng nước là tuyết và băng, 30% là nước ngầm, dưới 0.5% là nước mặt ở các sông, hồ và khoảng 0.05% là hơi nước trong khí quyển. Chính vì vậy, việc theo dõi, giám sát chu trình nước và quản lý nguồn nước ngầm có ý nghĩa quyết định. Độ ẩm đất là một trong những thông số quan trọng để thực hiện các nghiên cứu khí hậu, dự báo thời tiết, phân tích lũ lụt, phát triển nông nghiệp bền vững và tái tạo tầng chứa nước ngầm. Trong nông nghiệp, phân tích chuỗi thời gian thực về điều kiện độ ẩm của đất sẽ cho phép người nông dân tối ưu hóa việc quản lý và sử dụng đất đai. Các kỹ thuật đo lường hiện có như sử dụng dữ liệu vệ tinh InSAR, cảm biến thăm dò tại chỗ, ảnh nhiệt... đều có các đặc điểm khác nhau về độ phân giải không gian (diện tích nhỏ nhất được đại diện bởi một phép đo hay khả năng của cảm biến có thể nhận biết một chi tiết), độ phân giải theo thời gian (độ lặp của trị đo) và độ chính xác (chất lượng của phép đo được thực hiện bởi cảm biến). Tuy nhiên, để tối ưu hóa các tham số này cần chi phí rất lớn và khó thỏa mãn được đồng thời cả ba điều kiện trên. Các đầu dò độ ẩm thông thường chỉ cung cấp các phép đo điểm (vài cm^3), không đại diện cho cả khu vực. Do đó, các quan sát tại chỗ về độ ẩm đất sử dụng cảm biến đầu dò tuy có độ chính xác và độ phân giải thời gian cao nhưng lại có tính đại diện không gian rất thấp (Mougin, E. et al., 2009).

Với sự ra đời của kỹ thuật viễn thám, độ ẩm đất có thể được đo trên quy mô toàn cầu với độ phân giải không gian và thời gian ngày càng được cải thiện. Ví dụ, độ phân giải theo thời gian của thiết bị đo độ ẩm SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity Satellite) là 3 ngày tại xích đạo và với độ phân giải không gian khoảng 43km (Kerr, Y. H. et al., 2010). Đối với các cảm biến vi sóng chủ động như COSMO-SkyMed, tùy thuộc vào chế độ thu nhận, độ phân giải không gian có thể đạt đến vài m nhưng độ phân giải thời gian dao động từ 12 giờ đến vài ngày. Để quản lý bền vững tài nguyên nước, điều cần thiết là phải nâng cao hiểu biết của chúng ta về biến động độ ẩm đất và độ ẩm của bề mặt đất (SSM) có liên quan như thế nào với nước ngầm (Aranyosy, J. and Ndiaye, B., 1993; Archambault, J., 1960). Một yếu tố quan trọng để nâng cao hiểu biết này là thông qua việc cải thiện giám sát độ ẩm ở quy mô cục bộ đến quy mô trung bình liên quan đến độ phân giải thời gian cao.

Các nghiên cứu gần đây đã đề xuất việc tận dụng các “tín hiệu cơ hội” như sóng điện từ được liên tục phát ra bởi các chòm sao vệ tinh của hệ thống định vị toàn cầu (GNSS) bao gồm GPS, GLONASS, GALILEO và Compass/BeiDOU.... Từ đó có thể truy xuất các thông số địa vật lý khác nhau của bề mặt Trái đất với độ phân giải không gian, độ phân giải thời gian và độ chính xác cao (Darrozes, J. et al., 2016). Kỹ thuật viễn thám cơ hội này, được gọi là phép đo phản xạ GNSS (GNSS-R), dựa trên việc phân tích các sóng GNSS nhận được bởi một ăng-ten sau khi phản xạ trên bề mặt Trái đất, được gọi là tín hiệu đa đường "multipath" (Darrozes, J. et al., 2016; Roussel, N. et al., 2014). Tín hiệu phản xạ GNSS cung cấp một loạt các ứng dụng trong khoa học Trái đất và đặc biệt là trong giám sát độ ẩm đất. Cho đến nay, các kỹ thuật này hầu hết được sử dụng để lấy độ ẩm đất của đất có hàm lượng đất sét phong phú. Độ phân giải không gian là một hàm của độ cao ăng-ten trên bề mặt phản xạ (đối với một chòm sao vệ tinh nhất định trong một khoảng thời gian xác định).

Một khu vực xung quanh ăng-ten từ vài mét đến vài km sẽ bị bao phủ bởi phản xạ của sóng điện từ. Để phủ sóng vài km, thiết bị phải ở độ cao nhất định (< 293 m) (Ribot, M. A. et al., 2016). Độ phân giải theo thời gian phụ thuộc chủ yếu vào thuật toán tính toán được sử dụng để ước tính sự thay đổi độ ẩm của đất, thường từ vài giờ hoặc vài ngày (Chew, C. C. et al., 2014; Larson, K. M. et al., 2010). Nghịch đảo độ ẩm đất dựa trên sự tương tác của sóng GNSS phản xạ trên mặt đất và do đó chứa thông tin về các đặc điểm của bề mặt phản xạ, đặc biệt là hàm lượng nước ở độ sâu từ 2-5 cm (Roussel, N. et al., 2016). Sự giao thoa của sóng trực tiếp và sóng phản xạ đặc biệt đáng chú ý trong giá trị tỷ lệ nhiễu trên tín hiệu (SNR) được máy thu ghi lại. Các biến thể về bản chất của bề mặt (chủ yếu là thành phần đất, độ ẩm, độ nhám) và các đặc tính của nó làm thay đổi tín hiệu phản xạ GNSS, và do đó SNR có thể được phân tích để ước tính độ ẩm đất. Phương pháp ước lượng này có ưu điểm chính là dễ dàng áp dụng bằng cách sử dụng bất kỳ ăng-ten GNSS thông thường nào (đặc biệt là ăng-ten của mạng lưới GNSS cố định hiện có) mà không cần bất kỳ sửa đổi phần cứng nào. Kỹ thuật này đã được áp dụng thành công để lấy lại độ ẩm đất trong các điều kiện môi trường đất trồng và đất có thực vật thưa thớt (Chew, C. C. et al., 2014; Chew, C. C. et al., 2015; Rodriguez-Alvarez, N. et al., 2011; Zhang, S. et al., 2018; Zhang, S. et al., 2017). Tất cả những nghiên cứu này đều thành công trong việc lấy lại độ ẩm của đất, nhưng chỉ duy nhất đối với trường hợp đất trồng hoặc có hàm lượng đất sét phong phú.

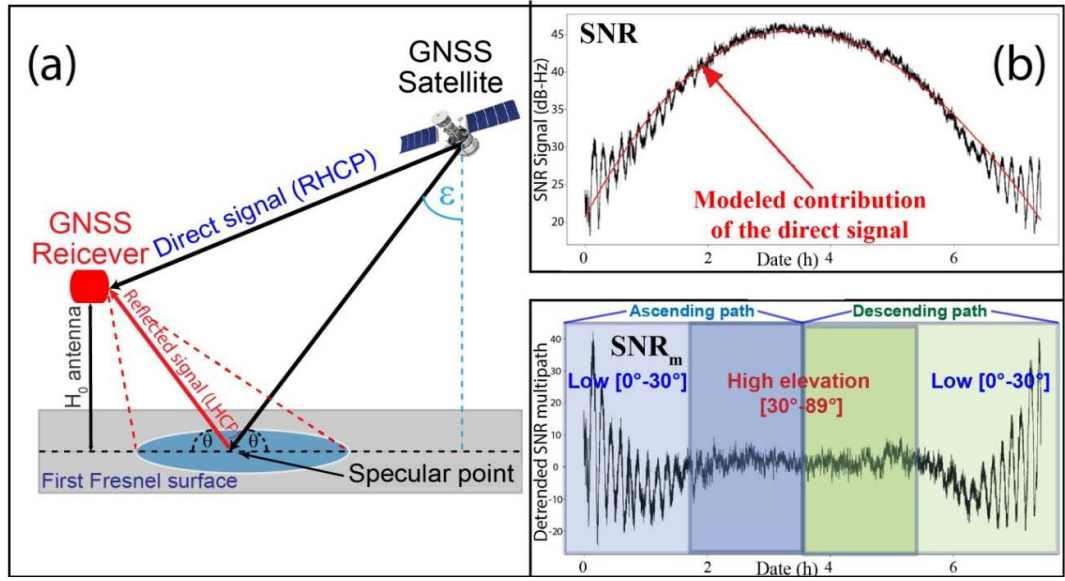
Mục đích của nghiên cứu này là chứng minh các thuật toán GNSS-R dựa trên một ăng-ten đơn được sử dụng để lấy độ ẩm bề mặt của đất cát trong điều kiện độ ẩm đất rất thấp. Phương pháp này dựa trên việc phân tích dữ liệu SNR liên tục được thu bởi ăng-ten trắc địa. Dữ liệu SNR kết hợp cả tín hiệu trực tiếp và tín hiệu phản xạ. Sự thay đổi độ ẩm của lớp đất bề mặt, có khả năng làm thay đổi các đặc tính điện từ của sóng phản xạ, tức là hằng số điện môi phức tạp phụ thuộc vào độ dẫn điện và mối quan hệ của chúng. Hai tham số khác nhau được phân tích là pha và tần số của tín hiệu đa đường (multipath) đóng góp vào SNR có liên quan trực tiếp với chiều cao ăng-ten (Lopez, T. et al., 2016). Kết quả thu được từ tổng số chòm sao vệ tinh GNSS khác nhau sẽ được sử dụng để mở pha theo chu kỳ và sẽ được đánh giá bằng cách sử dụng các bản ghi độ ẩm đất độc lập được đo tại hiện trường bằng cách sử dụng cảm biến đầu dò Theta (Roussel, N., 2015).

Nghiên cứu này trình bày kết quả thử nghiệm tại khu vực sân bóng chuyên trong khuôn viên đại học Paul Sabatier, Toulouse, Pháp với 3 ngày thu dữ liệu từ 25 đến 27 tháng 4 năm 2015. Bộ dữ liệu thử nghiệm này cung cấp mối tương quan của các tham số khác nhau bằng kỹ thuật giao thoa (IPT) dựa trên SNR. Các thông số này tương ứng với độ ẩm đất và chiều cao ăng-ten.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Kỹ thuật mô hình giao thoa - IPT

Phương pháp này dựa trên tín hiệu đa đường có mặt trong dữ liệu SNR, được thu nhận liên tục bởi một máy thu trắc địa và ăng-ten đi kèm của nó (Hình 1a) với tần số thu là 1 Hz. Tín hiệu phản xạ sẽ ảnh hưởng đến SNR bằng cách tạo ra một dao động trung gian từ tần số thấp đến tần số cao (phụ thuộc vào góc cao vệ tinh) với biên độ nhỏ hơn tín hiệu trực tiếp. Do tín hiệu trực tiếp được ưu tiên hơn tín hiệu phản xạ bởi độ tụ của tín hiệu khi thiết kế ăng-ten, vì vậy tín hiệu trực tiếp chi phối hình dạng chính của chuỗi thời gian SNR (Hình 1b). Để phân tích thành phần của đa đường, phần đóng góp của tín hiệu trực tiếp phải được loại bỏ khỏi dữ liệu SNR thô. Cách phổ biến là điều chỉnh và loại bỏ hàm đa thức bậc hai đơn giản cho chuỗi thời gian SNR thô để có được hàm đa thức SNR của tín hiệu đa đường multipath (Larson, K. M. et al., 2008).



Hình 1. (a) Tương tác giữa sóng điện từ GNSS và bề mặt phản xạ: Sóng trực tiếp được thu bởi mặt phân cực phải (RHCP) và sóng phản xạ được thu bởi mặt phân cực trái (LHCP). (b) $SNR_{total} = SNR_{direct} + SNR_m$ và phần đóng góp của SNR_m sau khi loại bỏ thành phần SNR_{direct} .

Hiệu ứng đa đường xuất hiện rõ ràng trong các phép đo SNR được ghi bởi máy thu GNSS trên các tần số khác nhau (L1, L2 và L5). Sự giao thoa này tạo ra các dao động có tần số $\tilde{f}$ là một hàm hình sin của góc cao vệ tinh và có thể được mô hình hóa như sau (Torbern, T. et al., 2015):

$$\tilde{f} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(\dot{h} \frac{\tan(\theta)}{\theta} + h_{eff} \right) \quad (1)$$

Trong đó: h_{eff} là chiều cao ăng-ten so với bề mặt phản xạ biến thiên theo thời gian. θ là góc cao vệ tinh. $\dot{h} = dh/dt$ là vận tốc dọc của bề mặt phản xạ (m/s). θ vận tốc của góc cao vệ tinh. λ là chiều dài bước sóng.

Tần số $\tilde{f}$ thường được ước tính bằng cách sử dụng cửa sổ trượt từ chuỗi thời gian SNR_m (SNR multipath) và sử dụng biểu đồ chu kỳ (Lomb-Scargle Periodogram) (Lomb, N. R., 1976; Scargle, J. D., 1982) dựa trên kỹ thuật phân tích hài hòa Fourier. Tần số của dao động đa đường tỷ lệ thuận với độ cao ăng-ten H_0 trên bề mặt phản xạ. Các đỉnh của biểu đồ được giữ lại phải đạt 1% (Fei Li., 2018) và xác định mức tối đa giữa $\tilde{f}_{max}$ và $\tilde{f}_{min}$ bằng cách sử dụng h_{max} , h_{min} (chiều cao ăng-ten lớn nhất và nhỏ nhất có thể đạt được trong suốt quá trình đo).

Trên quan điểm điện từ, chiều cao ăng-ten thay đổi ngay cả với bề mặt không chuyển động. Những biến đổi này là do sự thâm nhập của sóng radar vào lớp thực vật và đất, phụ thuộc vào độ ẩm đất, độ nhám, loại đất và mật độ thảm thực vật. Theo (Larson, K. M. et al., 2008), giả định rằng chiều cao ăng-ten không đổi theo thời gian ($h_{eff} = \text{hằng số}$), SNR_m có thể được biểu diễn bởi hàm của 3 ẩn số h_{eff} , A_m và Φ_m :

$$SNR_m = A_m \cos \left(\frac{4\pi h_{eff}}{\lambda} \sin(\theta) + \Phi_m \right) \quad (2)$$

Trong đó: A_m là biên độ của dao động đa đường biểu thị cường độ tán xạ ngược của bề mặt phản xạ. Φ_m là pha của dao động đa đường. A_m bao gồm cả mô hình khuếch đại và cường độ của tín hiệu đa đường, cả hai đều phụ thuộc vào góc cao vệ tinh. Quan sát thực địa cho thấy những hiệu ứng này về mặt pha và biên độ có mối tương quan chặt chẽ với độ ẩm đất (Larson, K. M. et al., 2010). Hơn nữa, những quan sát này đã chỉ ra rằng ảnh hưởng của độ ẩm đất nhạy với Φ_m hơn là A_m (Chew, C. C., et al., 2015; Roussel, N. et al., 2016).

Khi tần số của dao động đa đường $\tilde{f}$ được giải quyết, h_{eff} và h có thể được xác định, do đó phương trình $\tilde{f}$ cho vệ tinh i tại thời điểm t được tính như sau:

$$\tilde{f}_i(t) = U_i \dot{h}(t) + V_i h_{eff}(t) \quad (3)$$

Trong đó: $U_i = \frac{4\pi \tan(\theta_i)}{\lambda \dot{\theta}_i}$, $V_i = \frac{4\pi}{\lambda}$. Nếu có n vệ tinh quan sát được tại thời điểm t ta có hệ phương trình:

$$\begin{bmatrix} \tilde{f}_1(t) = U_1 \dot{h}(t) + V_1 h_{eff}(t) \\ \vdots \\ \tilde{f}_n(t) = U_n \dot{h}(t) + V_n h_{eff}(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Hoặc thể hiện dưới dạng ma trận:

$$F = U\dot{h}(t) + Vh(t) = AX \quad (5)$$

Trong đó: A ma trận cấu hình, X tương ứng với vector $\begin{pmatrix} \dot{h}(t) \\ h_{eff}(t) \end{pmatrix}$; khi ta có hệ thống đánh giá quá mức có thể được giải quyết bằng cách sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất để giải quyết cùng lúc h_{eff} và h (Roussel, N. et al., 2016):

$$X = (A^T A)^{-1} (A^T F) \quad (6)$$

Để lập bản đồ chính xác, cần phải có một phép đo từng vệ tinh tại mỗi thời điểm t và trong trường hợp đó chúng ta phải giảm số lượng ẩn chưa biết. Trong trường hợp này, chúng tôi sử dụng phương pháp tính được đề xuất bởi Larson et al. 2010, sự thay đổi chiều cao là không đáng kể ($|\dot{h}| < 1.10^{-5}$ m/s), công thức (1) có thể được viết dưới dạng:

$$\tilde{f} = \frac{4\pi}{\lambda} h_{eff} \quad (7)$$

Công thức (7) cho thấy tần số của dao động đa đường $\tilde{f}$ tỷ lệ với chiều cao ăng-ten h_{eff} và có thể được tính cho từng điểm đặc trưng của chuỗi thời gian đo độ ẩm.

2.2. Ước tính độ ẩm bề mặt đất (SSM) ở vùng đất cát bằng kỹ thuật IPT và phương pháp mở pha (Unwrapping phase)

Theo phương trình (2), 3 ẩn số h_{eff} , A_m và Φ_m có thể được tính từ SNR bằng kỹ thuật IPT cho mỗi vệ tinh GNSS. Tín hiệu SNR được tính ở hai trường hợp góc cao vệ tinh thấp (LSE) và góc cao vệ tinh cao (HSE). Do sự thay đổi pha sau khi sử dụng hàm mở pha Φ_{unw} , chiều cao ăng-ten thu được h_{eff} tỷ lệ với tần số $\tilde{f}$ (Eq. 1). Biên độ đa đường A_m không đổi (vì nó phụ thuộc vào mô hình khuếch đại và cường độ của đa đường) và dùng để tính lại chiều cao ăng-ten mới. Có thể xác định chiều cao ăng-ten sau khi sử dụng giai đoạn mở pha h_{eff}^{unw} theo công thức:

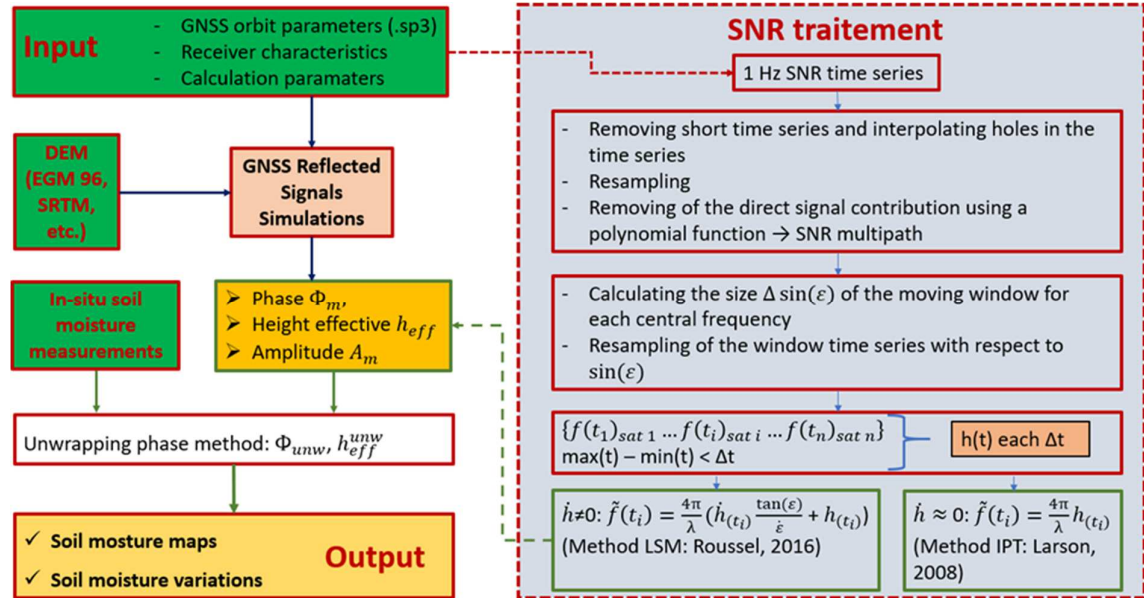
$$h_{eff}^{unw} = \left(\cos^{-1} \left(\frac{SNR_m}{A_m} \right) - \Phi_{unw} \right) \times \frac{\lambda}{(4\pi \times \sin(\theta))} \quad (8)$$

Từ đó, chúng tôi đề xuất một chuỗi xử lý phức tạp để ước tính SSM trong vùng cát bằng kỹ thuật IPT và phương pháp mở pha (Hình 2). Biến động độ ẩm bề mặt đất tỷ lệ với mức tối thiểu và tối đa của chuỗi thời gian tính toán mới của Φ_{unw} và h_{eff}^{unw} được tính toán. Hệ số tương quan (R) là thước đo tương quan tuyến tính giữa từng chuỗi thời gian này và thể tích độ ẩm đất (VSM) được đo bằng đầu dò Theta. Sai số trung phương tổng ($RMSE_{total}$) được tính theo công thức:

$$RMSE_{total} = RMSE_{rp} + RMSE_{SE} + RMSE_{spatial} \quad (9)$$

Trong đó, $RMSE_{rp}$ là sai số do sự khác nhau giữa độ ẩm ước tính từ SNR_m và số liệu độ ẩm đo bằng đầu dò Theta. $RMSE_{SE}$ là sai số thiết bị phụ thuộc vào góc cao vệ tinh, độ nhám bề mặt và độ sâu thâm nhập của sóng điện từ. $RMSE_{spatial}$ là sai số gây ra bởi sự thay đổi về không gian của

độ ẩm tại khu vực thực nghiệm.

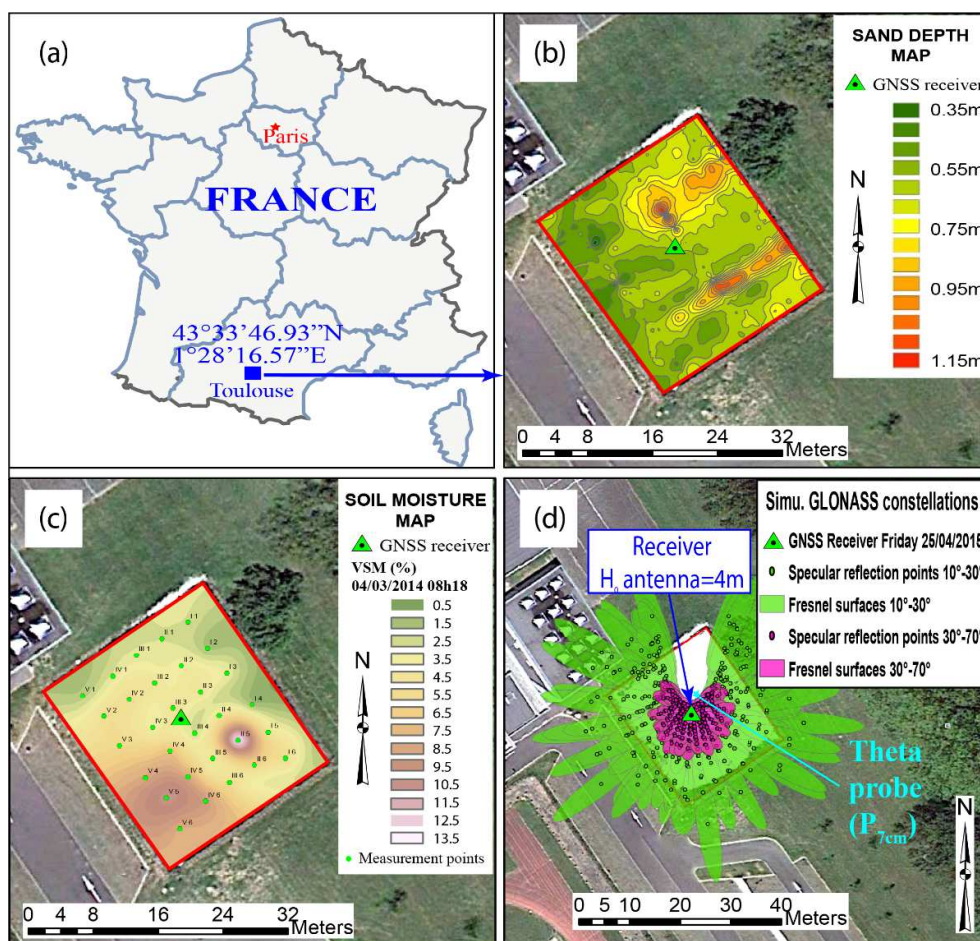


Hình 2. Sơ đồ quy trình chuỗi xử lý dữ liệu SNR để ước tính độ ẩm bề mặt đất ở vùng cát bằng kỹ thuật IPT và phương pháp Unwrapping phase.

3. KHU VỰC THỰC NGHIỆM VÀ DỮ LIỆU SỬ DỤNG

Thực nghiệm nằm trong khuôn khổ dự án MISTRAL H2020 (<http://www.mistrale.eu/>). Một máy thu GNSS Leica GR25 và ăng-ten AR10 đã được cài đặt tại trung tâm của sân bóng có diện tích 25x30 m² (tọa độ 43°33'46.93" N; 1°28'16.57" E) trong khuôn viên trường đại học Paul Sabatier, Toulouse, Pháp (Hình 3a). Sân bóng được coi là không có sự thay đổi về địa hình đáng kể, được giả định là một bề mặt phẳng trong mô phỏng các điểm phản xạ (không hiệu chỉnh DEM). Địa điểm này có nhiều ưu điểm: i) Bao gồm 100% cát sạch, hạt đồng nhất, kích thước nhỏ, có đường kính từ 0,3- 5,0 mm; ii) Mặt đất thoát nước tốt nên nước không bị đọng lại ngay cả trong trường hợp mưa lớn; iii) Độ ẩm của cát thay đổi rất nhanh vì cát có độ thấm thấu cao ~ 10⁻³ m/s. Điều này cho phép chúng tôi sử dụng một chuỗi thời gian ngắn (vài ngày) để định lượng ảnh hưởng của một lượng mưa đột ngột và cho thấy hiệu quả của phương pháp.

Các tần số L1 (S1C, 1575.42 MHz), L2 (S2W, 1227.60 MHz) của vệ tinh GPS và tần số L1 (S1C, 1598.06 – 1605.38 MHz) của vệ tinh GLONASS được thu liên tục trong 3 ngày mưa, từ 25 đến 27 tháng 4 năm 2015 ở tần số lấy mẫu 1Hz. Chiều cao ăng-ten được lắp đặt cách mặt đất 4 m. Độ dày lớp cát của khu vực thực nghiệm được xác định bằng ăng-ten Ground Penetrating Radar (GPR Malá Ramac X3M) với tần số 500MHz: độ dày trung bình đo được là 0,7 m và độ sâu dao động trong khoảng 0,35 m đến 1,10 m (Hình 3b). Để tính phân bố không gian của độ ẩm, chúng tôi tiến hành đo 30 điểm phân bố đều trong khu vực sân bóng bằng đầu dò Theta và nội suy theo phương pháp trung bình có trọng số tỷ lệ nghịch với khoảng cách Inverse Distance Weighting (IDW) để tạo bản đồ độ ẩm đất (Hình 4c). Mô hình kết quả khá phù hợp với độ dày cát, những khu vực có độ dày cát lớn thường có hàm lượng nước đáng kể (VSM thay đổi từ ~ 7,5% đến 13%) và ngược lại hàm lượng nước thấp (VSM thay đổi từ ~ 1,5% đến 3,5%) cho khu vực có độ dày cát thấp.



Hình 3. Khu vực thực nghiệm: (a) Vị trí khu vực sân bóng chuyên tại đại học Paul Sabatier, Toulouse, Pháp; (b) Bản đồ độ sâu lớp cát được đo bằng Ground Penetrating Radar (GPR) với ăng-ten 500MHz; (c) Bản đồ độ ẩm đất của lớp cát được tạo bằng nội suy IDW của các điểm đo được ở độ sâu 7 cm sử dụng cảm biến đầu dò Theta. (d) Vị trí của máy thu GNSS và đầu dò Theta, bản đồ các điểm phản xạ của vệ tinh GLONASS và bề mặt phản xạ Fresnel của chúng được thực hiện ngày 24 tháng 4 năm 2015.

Để theo dõi sự thay đổi độ ẩm đất của sân bóng, một cảm biến đầu dò ML3 Theta (độ chính xác $\pm 0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$) đã được lắp đặt ở độ sâu 7cm ($P_{7\text{cm}}$), cách máy thu GNSS 1m (Hình 4d). Dữ liệu được thu lại sau mỗi 5 phút. Những dữ liệu này được sử dụng để xác nhận kết quả đo độ ẩm từ SNR bằng phương pháp của chúng tôi.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Trong khoảng thời gian thu nhận tín hiệu SNR, đầu dò Theta ghi lại các giá trị VSM nằm trong khoảng từ 2.68% đến 6.62%. Tất cả các tín hiệu phản xạ nằm ngoài khu vực sân chơi được loại bỏ khỏi tín hiệu phân tích. Hình 3d thể hiện mô phỏng bề mặt phản xạ Fresnel tại góc cao thấp từ 10° đến 30° (ellip màu xanh lá cây) và tại góc cao vệ tinh cao trong khoảng 30° đến 70° (ellip màu hồng tím). Chỉ những tín hiệu SNR từ góc cao vệ tinh trong khoảng 30° đến 70° được xử lý để tránh nhiễu phản xạ từ khu vực bên ngoài sân bóng.

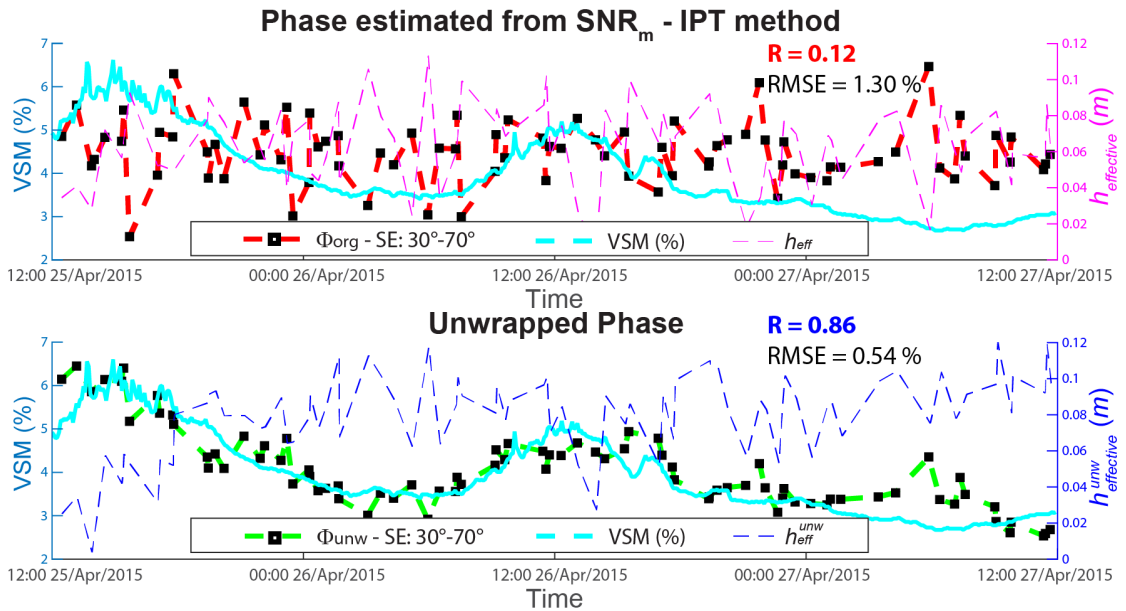
Dữ liệu SVM được tính từ giá trị Φ_m và Φ_{unw} của SNR được so sánh với SVM đo bằng đầu dò Theta đặt ở độ sâu 7cm cho các chòm sao khác nhau (GPS, GLONASS và kết hợp cả GPS và GLONASS). Kết quả tính toán độ lệch bias, sai số trung phương RMSE và hệ số tương quan R được

thể hiện trong bảng 1 và hình 4.

Bảng 1. Hệ số tương quan R giữa Φ_m , Φ_{unw} (ước tính bằng phương pháp kết hợp kỹ thuật IPT và Unwrapping phase với góc cao vệ tinh lớn) với VSM ghi được bằng đầu dò Theta đặt ở độ sâu 7cm cho các chòm sao vệ tinh khác nhau (GPS, GLONASS, GPS+GLONASS) trên band L1.

Φ_m, Φ_{unw} / VSM	BIAS (%Vol)	RMS (%Vol)	RMSE (%Vol)	R (%Vol)
Φ_m (GPS) *	0.98	1.13	1.49	0.08
Φ_{unw} (GPS) **	0.36	0.63	0.72	0.74
Φ_m (GLONASS) *	0.47	1.22	1.30	0.12
Φ_{unw} (GLONASS) **	0.04	0.54	0.54	0.86
Φ_m (GPS+GLONASS) *	0.84	1.11	1.39	0.10
Φ_{unw} (GPS+GLONASS) **	0.85	0.52	1.00	0.82

* Before unwrapping phase
** After unwrapping phase



Hình 4. Chuỗi biến động theo thời gian của Φ_m (đường red), h_{eff} (đường magenta), Φ_{unw} (đường green), h_{eff}^{unw} (đường blue) và số liệu độ ẩm đất đo độc lập (đường cyan) ở độ sâu 7 cm tại khu vực thực nghiệm sử dụng SNR_m trên band L1 của chòm sao GLONASS với góc cao vệ tinh từ 30°-70°.

Khi chưa mở pha, VSM ước tính trực tiếp từ dữ liệu SNR_m không có sự tương quan với VSM đo bằng đầu dò Theta. Khi bề mặt phản xạ là 100% cát, giá trị độ ẩm đất có thể được khôi phục từ SNR bằng phương pháp mở pha. Kết quả cho thấy, hệ số tương quan R giữa SVM ước tính từ Φ_{unw} và dữ liệu đo độc lập bằng đầu dò Theta ở độ sâu 7cm đạt 0.74 khi sử dụng vệ tinh GPS, 0.86 với vệ tinh GLONASS và 0.82 khi kết hợp cả hai vệ tinh. Độ ẩm đất ước tính từ dữ liệu GLONASS có độ tương quan tốt hơn so với dữ liệu GPS đơn lẻ, tín hiệu GLONASS dường như nhạy cảm hơn với độ ẩm đất có thành phần 100% cát so với tín hiệu GPS. Điều này cũng có thể giải thích do ở góc cao vệ tinh từ 30° đến 70°, số lượng vệ tinh GLONASS quan sát được nhiều hơn số vệ tinh GPS.

Chúng tôi quan sát thấy có sự thay đổi lớn (~14%) độ ẩm đất tại khu vực nghiên cứu tùy thuộc vào vị trí đặt cảm biến đầu dò (Hình 3c). Những thay đổi này rõ ràng phụ thuộc vào độ dày/độ sâu của

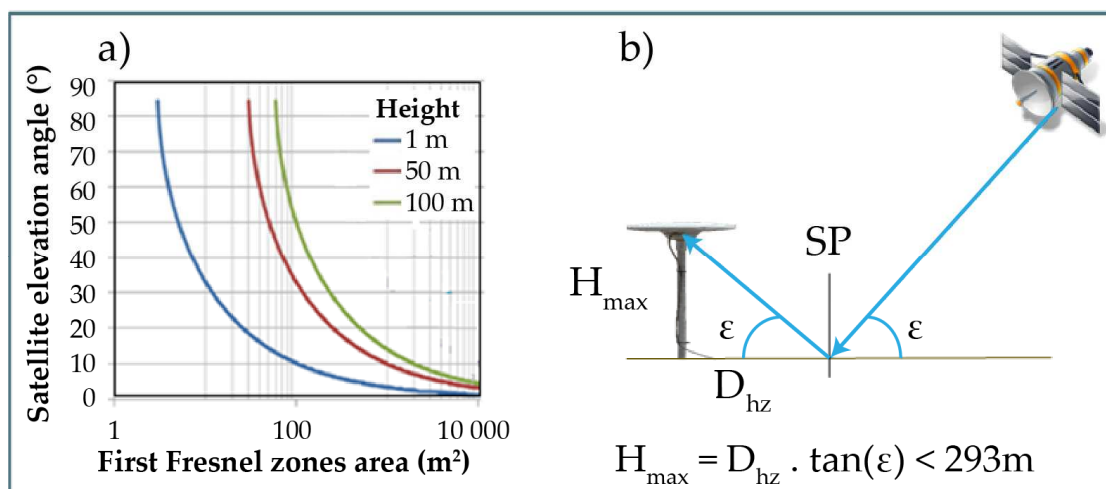
lớp cát (Hình 3b). Thể tích lấy mẫu của đầu dò Theta $\sim 0.00075 \text{ m}^3$ với độ ẩm trung bình là $3.95\% \pm 0.95\%$. Độ phân giải không gian sử dụng kỹ thuật GNSS-R $\approx 189 \text{ m}^2$ (bề mặt phản xạ Fresnel của tín hiệu phản xạ thu được ở góc cao vệ tinh từ 30° đến 70° trong hình 3d) tương ứng với thể tích $\approx 51.79 \text{ m}^3$. VSM được tính bằng cách nhân diện tích của bề mặt phản xạ GNSS-R với độ sâu thâm xuyên trung bình là $0.27\text{m} \pm 0.1 \text{ m}$ (Bảng 2).

Bảng 2. Thống kê độ phân giải không gian bằng các phương pháp khác nhau: Dữ liệu tại chỗ sử dụng đầu dò Theta đơn lẻ, bản đồ độ ẩm được tạo từ mạng lưới đo dùng đầu dò Theta và GNSS-R.

Method	Area (m ²)	Volume (m ³)	Mean VSM (%)	STD σ (%)	RMSE Γ (%)	Depth (cm)
Probe alone	0.03	0.00075	3.95	0.95	-	7 $\pm$ 2.5
Map of the probes	0.03	0.00075	3.84	1.19	-	7 $\pm$ 2.5
	189	17.955	4.82	0.69	1.28	7 $\pm$ 2.5
GNSS-R	3.6	0.985	4.37	0.97	0.66	27.4 $\pm$ 10
	189	51.786	4.21	0.91	0.54	27.4 $\pm$ 10

Kết quả trong bảng 2 cho thấy, sai số trung phương nhận được từ dữ liệu GNSS-R (RMSE $\sim 0.6\%$) nhỏ hơn sai số trung phương của dữ liệu bản đồ độ ẩm (RMSE $\sim 1.3\%$). Thống kê về độ phân giải không gian bằng các phương pháp khác nhau: phép đo tại chỗ sử dụng đầu dò Theta đơn lẻ là 0.03m^2 , bản đồ độ ẩm được tạo từ mạng lưới đo dùng đầu dò Theta $\sim 189\text{m}^2$ và GNSS-R $\sim 189\text{m}^2$. Điều này có thể được giải thích bởi sự khác biệt về tỷ lệ diện tích, đầu dò Theta chỉ đo được trên bề mặt có diện tích vài m^3 trong khi GNSS-R truy xuất tương ứng với bề mặt phản xạ Fresnel phụ thuộc vào chiều cao ăng-ten, ăng-ten càng cao thì diện tích bề mặt phản xạ GNSS-R càng lớn. Giá trị độ ẩm trung bình tính từ GNSS-R cho khu vực nghiên cứu $\sim 6\% \pm 3\%$. Nghiên cứu đã chứng minh rằng có thể sử dụng dữ liệu GNSS-R để phát hiện sự thay đổi độ ẩm của đất trong trường hợp đất cát bằng kỹ thuật mở pha. Kỹ thuật mở pha giúp tăng độ chính xác của số lần truy xuất độ ẩm đất so với trị đo pha thông thường. Tín hiệu phản xạ GNSS-R cung cấp thông tin có độ phủ không gian tốt hơn mà đầu dò Theta không có được. Tuy nhiên, các đầu dò độ ẩm cần thiết để hiệu chuẩn độ ẩm từ GNSS-R, cũng có thể đạt được bằng phép đo độ ẩm trọng lực.

Một đặc tính thú vị khác của máy thu GNSS là khả năng thay đổi quy mô nhanh chóng và hiệu quả. Diện tích bề mặt phản xạ là tổng của bề mặt phản xạ Fresnel đầu tiên, phụ thuộc vào độ cao ăng-ten, góc cao vệ tinh và số vệ tinh quan sát được tại thời điểm đó (Hình 5). Do đó, nếu thay đổi chiều cao ăng-ten thì diện tích bề mặt phản xạ sẽ tăng, dẫn đến tăng độ phân giải không gian của phép đo GNSS-R.



Hình 5. a) Sự thay đổi diện tích vùng phản xạ Fresnel khi góc cao vệ tinh thay đổi ; b) Sự phụ thuộc giữa diện tích của bề mặt phản xạ, chiều cao ăng-ten và góc cao vệ tinh.

5. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kỹ thuật IPT cổ điển được phát triển bởi Larson et al. 2008 cung cấp khả năng thu hồi độ ẩm đất tốt đối với đất giàu đất sét như trong các nghiên cứu trước đây (Chew, C. C. Et al., 2015 ; Vey, S. Et al., 2016 ; Zhang, S. Et al., 2017). Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã chứng minh rằng kỹ thuật này cũng có thể được sử dụng ngay cả đối với đất cát khô đến rất khô ($2\% < VSM < 8\%$) nếu kết hợp phương pháp IPT với phương pháp mở pha (Unwrapping phase) để có được phép đo pha của tín hiệu đa đường (SNR_m) liên tục. Trong trường hợp này, hệ số tương quan giữa các giá trị độ ẩm đất ước tính được từ SNR_m và VSM đo tại chỗ ở độ sâu $\sim 10\text{cm}$, có thể đạt tới 0.86 trên khu vực thử nghiệm với thành phần 100% cát.

Kết quả của nghiên cứu cũng cho thấy khả năng của kỹ thuật GNSS-R để lập bản đồ biến đổi không gian của độ ẩm đất và có thể được thực hiện với cả một hoặc một vài đầu dò độ ẩm. Một đánh giá chi tiết về kết quả độ ẩm được tính toán bằng kỹ thuật IPT đã chứng minh rằng trị đo pha mang lại khả năng thu hồi tốt nhất đối với độ ẩm đất, sự xâm nhập của sóng tăng lên trong điều kiện môi trường cát khô. Biên độ của tín hiệu đa đường cho kết quả kém do các tham số gây ô nhiễm biên độ của tín hiệu phản xạ như độ nhám bề mặt, độ không đồng nhất của đất. Bề mặt được thăm dò phụ thuộc vào chiều cao ăng-ten và độ cao vệ tinh, nghĩa là chúng ta có thể tính toán cho quy mô không gian từ cục bộ đến trung bình bằng cách tăng chiều cao ăng-ten, ví dụ vài m^2 cho chiều cao ăng-ten $\sim 1,5\text{ m}$ đến hơn 10000 m^2 cho chiều cao ăng-ten 50 m . Có thể sử dụng kết hợp tất cả các vệ tinh GPS / GLONASS trong quá trình xử lý dữ liệu SNR để tạo ra một chuỗi hoàn chỉnh về độ chính xác về thời gian, giúp cải thiện đáng kể mối tương quan với độ ẩm đất, cũng như độ phân giải thời gian từ 1 ngày đến 10 phút.

Bên cạnh đó cũng có thể theo dõi sự thay đổi không gian độ ẩm của đất, bằng cách tạo ra một loạt các bản đồ độ ẩm đất trung bình với độ phân giải thời gian là 6 giờ, 12 giờ hoặc theo ngày cho bề mặt đất xung quanh máy thu GNSS. GNSS-R có tiềm năng cung cấp chuỗi thời gian liên tục và trong một thời gian dài. Kết quả của nghiên cứu này có thể cung cấp thông tin về độ ẩm đất cho nông dân, giám sát sự thay đổi độ ẩm đất để hỗ trợ người nông dân trong quá trình tưới tiêu.

Tài liệu tham khảo

- Aranyossy, J. and Ndiaye, B. 1993. Étude et modélisation de la formation des dépressions piézométriques en Afrique sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 81-96.
- Archambault, J. 1960. Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale. A. O. F. *Hydraulic Service*.
- Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M., and Zavorotny, V. U. 2014. Effects of Near-Surface Soil Moisture on GPS SNR Data: Development of a Retrieval Algorithm for Soil Moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 537-543.
- Chew, C. C., Small, E. E., Larson, K. M., and Zavorotny, V. U. 2015. Vegetation Sensing Using GPS-Interferometric Reflectometry: Theoretical Effects of Canopy Parameters on Signal-to-Noise Ratio Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2755-2764.
- Darrozes, J., Roussel, N., and Zribi, M. 2016. The Reflected Global Navigation Satellite System (GNSS-R): from Theory to Practice. *Microwave Remote Sensing of Land Surface: Techniques and Method*, 303-355.
- Fei Li, X. P., Chen, X., Liu, M., and Xu, L. 2018. Analysis of Key Issues on GNSS-R Soil Moisture Retrieval Based on Different Antenna Patterns. *Sensors*.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., . . . Mecklenburg, S. 2010. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. *Proceedings of the IEEE*, 666-687.
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J., and Zavorotny, V. U. 2008. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters*.
- Larson, K. M., Braun, J. J., Small, E. E., Zavorotny, V. U., Gutmann, E. D., and Bilich, A. L. 2010. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 91-99.
- Lomb, N. R. 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics and Space Science*, 447-462.
- Lopez, T., Antoine, R., Kerr, Y., Darrozes, J., Rabinowicz, M., Ramillien, G., . . . Genthon, P. 2016. Subsurface hydrology of the Lake Chad Basin from convection modelling and observations. *Surveys in Geophysics*, 471-502.
- Mougin, E., Hiernaux, P., Kergoat, L., Grippa, M., Rosnay, P., Timouk, F., . . . Mazzega, P. 2009. The AMMA-CATCH Gourma observatory site in Mali: Relating climatic variations to changes in vegetation, surface hydrology, fluxes and natural resources. *Journal of Hydrology*.
- Ribot, M. A., Botteron, C., and Farine, P. A. 2016. Derivation of the Cramér-Rao Bound in the Reflectometry Context for Static, Ground-Based Receivers in Scenarios with Coherent Reflection. *Sensors*.
- Rodriguez-Alvarez, N., Camps, A., Vall-llossera, M., Bosch-Lluis, X., Monerris, A., Ramos-Perez, I., . . . Sanchez, N. 2011. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 71-84.
- Roussel, N. 2015. Application de la réflectométrie GNSS à l'étude des redistributions des masses d'eau à la surface de la Terre. *Toulouse: Université Paul Sabatier - Toulouse III*.
- Roussel, N., Frappart, F., Ramillien, G., Desjardins, C., Gegout, P., Pérosanz, F., and Biancale, R. 2014. Simulations of direct and reflected waves trajectories for in situ GNSS-R experiments. *Geoscientific Model Development Discussions*.
- Roussel, N., Frappart, F., Ramillien, G., Darrozes, J., Baup, F., Lestarquit, L., and Ha, M. C. 2016. Detection of Soil Moisture Variations Using GPS and GLONASS SNR Data for Elevation Angles Ranging From 2° to 70°. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4781-4794.
- Scargle, J. D. 1982. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal*, 835-853.
- Tobern, T., Rasmus, F., Idrissa, G., Olander, R. M., Silvia, H., Cheikh, M., . . . Jonas, A. 2015. Ecosystem properties of semiarid savanna grassland in West Africa and its relationship with

- environmental variability. *Global Change Biology*, 250-264.
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T., and Ramatschi, M. 2016. Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. *GPS Solutions*, 641-654.
- Zhang, S., Calvet, J.-C., Darrozes, J., Roussel, N., Frappart, F., and Bouhours, G. 2018. Deriving surface soil moisture from reflected GNSS signal observations from a grassland site in southwestern France. *Hydrology and Earth System Sciences*, 1931-1946.
- Zhang, S., Roussel, N., Boniface, K., Ha, M. C., Frappart, F., Darrozes, J., . . . Calvet, J.-C. 2017. Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop. *Hydrology and Earth System Sciences*, 4767-4784.