تطبيقات تقنية تداخل الرادار ذي الفتحة الاصطناعية InSAR في العلوم الهندسية والبيئية:

قراءة حديثة في تقنية استشعار متقدمة

الدكتورة دارين نوفل *

الملخص

شهد العالم في العقود الأخيرة تطوراً مذهلاً في مختلف مجالات العلوم والتكنولوجيا، ومن ضمن هذه التطورات، برزت تقنيات الاستشعار عن بعد كأدوات فعالة لفهم سطح الأرض وتغيراته، حيث أتاحت مراقبة سطح الأرض والبيئة والموارد الطبيعية من الفضاء.

وتُعد تقنية تداخل الرادار ذي الفتحة الاصطناعية (InSAR) من أكثر أدوات الاستشعار عن بعد تقدماً، حيث تتيح رصد التغيرات الطبوغرافية ومراقبة تشوهات سطح الأرض بدقة تصل إلى بضع مليمترات. تتميز هذه التقنية بإمكانية استخدامها في ظروف جوية مختلفة وبدون الحاجة للتواجد الميداني، مما يجعلها مثالية لرصد الزلازل، والانزلاقات الأرضية، وهبوط التربة. وفي مجال الهندسة المدنية، تلعب تقنية InSAR دوراً أساسياً في مراقبة استقرار البنية التحتية، وتتبع الهبوطات الأرضية، وتقييم تأثير الأنشطة البشرية والجيولوجية، مما يعزز من السلامة الإنشائية والتخطيط العمراني المستدام.

يهدف هذا البحث إلى تقديم لمحة شاملة لأسس ومبادئ تقنية InSAR وتطبيقاتها ودورها في دعم البحوث الهندسية والبيئية.

الكلمات المفتاحية:

الاستشعار عن بعد، InSAR، الرادار ذي الفتحة الاصطناعية، الزلازل، الهبوط الأرضي.

*دكتورة في قسم الهندسة الطبوغرافية–كلية الهندسة المدنية–الجامعة الوطنية الخاصة–حماه–سوريا

Applications of Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Technology in Engineering and Environmental Sciences: A Contemporary Overview of an Advanced Remote Sensing Technology

***Dr. Dareen Nofl**

Abstract:

In recent decades, the world has witnessed remarkable advancements across various fields of science and technology. Among these developments, remote sensing technologies have emerged as powerful tools for understanding the Earth's surface and its changes, enabling the monitoring of the environment and natural resources from space. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is considered one of the most advanced remote sensing techniques, enabling the detection of topographic changes and surface deformations with millimeter-level precision. This technique is particularly advantageous due to its capability to operate under diverse weather conditions and without the need for on-site presence, making it ideal for monitoring earthquakes, landslides, and land subsidence. In the field of civil engineering, InSAR plays a crucial role in monitoring infrastructure stability, tracking ground settlements, and assessing the impact of both human and geological activities, thereby contributing to structural safety and sustainable urban planning. This study aims to provide a comprehensive overview of the fundamentals and principles of InSAR technology, its applications, and its role in supporting engineering and environmental research.

Keywords: Remote Sensing, InSAR, Synthetic Aperture Radar, Earthquakes, Land Subsidence

* Ph.D at Topographic Engineering Department– Civil Engineering Faculty – Al–Wataniya Private University– Hama – Syria

1. مقدمة

تطورت تقنيات الاستشعار عن بُعد بشكل كبير في العقود الأخيرة، وكان لتقنية تداخل الرادار ذي الفتحة الاصطناعية (InSAR) دوراً بارزاً في هذا التطور. تعتبر InSAR أداة مهمة في علوم الأرض والهندسة المدنية، إذ تُستخدم للقياس الكمي لتشوهات سطح الأرض الناتجة عن مجموعة متنوعة من العمليات الطبيعية (مثل الانفجارات البركانية والانهيارات الأرضية والزلازل) والبشرية (مثل استخراج المياه الجوفية في المناطق الحضرية، وتدهور المباني والمرافق العامة). في هذا الإطار، يُتيح استخدام تقنية InSAR الرصد والمراقبة طويلة الأمد لتشوهات السطح وتحليل الظواهر الجيوديناميكية ذات الصلة.

تكمن أهمية InSAR في قدرتها على رصد التغيرات الطفيفة في سطح الأرض دون الحاجة إلى نقاط مراقبة أرضية، كما توفر بيانات عالية الدقة تُستخدم في تقييم المخاطر الجيولوجية والتغيرات البيئية، للمساعدة في تقليل الأضرار الناجمة عن هذه المخاطر، وتعزيز الاستدامة البيئية والاقتصادية والاجتماعية للمجتمعات المتأثرة بها.

يهدف هذا البحث إلى تقديم دراسة مرجعية واسعة ومعمّقة للإحاطة بالتصوير الراداري، الأنواع المختلفة من الصور الرادارية مثل صورة SAR معقدة المظهر (SLC) وصورة SAR المكتشفة(detected SAR image) ، طور صورة SAR، آلية التبعثر وهندسة التصوير، مبدأ عمل (InSAR)، وتسليط الضوء على أبرز تطبيقات تقنية InSAR. بحيث يحقق البحث هدفه في وضع تصور جيد عن هذه التقنية الهامة وأهميتها في استشعار وتحليل البيانات عن بعد، ويشكل قاعدة للباحثين في مجال الاستشعار عن بعد وتقنياته المختلفة.

2. التصوير الراداري

الرادار،Radar وهو اختصار لـ(Radio Detection and Ranging)، عبارة عن تقنية استشعار عن بعد لقياس المسافة وسرعة الهدف عن طريق الإضاءة عبر موجات الراديو وقياس الإشارة المنعكسة. موجات الراديو هي مجموعة فرعية من الموجات الكهرومغناطيسية يتراوح مجال ترددها بين 3 كيلو هرتز (طول موجة 100 كم) و300 جيجا هرتز (طول موجي 1 مم). يبين الجدول (1) قائمة بأكثر مجالات التردد شيوعاً المخصصة للاستشعار عن بعد [1]. للرادار مزايا عديدة كأداة لمراقبة الأرض عن بعد. يتيح الرادار الفضائي تغطية واسعة، وعمليات رصد كثيفة مكانياً غير ممكنة باستخدام القياسات في الموقع. على عكس المستشعرات الضوئية، يتم تشغيل الرادارات بشكل نشط وبالتالي لا تقتصر على التشغيل أثناء النهار، ويمكن للرادار اختراق الغلاف الجوي والغيوم والأمطار التي لا تستطيع الكاميرات رؤيتها. يقيس الرادار الخواص العازلة، على عكس القياسات من أجهزة الاستشعار البصرية والأشعة تحت الحمراء التي توفر الخصائص الكيميائية للأجسام [2].

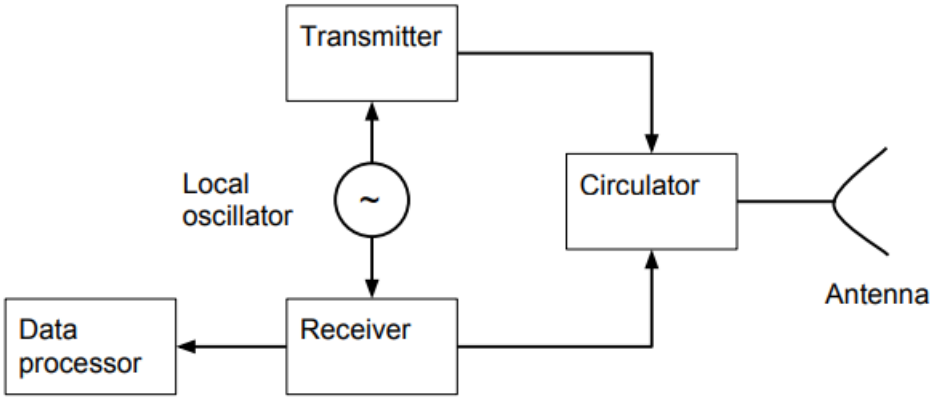
جدول 1 مجالات أو نطاقات تردد الرادار للاستشعار عن بعد وفقاً لمعيار IEEE

اسم النطاق	مجال التردد غيغاهرتز	طول الموجة سم	مهمات أقمار SAR
Ka	26.5-40	0.75-1.1	–
K	18-26.5	1.1-1.67	–
Ku	12.5-18	1.67-2.4	–
X	8-12.5	2.4-3.75	**TerraSAR-X**(2007), Cosmo-Skymed (2007-2010), **TanDEM-X** (2010), PAZ (2018)
C	4-8	3.75-7.5	**ERS-1/2** (1991/1995), **ENVISAT**(2002), Radarsat-1/2 (1995/2007), Sentinel-1A/1B(2014/2016)
S	2-4	7.5-15	NISAR(planned2021)
L	1-2	15-30	Seasat (1978), JERS-1(1992), ALOS-1/2 (2006/2017), SAOCOM 1A/1B (2018/planned2019), NISAR(planned 2021)
P	0.3-1	30-100	Biomass(planned2021)

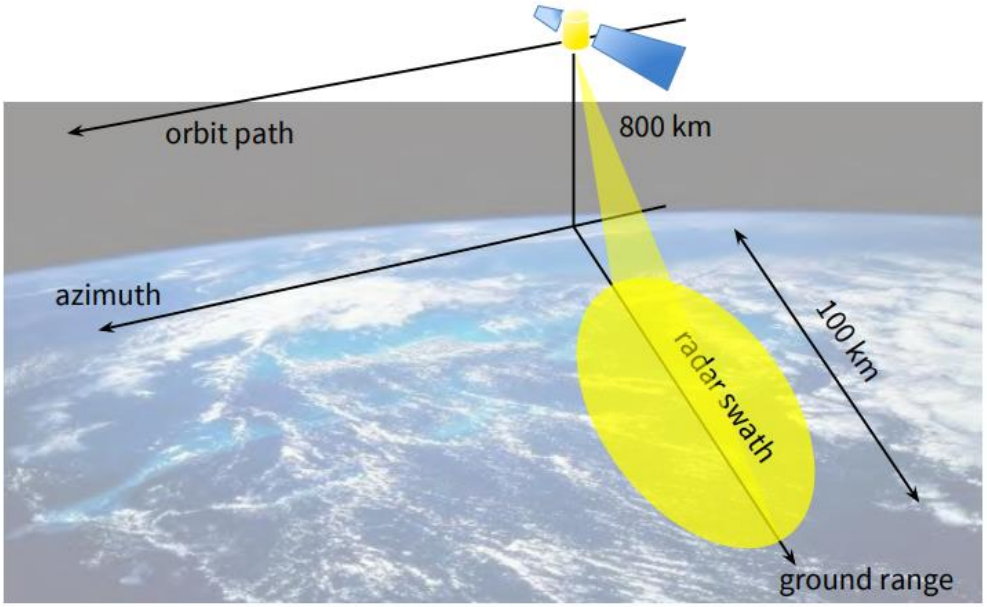
عادةً ما تكون رادارات التوابع الصنعية نبضية ومتماسكة وتعمل في نطاق من 106 إلى 1012 هرتز، مما يجعلها حساسة للأشياء التي يتراوح حجمها بين السنتيمترات والأمتار. يتكون النظام، الموضح في الشكل (1)، من مرسل ومستقبل، وهوائي، ومذبذب، ومعدّل، ومدور.

تعمل توابع رادار الاستشعار عن بعد بشكل عام في مدار قريب من الأرض، على ارتفاعات تتراوح بين 600–800 كيلومتر. يضيء هوائي الرادار ذو المظهر الجانبي منطقة من سطح الأرض تسمى البصمة (footprint) أو رقعة الرادار (radar swath) الشكل (2) [3].

يشار إلى الاتجاه على طول مسار المدار بالسمت (azimuth) أو على طول المسار (along–track)، بينما يسمى الاتجاه العمودي المدى (range) أو عبر المسار (across–track).



الشكل 1 المكونات الأساسية للرادار

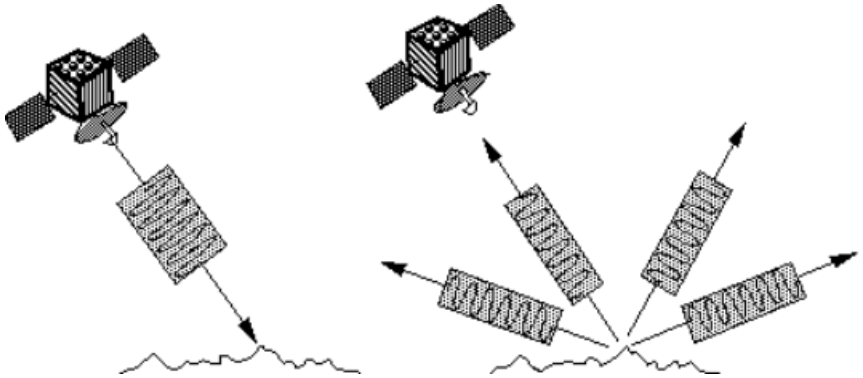


الشكل 2 بصمة الرادار

تتمثل إحدى المزايا الأساسية للرادار كطريقة للاستشعار عن بعد في قدرته على إنتاج قياسات مكانية كثيفة لسطح الأرض. نظراً لأن الرادار يمكن أن يقيس الانعكاسية وكذلك الموقع المكاني للمبعثرات (scatterers) في نفس الوقت، يمكن تسجيل القياسات في الإحداثيات المكانية من أجل إنتاج صورة الرادار. يتمتع نظام التصوير بالرادار بميزتين هما نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) ودقة التمييز (Resolution) أي قدرة النظام على التمييز بين هدفين.

3. الرادار ذو الفتحة الحقيقية (Real Aperture Radar)

الرادار ذو الفتحة الحقيقية (RAR) هو تقنية نشطة للاستشعار عن بعد، حيث تقوم منصة متحركة (تحمل تابع صنعي في الفضاء أو في الجو أو على الأرض) والتي تحمل جهاز إرسال واستقبال للرادار ببث نبضات الرادار نحو الأهداف على الأرض وتسجيل صدى التبعثر العائد (backscattered echo) الشكل (3) [4].



الشكل 3 النبضات وصدى التبعثر العائد

تتيح حركة المنصة على طول المسار المطلوب إنشاء صورة ثنائية الأبعاد لسطح الأرض ثلاثي الأبعاد. يتم تحديد دقة صور الرادار من خلال اتجاهات السمت والمدى أو النطاق المائل (range). يتم تحديد السمت من خلال اتجاه حركة المنصة، بينما يتم تحديد المدى في الاتجاه الذي تنتقل فيه نبضات الرادار باتجاه الأرض، والمعروف باسم اتجاه خط النظر (LOS). يشير المدى إلى مسافة المدى المائل بين الرادار والهدف.

إجمالي إشارة الرادار المستقبلة من نبضة مرسلة هو المجموع المتماسك للانعكاسات المتأخرة زمنياً من المبعثرات داخل رقعة الأرض المضيئة. الطاقة المنعكسة العائدة باتجاه الرادار من المبعثرات هي عامل للعديد من الخصائص، بما في ذلك حجمها المادي، الشكل ونعومة السطح والمواد. تُستخدم تقنيات معالجة الإشارات لحل المبعثرات مكانياً وتحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR).

في اتجاه المدى، تُحدد المسافة r من الرادار إلى المبعثر عن طريق تأخر الزمن ثنائي الاتجاه t_d بين إرسال النبضة واستقبال الصدى العلاقة (1):

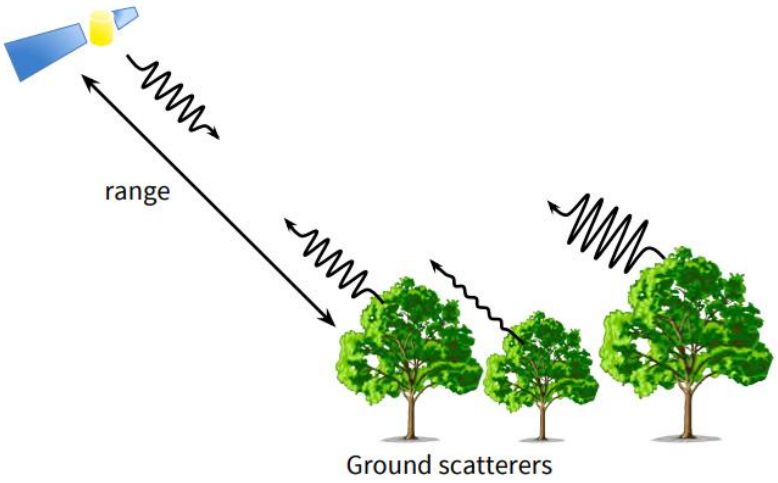
$$r = \frac{ct_d}{2} \qquad (1)$$

حيث c هي سرعة الضوء.

تعتمد دقة المدى على مدة النبضة، والتي يجب أن تكون قصيرة بما يكفي للسماح بدقة جيدة، ولكنها كبيرة بما يكفي لضمان طاقة مبعثرة كافية. يتم إنتاج دقة المدى الشكل (4) باستخدام ضغط النبض، حيث تتم معالجة الإشارة المستقبلة من خلال مرشح مطابق. من خلال ربط الإشارة المستقبلة بالإشارة المرسلة، يتم ضغط الطاقة المنعكسة في نبضة

أقصر بشكل فعال، مما يؤدي إلى زيادة الدقة ونسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR). باستخدام هذه التقنية، فإن دقة المدى δr محدودة بعرض النطاق الترددي BW للإشارة المرسلة العلاقة (2):

$$\delta_r = \frac{c}{2BW} \qquad (2)$$



الشكل 4 دقة المدى التي تشير إلى القدرة على تمييز المبعثرات القريبة مكانياً من بعضها البعض

يتم تحديد الدقة الزاوية للسمت θaz لنظام الرادار ذي الفتحة الحقيقية من خلال العرض الزاوي لحزمة الهوائي، والذي يتناسب مع الطول الموجي λ ويتناسب عكسياً مع البعد الفيزيائي للفتحة l العلاقة (3):

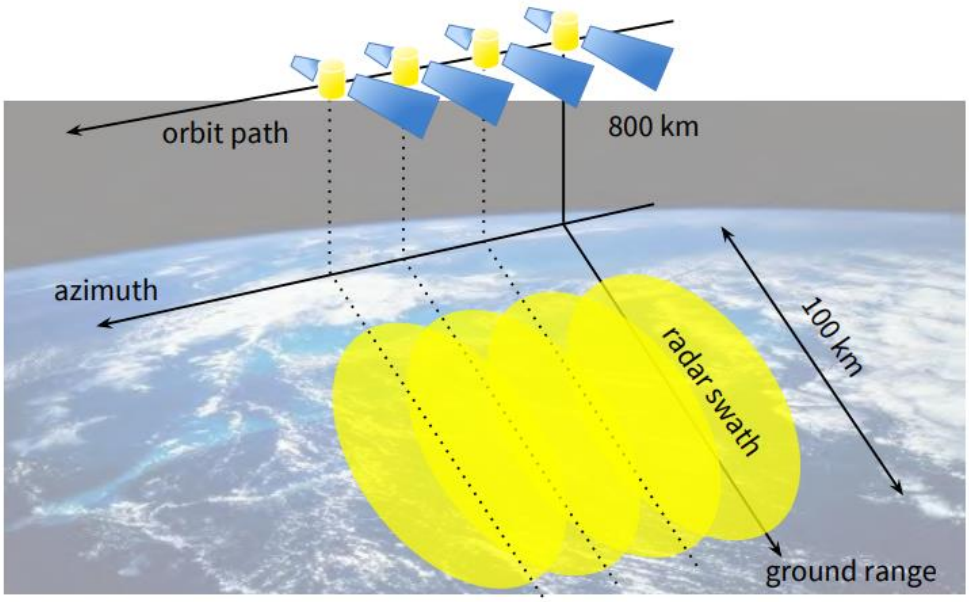
$$\theta_{az} = \frac{\lambda}{l} \qquad (3)$$

عند المدى r، تكون دقة التمييز باتجاه السمت ممثلة بالعلاقة (4):

$$\theta_{az} = \frac{\lambda r}{l \cos\theta} \qquad (4)$$

حيث θ هي زاوية سقوط الموجة المرسلة. تبلغ دقة التمييز السمتية للرادار ذي الفتحة الحقيقية عدة مئات من الأمتار في حالة التابع المحمول جواً وعدة كيلومترات في حالة المحمول في الفضاء.

ولتحقيق دقة جيدة، يجب أن يكون طول الهوائي ذي الفتحة الحقيقية من ترتيب الكيلومترات. من الواضح أن الحجم والكتلة المعنية أمران مستحيلان للتطبيقات الفضائية. من هنا يأتي مفهوم الرادار ذي الفتحة الاصطناعية (SAR)، حيث يتم استغلال الحركة النسبية بين الأرض والرادار من أجل توليف ما يعادل فتحة هوائي كبيرة جداً باستخدام هوائي مادي صغير نسبياً الشكل (5) [3].

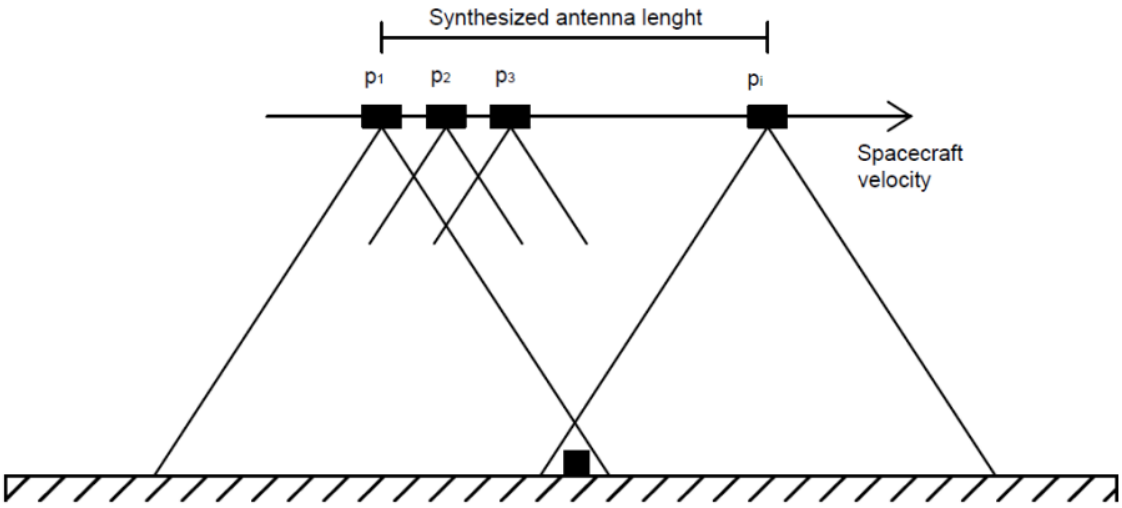


الشكل 5 تشكيل الرادار ذو الفتحة الاصطناعية

4. الرادار ذو الفتحة الاصطناعية (Synthetic Aperture Radar)

SAR عبارة عن تقنية لمعالجة الإشارات لإنتاج صور رادارية عالية الدقة. تُستخدم الحركة النسبية بين الرادار والأرض لتكوين فتحة أكبر وبالتالي عرض حزمة أضيق من الأبعاد المادية للهوائي.

أثناء تحرك منصة الطائرة / المركبة الفضائية التي تحمل أداة SAR، على طول مسار المدار، تضيء النبضات المتتالية المرسلة رقعة أرضية من مواقع مختلفة للهوائي الشكل (6). يتم مسح بصمة الحزمة ضوئياً على طول اتجاه المدى، ويتم إرسال النبضات عند تردد تكرار النبضة في اتجاه المدى والسمت الشكل (7). ونتيجة لذلك، فإن الأجسام القريبة من الهوائي (أي المدى القريب) ترجع صدى قبل تلك التي تكون أبعد. يستخدم تردد تكرار النبض (PRF) للحصول على سلسلة من التبعثر العائد لكل من بصمات الحزمة على الطول الممسوح في اتجاه المدى. يؤدي استخدام ضغط النبضة المتطابق ثنائي الأبعاد في اتجاهات المدى والسمت بعد دمج الصدى في اتجاه الطيران إلى تكوين فتحة كبيرة للهوائي. يحتوي عرض النطاق الترددي في اتجاه الطيران على تأثير دوبلر المرتبط بالتغير في حركة المستشعر بالنسبة إلى الأرض، يستغل SAR ظاهرة دوبلر لحل المبعثرات في اتجاه السمت [5].



الشكل 7 مبدأ الهوائي الطويل الاصطناعي الناتج عن عبور هوائي متحرك واحد

يُعطى طور صدى الرادار المستقبَل من نقطة التبعثر عند المدى $r\ (t)$ بالعلاقة (5)[3]:

$$\phi(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} r\ (t) = -\frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{{r_0}^2 + v^2 t^2} \qquad (5)$$

حيث r_0 هو المدى إلى المبعثر عند أقرب اقتراب للرادار و v هي سرعة منصة الرادار. أثناء انتقال القمر الصناعي، يتغير المدى إلى مبعثر ثابت، وبالتالي يتغير طور انعكاسه أيضاً. ينتج الطور المتغير بمرور الوقت تردد دوبلر العلاقة (6) [3]:

$$f_D = \frac{d\phi}{dt} = \frac{2v.u}{\lambda} \qquad (6)$$

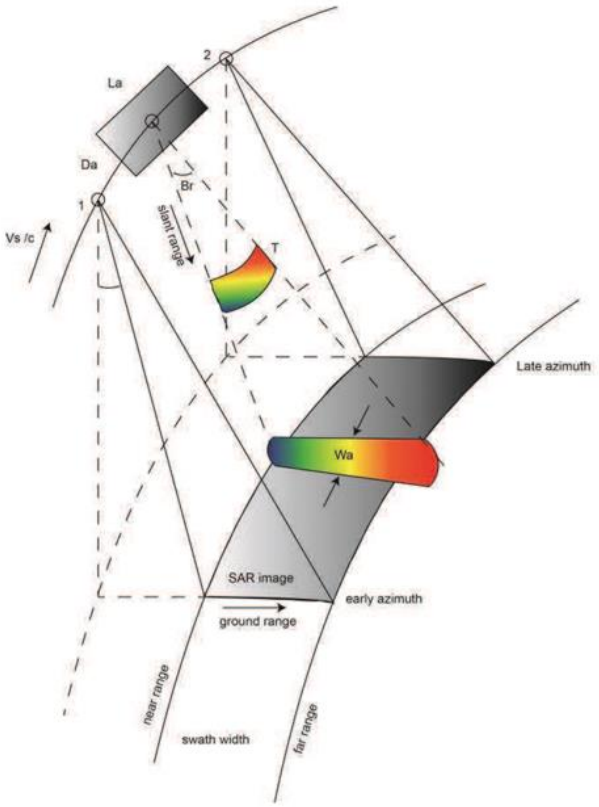
حيث تمثل $v \cdot u$ مسقط سرعة منصة الرادار على خط متجه الرؤية من الرادار إلى المبعثر.

من خلال ربط بيانات الرادار المضغوطة المدى بسجل طور المبعثر النقطي، يمكن دمج الاستجابة من المبعثر الأرضي بشكل متماسك عبر نبضات متعددة. يعمل هذا المرشح المطابق على تحسين الدقة السمتية إلى العلاقة (7) [3]:

$$\theta_{az} = \frac{l}{2} \qquad (7)$$

توضح المعادلة السابقة أنه مع SAR، لم تعد دقة السمت مقيدة بحجم الهوائي. في الواقع، تتحسن الدقة مع انخفاض حجم الهوائي. يرجع ذلك إلى أن الفتحة الأصغر تتسبب في وجود رقعة أرضية أكبر للرادار، وهذا بدوره يعني أن هناك مزيد من نبضات الرادار على كل عنصر دقة أرضية موجود في رقعة الأرض مع مرور الرادار في سماء المنطقة. يتيح ذلك للمرشح المطابق ضغط كمية أكبر من الطاقة المجمعة في موقع سمت أصغر.

من أجل الحصول على صورة SAR النهائية، يتم تركيز معدل PRF والبيانات الأولية المسجلة بواسطة نظام SAR ومعالجتها من أجل تكوين صورة ثنائية الأبعاد [6].



الشكل 7 هندسة نموذجية لنظام التصوير بالرادار ذي الفتحة الاصطناعية [5]. يضيء الوضع الشائع الهندسي للصورة منطقة البصمة باستخدام وضع خريطة الشريط (strip-map)

5. صورة SAR معقدة المظهر (SLC)

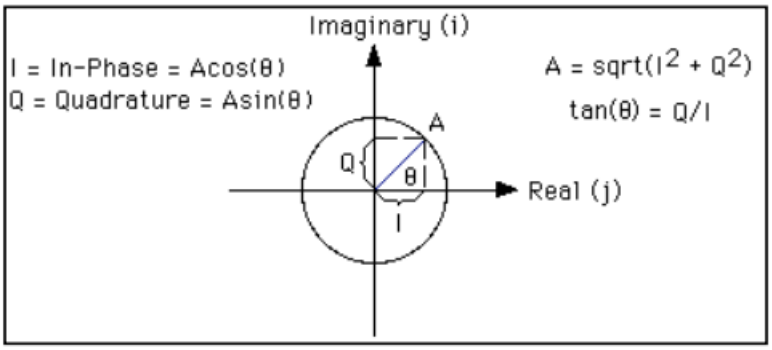
يمكن رؤية صورة SAR الرقمية كفسيفساء (ترتيب ثنائي الأبعاد مكون من أسطر واعمدة) لبكسلات الصورة. يرتبط كل بكسل بمساحة من سطح الأرض تدعى دقة الخلية Resolution cell.

المعلومات الواردة في صور SAR ذات شقين: توفر كثافة التبعثر العائد أو الخلفي معلومات حول الخصائص الفيزيائية للكائنات، ويحتوي الطور على معلومات حول المدى إلى الكائنات.

وهكذا فإن لكل بكسل عدد معقد يحتوي معلومات السعة والطور ترتبط الصفوف المختلفة للصورة مع مواقع سمتية مختلفة في حين، تشير الأعمدة المختلفة إلى مواقع مدى مائلة مختلفة للمبعثرات.

يحتوي كل بكسل على مكونات الطور(in-phase) (I) والتربيع (Q) لإشارة الرادار الشكل (8)، والتي يُشتق منها السعة (A) والطور (ϕ) العلاقة (8) [7] [8]:

$$A = \sqrt{I^2 + Q^2} \ , \ \phi = arctan\left(\frac{Q}{I}\right) \quad (8)$$

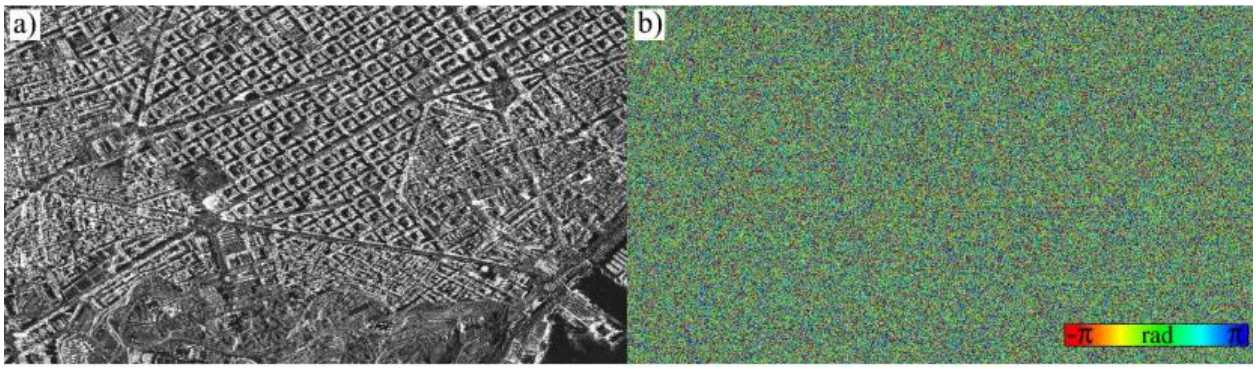


الشكل 8 مكونات السعة والطور

1.5 صورة SAR المكتشفة (detected SAR image)

تحتوي هذه الصورة على قياس السعة لطاقة التبعثر العائد من المبعثرات الموجودة في كل خلية دقة. تعتمد بشكل أساسي على خشونة الأرض أكثر من التركيب الكيميائي. ومع ذلك، فإن خصائص التبعثر العائد تعتمد أيضاً على خصائص السطح الأخرى مثل ثابت العزل والمنحدر المحلي. يؤثر الطول الموجي لجهاز الاستشعار أيضاً على التفاعل الكهرومغناطيسي مع التضاريس. الأطوال الموجية الأطول تخترق سطح التربة بشكل أعمق من الأطوال الموجية الأقصر، لكنها توفر دقة أقل. تعرض صورة SAR المكتشفة بواسطة مستويات التدرج الرمادي الشكل(9,a). تقابل البكسلات اللامعة مساحات ذات إشعاع متبعثر قوي (مثل المناطق العمرانية) في حين تقابل البكسلات الداكنة إشعاع متبعثر منخفض (حوض الماء الساكن).

على النقيض من ذلك، يعتمد الطور الشكل(9,b) بشكل أساسي على المسافة من المستشعر إلى الأرض [8] .

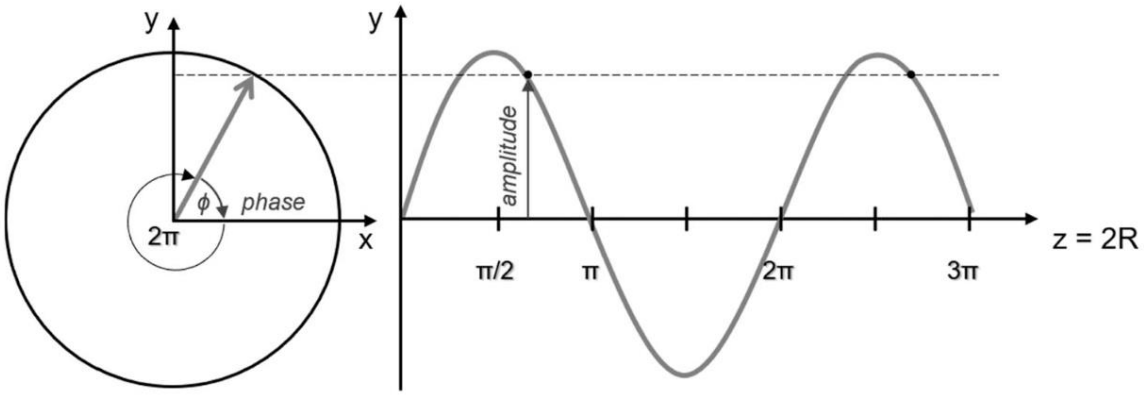


الشكل 9 صورة السعة لـ SLC (a) تتوافق البيكسلات البيضاء مع مناطق انعكاسية عالية، مثل زوايا المباني، بينما تتوافق وحدات البكسل الداكنة مع نقاط انعكاس منخفضة، مثل البحر (الزاوية اليمنى السفلية) (b) صورة الطور SLC على نفس المنطقة. يتراوح الطور من π− إلى π+.

2.5 طور صورة SAR

الطور (Phase) هو قياس مسافة السفر (الذهاب والعودة، أي 2R) التي تغطيها الإشارة. يؤدي التبعثر على مسافات مختلفة من الرادار إلى تأخير مختلف بين إرسال واستقبال الإشارة. نظراً للطبيعة شبه الجيبية البحتة للإشارة المرسلة، فإن هذا التأخير يعادل تغيير الطور ϕ بين الإشارة المرسلة والمستقبلة، لذلك يكون تغير الطور متناسباً مع مسافة السفر ذهاباً وإياباً (2R) للإشعاع مقسومة على الطول الموجي المرسل λ الشكل (10) [9].

ونظراً للطبيعة الدورية للإشارة، فإن طور إشارة SAR هو قياس للجزء الأخير فقط من مسافة السفر ذهاباً وإياباً والتي تكون أصغر من طول الموجة المرسلة.



الشكل 10 طور الإشارة

يرتبط الطور مع المسافة بالعلاقة (9) [8]:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R + \phi_0 = \frac{4\pi}{\lambda} R + \phi_0 \qquad (9)$$

حيث ϕ_0 هو انزياح الطور الناتج أثناء التفاعل بين موجات الميكروويف والجسم المقاس، ومن المهم ملاحظة أن الرادار يقيس فقط كسور الطور ويتراوح الطور المقاس من $-\pi$ إلى $+\pi$.

3. آلية التبعثر

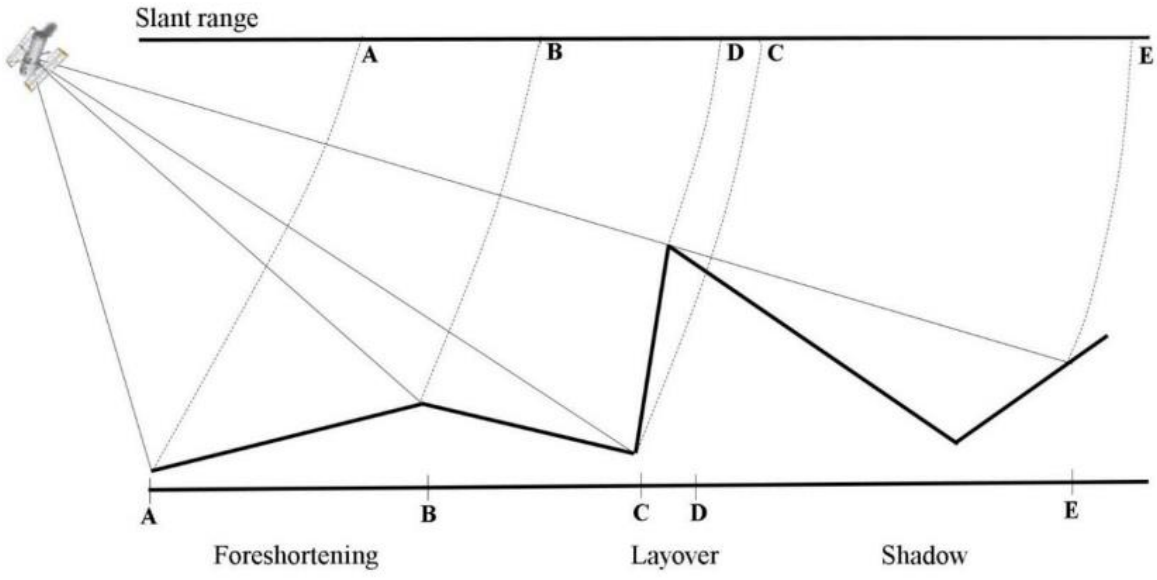
تمثل صور SAR تقديراً للتبعثر الراداري العائد من تلك المنطقة على الأرض. تمثل المساحات المظلمة في الصورة تبعثراً عائداً منخفضاً وتشير إلى انعكاس القليل جداً من الطاقة، بينما تمثل المساحات الأكثر سطوعاً تبعثراً عائداً عالياً وتعني أن جزءاً كبيراً من طاقة الرادار قد انعكس عائداً إلى الرادار.

تنتقل الإشارة ذات الخصائص المحددة (التردد والاستقطاب) من الهوائي باتجاه سطح الأرض حيث تعتمد نسبة الطاقة المبعثرة العائدة إلى المستشعر على عدة عوامل: [6]

- العوامل الفيزيائية مثل ثابت العزل لمواد السطح التي تعتمد أيضاً بقوة على محتوى الرطوبة مع ظهور الأجسام الرطبة لامعة، والأهداف الأكثر جفافاً تظهر مظلمة. (الاستثناء من ذلك هو وجود جسم أملس من الماء، والذي سيكون بمثابة سطح مستوي ويعكس النبضات الواردة بعيداً عن المستشعر. ستظهر هذه الأجسام مظلمة).
- الحجم المادي للمبعثرات في المنطقة المستهدفة
- العوامل الهندسية مثل خشونة السطح، والمنحدرات، واتجاه الأجسام بالنسبة لاتجاه حزمة الرادار
- الطول الموجي للإشارة والاستقطاب وزاوية السقوط.

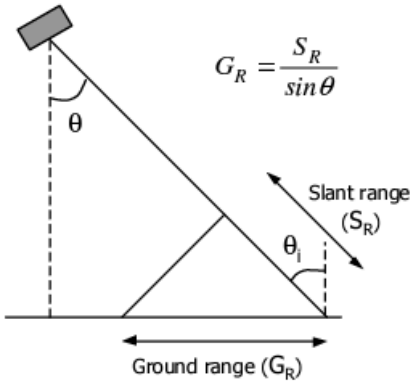
4. هندسة التصوير

نظراً لأن الرادار عبارة عن نظام تحديد المدى، فإن ارتفاع التضاريس يؤدي إلى تشوهات هندسية في صور SAR [5]. يؤثر هذا على دقة الخلية الأرضية، أي دقة الخلية المسقطة على الأرض. يوضح الشكل (11) تأثيرات التشويه الثلاثة التي يمكن العثور عليها في صور SAR: التقصير الأمامي أو المسبق (foreshortening) والتوقف أو الطرح العلوي (layover) والظل (shadow). يظهر التقصير الأمامي في المنحدرات التي تواجه مستشعر الرادار حيث تكون التضاريس المقاسة مضغوطة، أي تظهر أقصر في صورة SAR (النقاط A وB في الشكل 11). من ناحية أخرى، يحدث التأثير المعاكس للمنحدرات المائلة بعيداً عن المستشعر حيث يتم توسيع التضاريس في صورة SAR. يحدث التوقف في منحدرات أعلى من زاوية السقوط، أي يستقبل المستشعر أولاً الإشارة المنعكسة من الأعلى ثم الإشارة القادمة من أسفل المنحدر (النقاط C–D في الشكل 11). يحدث الظل عندما يمنع جسم ما على الأرض إشارة الرادار من الوصول إلى مبعثرات أرضية أخرى (النقاط D–E في الشكل 11) ويحدث في منحدرات شديدة الانحدار بعكس جهاز الاستشعار حيث لا توجد قياسات ممكنة في تلك المناطق [8]



الشكل 11 التشوهات الهندسية في صورة SAR.

غالباً ما يتم تحويل بيانات SAR من إسقاط المدى المائل (أي هندسة SAR الأصلية) إلى إسقاط المدى الأرضي الشكل (12). بيانات SAR في إسقاط المدى الأرضي ليست في نظام مرجعي لرسم الخرائط وليست مصححة هندسياً. الطريقة الوحيدة لتكويد أو ترميز بيانات SAR جغرافياً (أي تحويل بيانات SAR إلى إسقاط خريطة) هي من خلال تطبيق نهج مدى دوبلر Range Doppler الصارم بدءاً من بيانات SAR في هندسة المدى المائل [7].

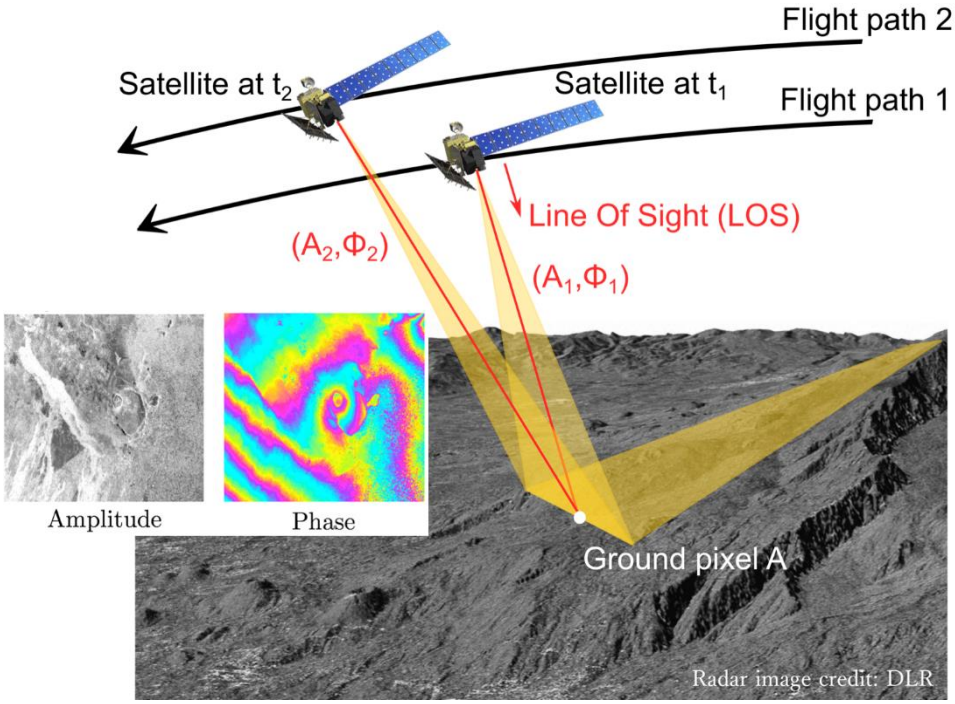


الشكل 12 إسقاط المدى الأرضي لنظام SAR.

5. مبدأ عمل التداخل بالرادار ذي الفتحة الاصطناعية InSAR

يعتمد مبدأ هذه التقنية على استغلال فرق الطور بين رصدتين معقدتين للرادار SAR لمنطقة ما، مأخوذتين من مواقع مختلفة قليلاً للمستشعر، ويستخرج معلومات حول سطح الأرض. حيث يمكن دمج صورتي SAR لإنتاج مخطط تداخل رادار، والذي يمكن أن يكشف عن معلومات حول البعد الثالث (الارتفاع) للمنطقة المستهدفة أو قياس التغيرات الدقيقة في مسافة المدى بين عمليتي الحصول على الصورة الشكل (13). بعد القيام بعملية تركيز لصور SAR، تكون صورة الرادار عبارة عن سجل ثنائي الأبعاد لكل من السعة (Amplitude) وأطوار العوائد من الأهداف داخل منطقة التصوير. السعة هي مقياس لانعكاس الهدف، في حين أن الطور يرمز للتغييرات على السطح حيث أنه يتناسب مع المدى إلى الهدف.

تستخدم InSAR معلومات الطور في صورتي SAR لتحديد فرق الطور بين كل زوج من نقاط الصورة المتقابلة، وبالتالي إنتاج مخطط تداخل. وهكذا، إذا توفرت صورتان من صور SAR لمنطقة مستهدفة ويمكن محاذاتهما بدقة جزء من عرض البكسل، فيمكن تحديد الطور النسبي لكل نقطة صورة. توفر بيانات الطور النسبية من صورتين مأخوذتين من زوايا عرض مختلفة قليلاً، معلومات حول التغييرات في المدى للأهداف على الأرض، وبالتالي يمكن استرداد طبوغرافيا السطح بدقة صورة SAR مع معرفة هندسة التصوير. يمكن لاختلاف الطور بين صورتين تم التقاطهما من نفس وجهة النظر، ولكن في أوقات مختلفة، قياس أي تغيرات في الأطوار المرتجعة بدقة. وبالتالي، إذا تحرك سطح الأرض باتجاه الرادار أو بعيداً عنه بين ممرَي التصوير، فإن تغييرات الطور يمكن أن تُقاس بدقة تقابل عمليات الإزاحة على مستوى المليمتر [10].



الشكل 13 مبدأ عمل InSAR.

من حيث المبدأ، تحدد التوزيعات المختلفة لهوائيات الاستقبال / الإرسال تشكيلات قياس التداخل المميزة. تتضمن تكوينات InSAR التقليدية أحادية السكون (mono-static) استخدام هوائيين لمراقبة المشهد الذي تم فحصه [11] :

- في نفس الوقت ومن مواقع مختلفة، متباعدة في الاتجاه عبر المسار (قياس التداخل عبر المسار)
- في أوقات مختلفة ومن نفس الموضع (قياس التداخل على طول المسار) [12] [13]
- في أوقات مختلفة ومن مواقع مدارية مختلفة (قياس التداخل عبر المسار المتكرر).

كما تم استكشاف تكوينات قياس التداخل InSAR ثنائية السكون (Bi-static) ومتعددة السكون (multi-static)، حيث توجد هوائيات الاستقبال والإرسال على متن منصات متحركة مختلفة [14] [15] .

6. تطبيقات InSAR في البحوث الهندسية والبيئية

أثبتت تقنيات (InSAR) فعاليتها العالية في دعم البحوث الهندسية والبيئية على حد سواء، حيث تلعب دوراً محورياً في العديد من التطبيقات الهندسية والبيئية، نظراً لقدرتها على مراقبة تشوهات سطح الأرض بدقة عالية دون الحاجة إلى تواجد ميداني.

ففي **المجال الهندسي**، تُستخدم InSAR على نطاق واسع لمراقبة استقرار البنية التحتية والمنشآت الحيوية مثل السدود، والجسور، والأنفاق، والمباني العالية، وخطوط المترو، حيث تتيح الكشف المبكر عن الهبوطات الأرضية والانزياحات الدقيقة التي قد تشير إلى ضعف إنشائي أو تأثير ناتج عن الأنشطة البشرية. حيث توفر تقنيات المبعثرات المستمرة PS-InSAR قياسات دقيقة ومراقبة للهُبوطات، والانزياحات الأرضية الناجمة عن الأنشطة البشرية أو العوامل

الجيولوجية على مدى زمني طويل وبتغطية مكانية واسعة. كما تساهم في تقييم تأثيرات أعمال الحفر والإنشاءات الكبيرة على المناطق المحيطة، مما يعزز من كفاءة التخطيط العمراني والسلامة الإنشائية.

- في هذا السياق، تم استخدام تقنية InSAR لرصد تشوهات البنية التحتية في مدينة شنغهاي، الصين، عبر تحليل سلسلة زمنية من بيانات Sentinel-1 [16] . كشفت هذه الدراسة عن مناطق تعاني من هبوط أرضي مستمر بمعدل يصل إلى عدة مليمترات سنوياً في المناطق الحضرية المكتظة، مما يشير إلى تأثير العوامل البشرية مثل الضخ الجائر للمياه الجوفية والأنشطة الإنشائية المكثفة. وأوصت الدراسة بضرورة دمج InSAR في نظام إدارة البنية التحتية الحضرية لتوجيه الصيانة بشكل استباقي.
- وفي مجال إدارة الهبوط الأرضي، أثبتت تقنية InSAR فعاليتها من خلال تحليل الهبوطات في مناطق زراعية وصناعية في إيطاليا [17]. وقد استخدمت هذه الدراسة بيانات المبعثرات المستمرة (Persistent Scatterer InSAR) للكشف عن أنماط الهبوط المرتبطة باستخراج المياه الجوفية. وخلصت إلى أن دمج InSAR في السياسات البيئية يمكن أن يساعد في تحقيق إدارة مستدامة للأراضي والموارد المائية.

أما في **المجال البيئي**، تُعد هذه التقنية أداة حيوية لتقييم المخاطر البيئية والتغيرات المناخية وهي مثالية للرصد المتكرر في المناطق الوعرة أو التي يصعب الوصول إليها، ما يُعزز من فعالية سياسات إدارة الموارد الطبيعية ومواجهة الكوارث الطبيعية.

- حيث تم استخدام هذه التقنية في مراقبة الانزلاقات الأرضية تحت ظروف مناخية قاسية في وسط الصين، وقد أظهرت النتائج أن الأمطار الغزيرة تتسبب في تشوهات أرضية يمكن تتبعها بدقة عبر صور الرادار، مما يمكّن من تطوير أنظمة إنذار مبكر للحد من الخسائر البشرية والمادية. وبيّنت الدراسة أهمية الجمع بين InSAR وبيانات الأمطار والنماذج الطبوغرافية لتحسين فهم المخاطر الجيولوجية [18] .
- كما تم استخدام هذه التقنية بنجاح في مراقبة ذوبان الجليد في المناطق القطبية والفيضانات، فقد تم دمج InSARمع نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لرصد المناطق المتجمدة (Permafrost) في القطب الشمالي. وقد تمكن الباحثون من رصد التغيرات الموسمية في استقرار التربة المجمدة، وربطها بارتفاع درجات الحرارة الناتجة عن تغير المناخ. وشددت الدراسة على أن InSAR أداة حيوية لفهم التحولات البيئية طويلة الأمد وتقييم أخطار ذوبان التربة الجليدية على البنى التحتية والمجتمعات المحلية [19].
- ومن ناحية تحليل هبوط التربة في المناطق الحضرية ورصد الانزلاقات الأرضية وتقييم تأثير الزلازل، أثبتت InSAR فعاليتها في تقديم معلومات مكانية دقيقة تدعم القرارات في حالات الكوارث الطبيعية، وخاصة في الدول النامية التي تفتقر إلى تغطية ميدانية كافية. فقد تم تقييم الأضرار الناجمة عن زلزال 6 شباط 2023 الذي ضرب شمال غرب سوريا، بالاعتماد على تحليل بيانات Sentinel-1 [20] . قامت هذه الدراسة باستخدام تقنية تداخل الرادار التفاضلي(DInSAR) بتوليد خرائط تشوه تفصيلية، تُظهر حجم وتأثير الزلزال على امتداد الفوالق لإبراز المناطق الأكثر تضرراً. حيث تم تتبع التغيرات السطحية بعد الزلزال بدقة دون الحاجة للمسوحات

الميدانية المكلفة، وتم تحديد المناطق المتضررة بدقة تصل إلى مستوى الحيّ السكني. وقد بيّنت النتائج وجود إزاحات أفقية وشاقولية تجاوزت 10 سنتيمترات في بعض المناطق، ما ساهم في دعم جهود تقييم الأضرار ومساعدة صناع القرار في توجيه أعمال الاستجابة الطارئة والتخطيط لإعادة الإعمار.

من خلال هذه الدراسات، يتضح أن تقنية InSAR لم تعد مقتصرة على الدراسات العلمية فقط، بل أصبحت أداة عملية وفعالة تُستخدم في التخطيط العمراني المستدام، ومراقبة السلامة الإنشائية، وإدارة الموارد البيئية، والتكيف مع تأثيرات تغير المناخ والكوارث الطبيعية، مما يجعلها محوراً هاماً في مستقبل المراقبة الأرضية الذكية.

7. الخلاصة

تُعتبر تقنية InSAR أداة قوية في رصد التغيرات الأرضية وتُستخدم على نطاق واسع في التطبيقات الهندسية والبيئية. ومع توفر بيانات الأقمار الصناعية مجاناً، تزداد أهمية استخدامها في البلدان النامية لدراسة الكوارث الطبيعية وإدارة المخاطر، حيث تُعتبر هذه التقنية من أكثر التقنيات فعالية مقارنة بالطرق التقليدية من حيث الكلفة والدقة الزمنية والمكانية. يساهم هذا البحث في وضع رؤية هامة ودليل مرجعي للتعرف على هذه التقنية، وتوطينها في بلدنا لاستخدامها في تحسين مراقبة البنية التحتية، والتخطيط الحضري وإدارة استخدام الأراضي، بالإضافة إلى تقييم المخاطر البيئية والتأهب للكوارث والاستجابة لها. كما يشكل قاعدة ونقطة انطلاق للباحثين في مجال الاستشعار عن بعد وتقنياته المتقدمة.

8. المراجع

[1] D. Donoghue, “REMOTE SENSING AND IMAGE INTERPRETATION edited by Thomas M. Lillesand and Ralph W. Kiefer, John Wiley, New York, 2000. No. of pages: 736. Price £29.95. ISBN 0 471 25515 7.,” Earth Surf Process Landf, vol. 26, no. 12, 2001, doi: 10.1002/esp.267.

[2] M. Skolnik, “Role of radar in microwaves,” IEEE Trans Microw Theory Tech, vol. 50, no. 3, pp. 625–632, 2002.

[3] J. Lien, “PARTIALLY CORRELATED PERSISTENT SCATTERER THEORY AND TECHNIQUES FOR RADAR INTERFEROMETRY A DISSERTATION SUBMITTED TO THE DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING AND THE COMMITTEE ON GRADUATE STUDIES OF STANFORD UNIVERSITY IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY,” 2016.

[4] M. I. Skolnik, “Introduction to radar systems,” New York, 1980.

[5] R. F. Hanssen, Radar interferometry: data interpretation and error analysis, vol. 2. Springer Science & Business Media, 2001.

[6] “On the use of the Doppler centroid anomaly for the detection of water bodies under the severe wind conditions.”

[7] “Synthetic Aperture Radar Synthetic Aperture Radar and and SAR-Guidebook SAR-Guidebook.”

[8] N. Devanthéry, A. Advisor, M. Crosetto, and G. Ripoll, “High-resolution deformation measurement using Persistent Scatterer Interferometry.”

[9] A. Braun, “Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data–open applications, techniques, and limitations,” Open Geosciences, vol. 13, no. 1, pp. 532–569, 2021.

[10] P. A. Rosen et al., “Synthetic Aperture Radar Interferometry,” 2000.

[11] A. Pepe and F. Calò, “A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth’s Surface displacements,” Applied Sciences (Switzerland), vol. 7, no. 12. MDPI AG, Dec. 05, 2017. doi: 10.3390/app7121264.

[12] S. Suchandt, H. Runge, H. Breit, U. Steinbrecher, A. Kotenkov, and U. Balss, “Automatic extraction of traffic flows using TerraSAR-X along-track interferometry,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 48, no. 2, pp. 807–819, 2010.

[13] A. Moccia and G. Rufino, “Spaceborne along-track SAR interferometry: Performance analysis and mission scenarios,” IEEE Trans Aerosp Electron Syst, vol. 37, no. 1, pp. 199–213, 2001.

[14] G. Krieger and A. Moreira, “Spaceborne bi-and multistatic SAR: Potential and challenges,” IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, vol. 153, no. 3, pp. 184–198, 2006.

[15] G. Krieger, H. Fiedler, J. Mittermayer, K. Papathanassiou, and A. Moreira, “Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry,” IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, vol. 150, no. 3, pp. 87–96, 2003.

[16] Wang, Y., et al. (2022). Monitoring urban infrastructure deformation using Sentinel-1 InSAR time series: A case study in Shanghai. Remote Sensing of Environment, 268, 112782.

[17] Raspini, F., et al. (2021). Persistent Scatterer Interferometry supports sustainable land management in areas affected by land subsidence. Environmental Earth Sciences, 80(7), 275.

[18] Liu, C., et al. (2023). InSAR-based landslide monitoring under heavy rainfall conditions: Insights from central China. Landslides, 20(3), 999–1013.

[19] Solari, L., et al. (2021). Integration of InSAR and GIS for environmental risk assessment in permafrost regions. Cryosphere Discussions, 15, 1349–1364.

[20] Nofl, D., Darwishe, H., Chaaban, F., & Mohammad, A. (2024). Mapping surface displacements after the 6 February 2023 earthquake in Syria and Turkey using DInSAR and GIS techniques. Spatial Information Research, 32(3), 231-251.