

Рис. 1. Дистанційне зондування земної поверхні

## Моніторинг земної поверхні за допомогою радіолокаторів зі синтезованою апертурою, встановлених на легкомоторних літаках



**Олександр Безвесільний**  
канд. фіз.-мат. наук.,  
докторант Радіоастрономічного  
інституту НАН України,  
м. Харків

Стипендіат НАН України  
2006-2008 рр.



**Дмитро Ваврів**  
доктор фіз.-мат. наук,  
член-кореспондент НАН України,  
завідувач відділу електронних  
НВЧ приладів Радіоастрономічного  
інституту НАН України,  
м. Харків

### 1. Радіолокаційний моніторинг земної поверхні

Радіолокаційні системи, що розміщуються на літаках чи супутниках Землі, дозволяють отримувати якісні зображення земної поверхні з високим просторовим розрізненням. Такі системи, на відміну від оптичних систем, здатні формувати зображення місцевості вдень і вночі, незалежно від погоди та хмарності.

Для формування зображень з високим просторовим розрізненням треба використовувати антену з дуже вузьким променем. Якщо спробувати використати звичайну антену, то розміри такої антени виявляються надто великими. Наприклад, щоб досягнути розрізнення в 1 м на відстані до 10 км (рис. 1) необхідна антена з характерним поперечним розміром не менше 200 м, якщо радіолокатор, наприклад, працює на довжині хвилі  $\lambda=2$  см. Зрозуміло, що встановити таку антену на літаку неможливо.

Для вирішення проблеми отримання зображень з високим розрізненням використовують принцип синтезування апертури. Якщо встановити малу антену на рухомій платформі, наприклад на літаку, то за рахунок переміщення антени по траєкторії польоту, а також завдяки спеціальній обробці радіолокаційних сигналів, відбитих від землі, можна побудувати одну велику віртуальну антену — синтезовану апертуру. При цьому виявля-

ється, що просторове розрізнення буде приблизно дорівнювати лінійному розміру антени. Тобто у цьому разі можна, і навіть вигідно, використовувати невелику антену.

Під час обробки сигналів слід враховувати той факт, що траєкторія літака може відрізнятись від прямолінійної. Також нестабільною може бути і орієнтація літака, і, як наслідок, орієнтація променя антени.

Для формування синтезованої апертури необхідно вимірювати у режимі реального часу траєкторію польоту з точністю, кращою ніж  $\lambda/4$  і кут орієнтації літака з точністю близько до 0.1 градуса. Такі вимірювання відносно легко проводити за допомогою наявних навігаційних систем для супутників та великих літаків, оскільки їхній рух досить стабільний. У випадку легкомоторних літаків ця задача виявляється надзвичайно складною через швидкі та значні варіації траєкторії та орієнтації літака.

Втім, використання легкомоторних літаків для моніторингу земної поверхні є дуже перспективним. По-перше, використання легкомоторних літаків дозволяє істотно зменшити експлуатаційні витрати порівняно з використанням важких літаків чи супутників. По-друге, з'являється можливість оперативного отримання інформації за дуже короткий час, що важливо, наприклад, для моніторингу надзвичайних ситуацій.

Саме розробка радіолокаторів з синтезованою апертурою, які здатні ефективно та надійно працювати з борта легкомоторних літаків, є одним із напрямів досліджень, що останнім часом активно розвивається в Радіоастрономічному інституті НАН України (м.Харків). Зусиллями науковців інституту створено радіолокатор [1], який здатний ефективно працювати з борту таких літаків і отримувати високоякісні зображення земної поверхні у реальному часі. Під час випробувань радіолокатор працював з борту легкого літака АН-2, який показано на рис. 2 разом із встановленим радіолокатором. Можливості радіолокатора також розширені за рахунок можливості проводити картографування на двох поляризаціях, а також виявляти та визначати характеристики рухомих цілей на поверхні.

Вказаний радіолокатор вдалося створити за рахунок розробки та впровадження декількох принципово нових наукових та технічних рішень, — у цій статті мова йтиме про такі рішення:

1) визначення орієнтації літаків за радіолокаційними сигналами, відбитими від земної поверхні;

2) покращення якості радіолокаційних зображень за допомогою автофокусування;

3) формування зображень з високою геометричною точністю і низьким рівнем шуму;

4) побудова тривимірних радіолокаційних зображень земної поверхні без використання техніки інтерферометрії.

## 2. Запропоновані рішення

### Визначення кутів орієнтації

Щодо високоточного визначення орієнтації літаків, то ця проблема виникає, як відомо, у багатьох застосуваннях.

Зазвичай, для визначення кутів орієнтації використовують або інерційні навігаційні системи, або багатоканальні системи глобального супутникового позиціонування. Однак, такі системи виявляються малоефективними, якщо вимагається забезпечити вимірювання кутів орієнтації з точністю близько 0.1 градуса або ще точніше.

Нам вдалося розв'язати задачу визначення кутів орієнтації променя антени (рис. 3) завдяки використанню залежності доплерівської частоти відбитих радіолокаційних сигналів від цих кутів [2]. Для визначення кутів з точністю близько 0.1 градуса необхідно було вимірювати доплерівську частоту з точністю близько 10 Гц. Проблема вимірювання частоти з такою високою точністю була успішно розв'язана за рахунок створення відповідної апаратури.

Впровадження запропонованого методу дозволило нам спростити навігаційну систему й істотно зменшити її вартість.



Рис. 2. Радіолокаційна система, встановлена на літаку АН-2

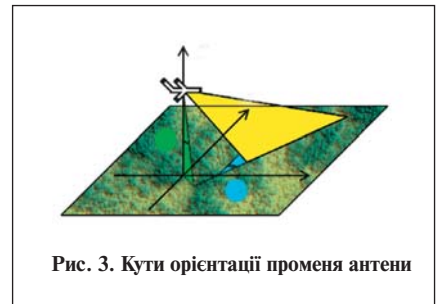


Рис. 3. Кути орієнтації променя антени

### Автофокусування

Крім точного визначення кутів орієнтації літака, для формування синтезованої апертури, як уже зазначено, необхідно також точне вимірювання траєкторії польоту. Невраховані відхилення від прямолінійного та рівномірного польоту призводять до розфокусування радіолокаційних зображень.

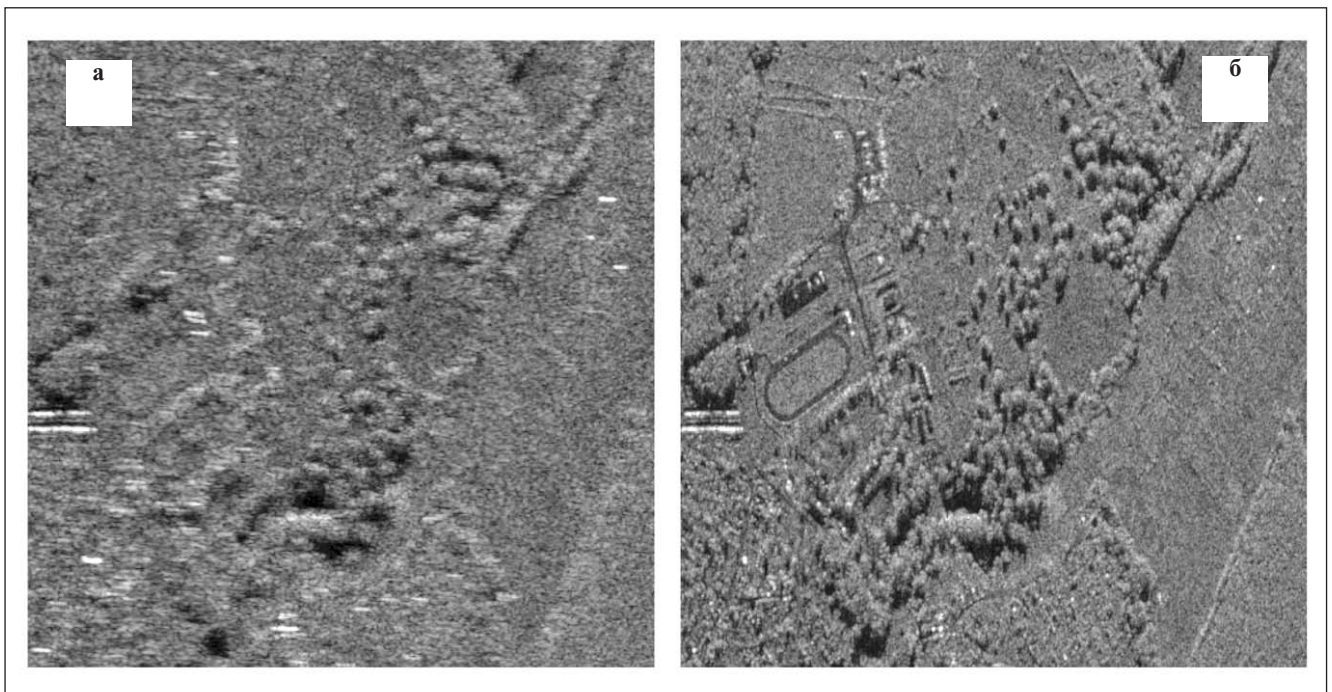


Рис. 4. Радіолокаційне зображення до автофокусування (а) та після автофокусування (б).

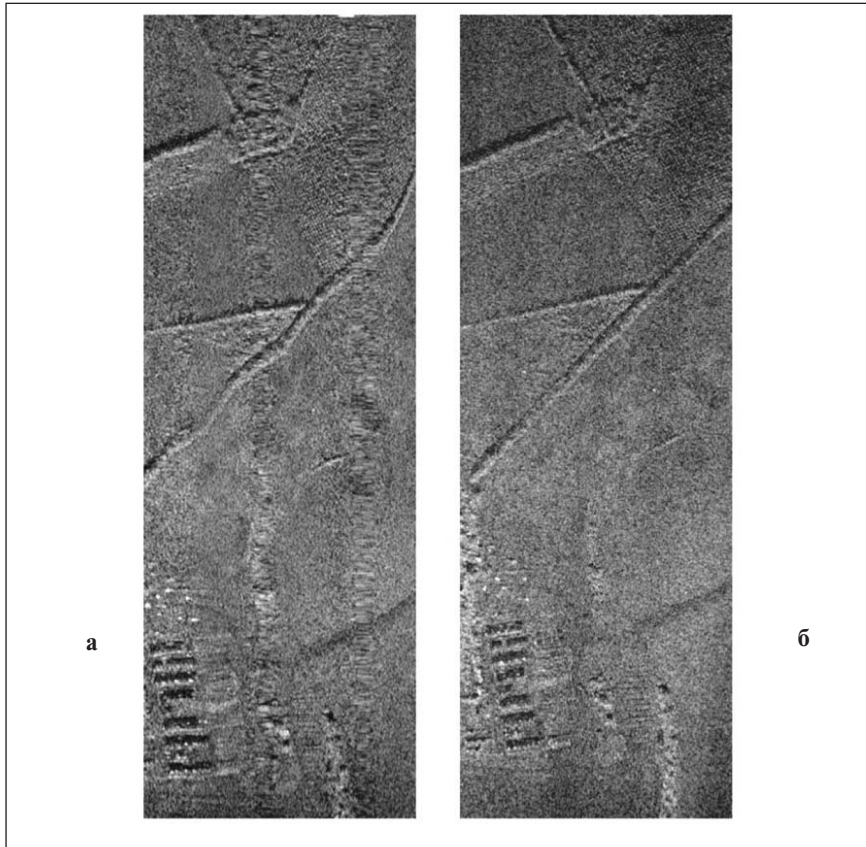


Рис. 5. Радіолокаційне зображення з геометричними спотвореннями (а) (традиційний метод) та геометрично правильне зображення (б) (запропонований метод)

Розв'язком проблеми є автофокусування, яке полягає в тому, що фазові помилки визначаються безпосередньо за відбитими радіолокаційними сигналами, і потім їх коректують.

Нами розроблено ефективний метод автофокусування [2], який дозво-

ляє оцінювати і компенсувати невідомі випадкові прискорення літака, які призводять до відхилень від прямолінійного руху. Це стало можливим завдяки використанню теоретичної залежності коефіцієнта фокусування від відстані у поєднанні з методом опти-

мізації контрасту зображення. Приклад застосування запропонованого методу показано на рис. 4. Ліворуч показано зображення до автофокусування, а праворуч — після автофокусування. Можна бачити істотне покращення якості зображення.

#### *Зменшення шуму та корекція геометричних спотворень на зображеннях*

Побудова високоякісних зображень передбачає розв'язання таких завдань як зменшення шуму та корекція геометричних спотворень.

Нами розроблено метод побудови радіолокаційних зображень з високою геометричною точністю [3], в якому синтезовані промені спрямовуються у вузли правильної рівномірної сітки на поверхні Землі, з урахуванням траєкторії польоту та орієнтації літака.

На радіолокаційному зображенні (рис. 5а), побудованому традиційним методом, можна бачити геометричні спотворення, спричинені нестабільністю орієнтації променя антени. Запропонований метод дозволяє отримати якісніше зображення, показане на рис. 5б.

Досягнута висока геометрична точність дозволила нам застосувати ефективний метод зменшення шуму шляхом усереднення кількох зображень однієї і тієї самої ділянки місцевості, які будуються за радіолокаційними даними, зібраними на різних частинах траєкторії. На рис. 6 наведено приклад отриманого зображення, розміщеного для порівняння поверх супутникового зображення з відомого



Рис. 6. Ілюстрація геометричної точності отриманого зображення: (а) зображення місцевості з сервісу Google Maps, (б) радіолокаційне зображення, отримане усередненням 45-ти оглядів

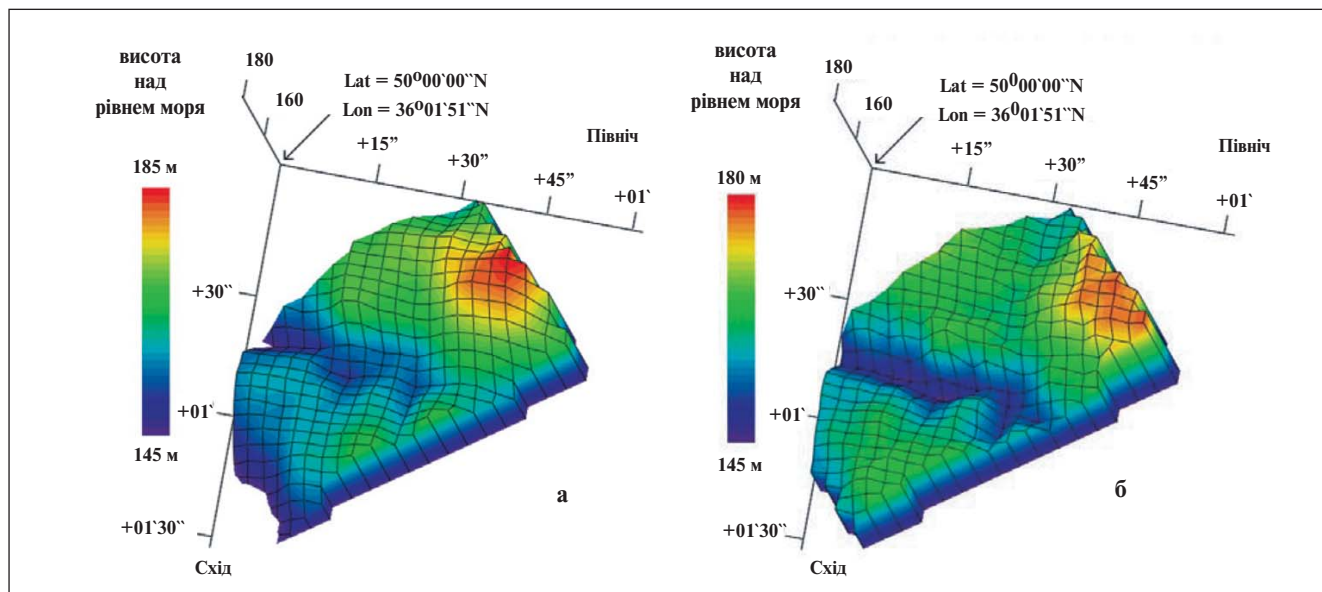


Рис. 7. Тривимірні зображення місцевості: (а) супутникова радіолокаційна інтерферометрія, (б) запропонований метод знаходження рельєфу за високоточними доплерівськими вимірюваннями

сервісу Google Maps. Можна бачити, що нам вдалося побудувати геометрично точне зображення з роздільною здатністю 3 м та низьким рівнем шуму. Нашою подальшою метою є розробка засобів та методів для формування радіолокаційних зображень з роздільною здатністю близько 50 см.

#### *Побудова тривимірних зображень земної поверхні*

Найскладнішими і найдорожчими є радіолокаційні системи, призначені для побудови тривимірних зображень поверхні Землі. Як відомо, для побудови таких зображень традиційно використовують стереоскопічну радіолокацію або інтерферометричну радіолокацію. Недоліком цих підходів є неможливість отримувати зображення у режимі реального часу.

Нещодавно нами математично обґрунтовано та практично перевірено, що тривимірні зображення поверхні Землі можна будувати значно простіше, використовуючи ту саму радіолокаційну систему, що й для побудови двовимірних зображень, змінивши лише алгоритм обробки даних [4, 5]. Ідея запропонованого методу полягає у тому, що варіації висоти місцевості

приводять до зміни середньої доплерівської частоти відбитих радіолокаційних сигналів. Якщо вимірювати доплерівську частоту з достатньо високою точністю, вдається розв'язати задачу знаходження рельєфу поверхні.

На рис. 7 наведено приклад тривимірного зображення ділянки місцевості поверхні Землі. Ліворуч на цьому рисунку показано зображення, отримане із супутника за допомогою радіолокаційної інтерферометрії. Праворуч показано зображення, побудоване нами за допомогою літакового радіолокатора по високоточним доплерівським вимірюванням. Можна бачити, що результати непогано збігаються. Запропонований метод вимагав вимірювання доплерівської частоти з точністю близько 0.5 Гц та вимірювання кутів орієнтації з точністю близько 0.05 градуса, що було також реалізовано.

Розроблений підхід показує, що отримання тривимірних зображень може бути настільки ж доступним як і двовимірних, що також значно розширює потенційні можливості застосування радіолокаційних систем з синтезованою апертурою при їх встановленні на легкомоторні літаки.

### 3. Висновки

У Радіоастрономічному інституті НАН України були запропоновані нові наукові та технічні рішення, які дозволяють створювати радіолокатори з синтезованою апертурою для розміщення на легкомоторних літаках. Відповідний радіолокатор виготовлено та випробувано. Результати експериментів повністю підтвердили правильність закладених рішень.

Фактично, створення такого радіолокаційного показало, що радіолокаційні системи для моніторингу земної поверхні можуть бути не унікальними, а загальнодоступними приладами з погляду їх вартості та зручності експлуатації.

Такі радіолокаційні системи можуть використовуватися для розв'язання цілої низки практичних задач: картографування місцевості, проведення кадастру земель, оперативного моніторингу розливу річок під час поєней, моніторингу лісових та степових пожеж, контролю сільськогосподарських та лісових угідь, геодезичних досліджень поверхні та інших завдань.

#### *Література*

1. Vavriv D.M., Vinogradov V.V., Volkov V.A., Kozhin R.V., Bezvesilnyy O.O., Alekseenkov S.V., Shevchenko A.V., Belikov A., Vasilevsky M.P., Zaikin D.I. Cost-Effective Airborne SAR // Radio Physics and Radio astronomy. — 2006. — Vol. 11, No. 3. — p. 276-297.
2. Безвесильний А.А., Ваврив Д.М., Виноградов В.В. Оценивание доплеровского центра и автофокусировка в самолетном радиолокаторе бокового обзора с синтезированной апертурой // Доклады НАН Украины. — 2005. — № 9. — с. 77-83.
3. Bezvesilnyy O.O., Gorovyi I.M., Sosnytskiy S.V., Vinogradov V.V., Vavriv D.M. Multi-Look Stripmap SAR Processing Algorithm with Built-In Correction of Geometric Distortions // Proceedings of the 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2010), 7-10 June 2010, Aachen, Germany. — 2010. — p. 712-715.
4. Bezvesilnyy O.O., Dukhopelnykova I.V., Vinogradov V.V., Vavriv D.M. Retrieving 3-D Topography by Using a Single-Antenna Squint-Mode Airborne SAR // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2007. — Vol. 45. — No. 11. — p. 3574-3582.
5. Ваврив Д.М., Безвесильний А.А., Виноградов В.В., Духопельникова Е.В. Нахождение рельефа поверхности Земли по высокоточным измерениям доплеровского центра с помощью самолетного радиолокатора с синтезированной апертурой // Доклады НАН Украины. — 2008. — № 4. — с. 86-91.