

УДК 558.88:[550.81:528.94]

Н. В. Пазинич

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України

Геоморфологічні дослідження на основі матеріалів дистанційного зондування Землі при створенні Держгеолкарти-200

Представлено 25.06.07

Представлено результати геоморфологічних досліджень із застосуванням космічних знімків та цифрових моделей рельєфу. Дані, отримані на основі застосування цифрових моделей рельєфу як основи для системного узагальнення розрізнених геолого-геоморфологічних матеріалів, дозволили провести палеорекострукцію розташування плейстоценових перигляціальних озерних басейнів на основі вираженості у рельєфі давніх берегових ліній.

Геоморфологічні, структурно-геоморфологічні дослідження та складання геоморфологічних карт є обов'язковою складовою, передбаченою комплексом робіт з укладання Держгеолкарти-200. Достатньо актуальним є впровадження комп'ютерних технологій та використання матеріалів дистанційного зондування Землі (МДЗЗ) у геолого-пошукові роботи. Дослідження проводились на аркушах Центрально-Української та Дніпрово-Донецької серії (М-35-IV, М-35-V, М-35-VI), розташованих у північно-західній частині Українського щита (УЩ) у зоні зчленування з Прип'ятською западиною і перспективних на пошуки ряду корисних копалин. За фізико-географічними умовами територія аркушів належить до зони мішаних лісів Поліських ландшафтів. За геолого-геоморфологічними дешифрувальними критеріями північний захід УЩ відноситься до закритих регіонів, по-перше за рахунок покриву осадових відкладів і по-друге — за рахунок широкого розвитку деревної рослинності. Застосування МДЗЗ дало змогу укласти геоморфологічну карту із максимальним ступенем деталізації, і надалі — використати її як основу для карти четвертинних відкладів.

Базовим матеріалом, на якому проводилося дешифрування, був спектрзональний космічний знімок (КЗ) LANDSAT. Використовувались не тільки окремі канали, але й синтез декількох каналів з обов'язковим залученням теплових каналів. Саме синтезовані знімки є найбільш інформативними при вирішенні від'ємних заболочених форм рельєфу та акумулятивних еолових пасом, широко поширених у Поліських ландшафтах. Окрім топо-

графічних матеріалів, вперше при роботах такого типу було використано цифрові моделі рельєфу (ЦМР). Залучення цифрових моделей, формування тривимірних (3D) моделей, комбінування зі знімками високого розділення дозволяє одержати високореалістичні зображення рельєфу. В основу ЦМР покладено дані радіолокаційного космічного знімання. Матеріали ЦМР несуть у собі інформацію, притаманну як космічним знімкам, так і топографічними картами, і мають певні переваги перед ними. Ці моделі рельєфу позбавлені мозаїчної структури, притаманної КЗ, і можуть трансформуватися у тривимірне об'ємне зображення. Мозаїчна структура зображення КЗ, зумовлена, як правило, аграрною діяльністю, вуалює природні особливості ландшафтів і утруднює процес дешифрування та виявлення природних пошукових об'єктів. У порівнянні з топографічними картами ЦМР вигідно вирізняються оглядовістю, генералізацією, деталізацією і об'ємністю зображення (рис. 1).

На рис. 1 зображено фрагмент ЦМР північно-західної частини території досліджень. Достатньо чітко виділяються плоскі понижені ділянки та підвищені, структуровані ділянки у південно-східній частині. Оптимізація використання новітніх МАКЗ досягається використанням комп'ютерних технологій. Новітні технології спонукають, окрім того, до формування нових наукових підходів бачення особливостей геоморфологічної будови територій, генезису та історії формування рельєфу. У результаті комплексних досліджень виділено декілька різновисоких рівнів воднольодовикової рівнини, деталізовано структуру гідромережі та інших накладе-

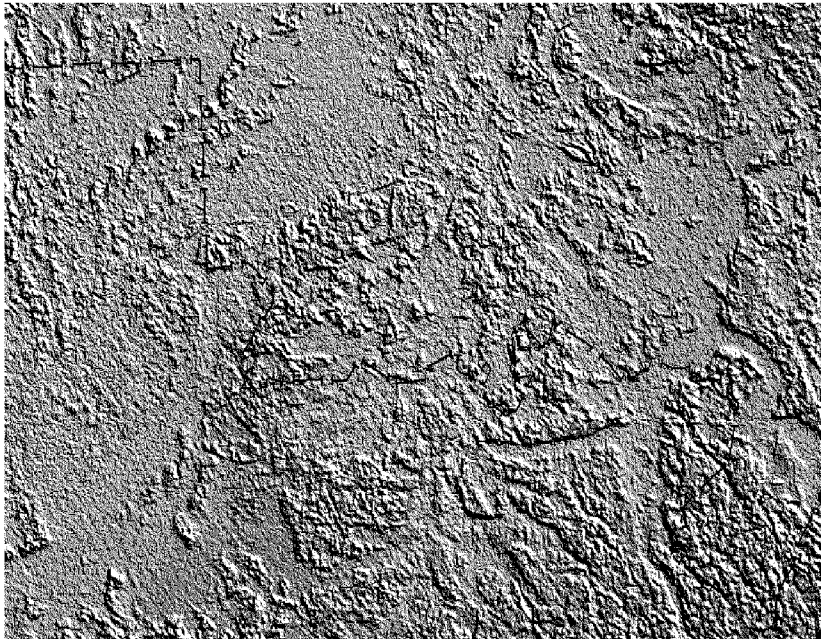


Рис. 1. Фрагмент цифрової моделі рельєфу північно-західної частини району досліджень

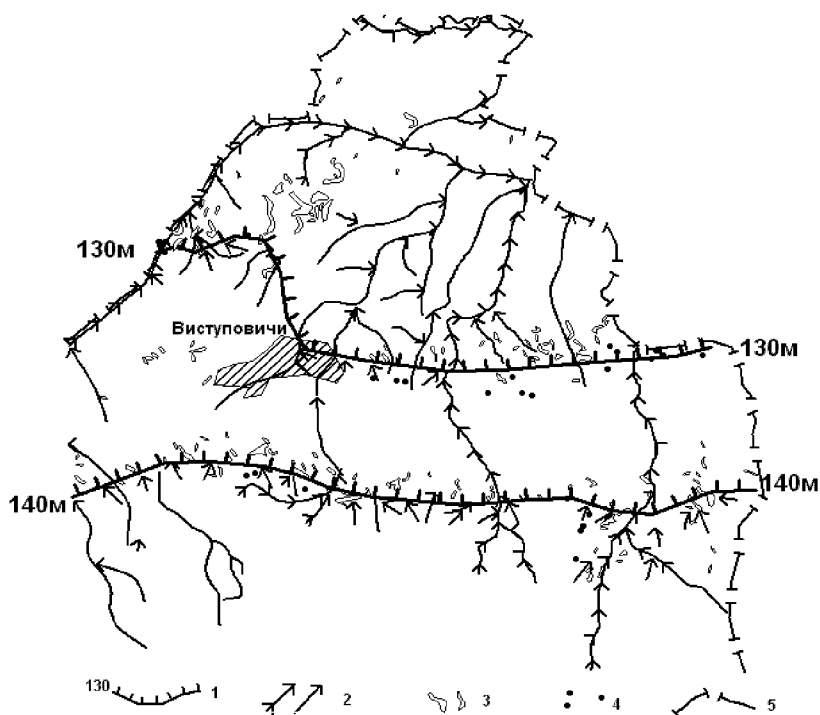


Рис. 2. Детальна ділянка досліджень: 1 — гіпсометричні «ступені», 2 — постійні та тимчасові водотоки, 3 — акумулятивні еолові пасма, 4 — мікрозападини, 5 — державний кордон

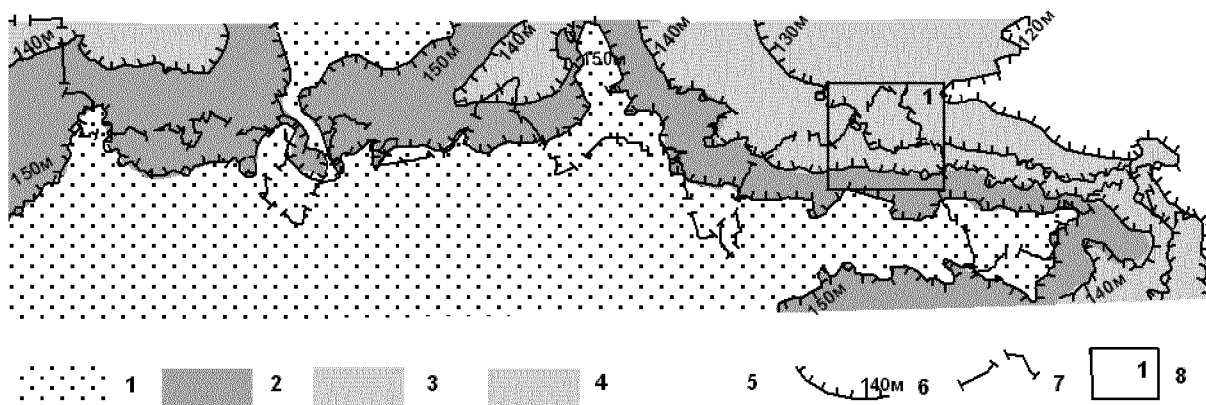


Рис. 3. Схема палеорекострукції перигляціальних плейстоценових озерних басейнів (за даними МДЗЗ). Умовні позначення: 1 — суходоли, 2—5 — різновікові озерні басейни, 6 — гіпсометричні перегіни, 7 — державний кордон, 8 — ділянка детальних досліджень (с. Виступовичі)

них форм рельєфу.

При дешифруванні та дослідженні акумулятивних рівнів воднольодовикової рівнини привернули на себе увагу своєрідні перегіни поверхні, які умовно можна назвати «гіпсометричними ступенями». Ці «ступені» простежуються фрагментарно, мають в основному вигляд субширотних смуг шириною до 1 км і проявляються, окрім збільшення нахилів поверхні, через скупчення накладених форм рельєфу. У межах цих перегинів спостерігається розвиток невеликих пологих ерозійних форм, часто з мікрозападинами у верхів'ях, а біля нижньої частини «ступені» — розповсюдження незначних за розмірами акумулятивних еолових форм. Виходячи з цього комплексу згрупованих форм рельєфу, можна припустити, що ми маємо справу з береговою лінією озера вздовж базису ерозії якого розвивалися ерозійні форми. Існування мікрозападин теж свідчить про наявність і близькість базису денудації. Еолові форми у нижній частині перегину сформувалися на піщаних прибережних відмілинах на етапі спуску озер (рис. 2).

На рис. 2 зображено результати дешифрування КЗ LANDSAT ділянки у районі с. Виступовичі. Гіпсометричні «ступені» відповідають абсолютним позначкам 130 та 140 м. У їхніх межах спостерігається значна кількість «сліпих» ерозійних форм, еолові пасма та мікрозападини.

За даними багатьох дослідників у плейстоцені у межах Прип'ятської западини існували постльодовикові озера дніпровського та валдайського віку. На думку Д. Соболева [5], талі води Дніпровського зледеніння формували перигляціальну водоюму, що відводилася у басейн Вісли, а після прориву Мозирських висот стік було змінено до басейну р.

Дніпро, і лише тоді сформувалася долина р. Прип'яті. Про трансгресію озерного басейну дніпровського віку з Дніпрово-Донецької западини на територію Українського щита зазначалось в роботі [1]. За даними досліджень [2] на території Білорусії у межах Поліської низовини існувало Поліське озеро поозерського (валдайського) віку із двома етапами озеротворення — раннім оршанським та пізнім браславським. Формування двох терасових рівнів долини р. Прип'яті можна пояснити двома етапами виповнення Поліської низовини талими водами поозерського часу і формування відповідних відкладів та геоморфологічних рівнів.

Якщо спиратися на дані про озерні етапи перигляціального розвитку території, то можна припустити, що виділені вище смуги гіпсометричних перегинів (рис. 2) визначають берегові лінії давніх озер етапів їхнього відносно стабільного існування. Саме наявністю водної поверхні та озерного кліфу можна пояснити ерозійні процеси та залишки їхньої діяльності — ерозійно-денудаційні улоговини, які могли сформуватися тільки при наявності базису ерозії. Наявність суфозійних мікрозападин також зумовлено базисом денудації та коливанням рівня дзеркала поверхневих та ґрунтових вод. Наявність незначних еолових пасом у нижній частині гіпсометричних перегинів пояснюється перевіюванням винесених відкладів ерозійними процесами та розвіюванням прибережних відмін. Необхідно зазначити, що збереженість давніх берегових ліній не є однаковою. Давніші берегові лінії, що займають вище гіпсометричне положення, мають відносно гірший провал у рельєфі.

На основі аналізу ЦМД та виділення гіпсометричних «ступенів», дешифрування КЗ вирізняє

лінійні смуги у рельєфі, які інтерпретуються як берегові лінії давніх озерних басейнів (рис. 3).

На рис. 3 представлено схему палеорекоконструкції розташування передбачуваних різновікових озерних перигляціальних басейнів за даними МДЗЗ. Абсолютні позначки ліній перегинів поверхні визначають рівні дзеркала вод озерних басейнів. Головні принципи використання ЦМР для ландшафтно-геоморфологічних досліджень, визначення послідовності перебігу рельєфоформувальних подій розроблено у роботах [3, 4]. Застосування ЦМР із успіхом може використовуватися як основа для системного аналізу та узагальнення розрізаних геолого-геоморфологічних даних.

Окрім впливу екзогенних чинників, що зумовили формування цих гіпсометричних перегинів, слід зазначити, що ситуаційно субширотні «ступені» пов'язані зі скидом, який відокремлює Прип'ятську западину від Українського щита та зонами розломів, Північно-Поліським та Південно-Прип'ятським. Саме структурні особливості на регіональному рівні контролювали межі давніх перигляціальних озерних басейнів. Структурну зумовленість озерних кліфів, а також наслідування плейстоценовими озерними басейнами водойм минулих епох можна використати та врахувати при прогнозуванні та пошуках розсіпів або покладів бурштину палеогенових басейнів. При роботах у межах програми створення Держгеолкарти-200 КЗ та ЦМР були

базовою інформацією при укладанні геоморфологічної карти, карти структурного дешифрування та при неотектонічному аналізі.

1. Кошик Ю. А., Тимофеев В. М., Комлев А. А. и др. Новые аспекты истории развития рельефа Южного Полесья в антропогене // Стратиграфия и корреляция морских и континентальных отложений Украины. — Киев: Наук. думка, 1987.—С. 134—143.
2. Мандер Е. П. Антропогенные отложения и развитие рельефа Белоруссии. — Минск: Наука и техника, 1973.—124 с.
3. Пазинич В. Г. Придніпров'я у перигляціалі. Ч. 1. Зміни водності річок // Супутник Київ. географічного щорічника / Під ред. В. М. Пашенко.—2004.—Вип. 2.—156 с.
4. Пазинич В. Г. Науково-пізнавальні можливості цифрових моделей поверхні Землі // Київ. географічний щорічник: Наук. зб.—2005.—Вип. 5.—С. 3—25.
5. Соболев Д. К геологии и геоморфологии Полесья // Вісник Української районної геолого-розвідкової управи.—1931.—Вип. 16.—С. 49—74.

GEOMORPHOLOGIC INVESTIGATION ON THE BASIS OF REMOTE SENSING DATA IN THE ELABORATION OF THE STATE GEOMAP-200

N. V. Pazynych

We present the results of the geomorphologic investigation based on the remote sensing data. Digital elevation model was used for system analysis of different initial geological and geomorphologic data. The locations of the Pleistocene postglacial lakes were outlined as the result of the analysis of ancient coastlines representing in the shape.

УДК 528.8.04:550.814.012

А. Г. Мичак, В. Є. Філіпович

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Методичні засади використання даних ДЗЗ при створенні Державної геологічної карти нового покоління (ГДП-200)

Представлено 25.06.07

Розглядаються головні методичні засади при оцінці геологічної інформативності, цифровій обробці та інтерпретації даних багатозональної космічної зйомки для цілей геологічного картографування та складання Дистанційної основи (ДО) Державної геологічної карти. Пропонуються рекомендації щодо застосування даних ДЗЗ на різних рівнях геологічного вивчення надр.

За останні п'ять-шість років в галузі дистанційних методів вивчення геологічного середовища відбулись суттєві зміни, пов'язані із створенням нового

покоління технічних засобів отримання аерокосмічної інформації, розробкою комп'ютерних систем їхньої обробки та комп'ютерних технологій комп'

лексного аналізу різноманітних геологічних даних, в тому числі інтегрованих географічних геоінформаційних систем (ГІС). Технічні засоби дистанційного зондування нового покоління дозволяють отримувати з космічних та авіаносіїв поруч із даними у видимому діапазоні спектру багатоспектральну і гіперспектральну інформацію малого, середнього та високого просторового розрізнення з цифровою реєстрацією, яка забезпечує різке розширення (у порівнянні з фотографічною) динамічного діапазону енергетичних величин. Використання при аерокосмічному зніманні різних ділянок електромагнітного спектру (видимого, ближнього інфрачервоного, теплового, мікрохвильового) з фіксацією вимірювань у 4, 7, 14 і більше вузьких діапазонах дозволяє отримувати якісно нову інформацію про геологічні об'єкти земної поверхні, четвертинні відклади, глибинну будову, стан та динаміку навколишнього природного середовища [1].

Комп'ютерні засоби обробки ДЗЗ забезпечують широкі можливості виконання геометричних та радіометричних корекцій, а також інтегрованих перетворень даних різних спектральних діапазонів для їхнього представлення у вигляді, найбільш придатному для вирішення завдань інтерпретації. Такі сучасні підходи дають можливість моделювати об'єкти та процеси, що відбуваються в геологічному середовищі.

Незважаючи на це, до цього часу геологи на теренах України використовують дистанційні матеріали недостатньо, методичні підходи до дешифрування застосовують ті, які були переважно напрацьовані в минулі десятиріччя, а інтегрований аналіз аерокосмічної інформації здійснюється із застосуванням лише окремих комп'ютерних технологій початкового рівня. Це призводить до обмеженого використання інформації, яка міститься у сучасних космічних матеріалах і відповідно зменшення ефективності геологозйомочних робіт.

З іншого боку діюча Державна програма геологічного довивчення площ (ГДП-200) та геологозйомочних робіт (ГЗР-50) вимагає складання сучасних цифрових карт геологічного змісту на основі ГІС-технологій. Основою таких побудов є дані ДЗЗ та результати їхньої інтерпретації. Аерокосмогеологічні методи досліджень є важливим засобом, отримання не традиційної інформації про геологічні об'єкти, які вивчаються і картографуються у процесі геологозйомочних робіт. В залежності від поставлених задач та рівня вивченості території геологозйомочний процес поділяється на етапи, які в свою чергу мають свої стадії. На кожній стадії вирішуються певні геологічні задачі та використовуються різні види і методи досліджень.

Мета аерокосмічних методів досліджень при геологозйомочних роботах визначається як вивчення

геологічної реальності на різних зрізах земної кори. Задачі, які вирішуються концептуально впливають з поетапними завданнями нормативних документів ГЗР і відносяться, в першу чергу, до геологічного картографування конкретних об'єктів, якими є геологічні тіла та процеси.

Враховуючи, що основним видом геологозйомочних робіт в Україні сьогодні є регіональне геологічне довивчення раніше закартованих площ масштабу 1 : 200000 (ГДП-200) та ГЗР-50 (геологозйомочні роботи із загальними пошуками масштабу 1 : 50000 (1 : 25000)), зупинимось детальніше на завданнях АКГД та на рекомендаціях щодо застосування даних ДЗЗ на різних рівнях геологічного вивчення надр. Серед останніх розрізняють оглядово-регіональні, регіональні та детальні.

При оглядово-регіональних аерокосмогеологічних дослідженнях (ОРАКГД) вивчаються перш за все основні риси геологічної будови. Уточнюються характеристики відомих систем розривних порушень, виявляються нові системи розломів і аналізується рисунок розривних порушень території в цілому. Коректуються межі надпорядкових тектонічних структур. Особливу увагу надається з'ясуванню просторових закономірностей розподілу крупних тектонічних форм. На єдиній аерокосмічній основі проводиться тектонічне, неотектонічне районування регіону.

Для виконання ОРАКГД використовуються дрібномасштабні і середньомасштабні космічні знімки (масштаби 1 : 500 000 і дрібніші).

На основі спільного аналізу аерокосмічної і геологогеофізичної інформації складаються схеми тектонічного, районування, які служать основою для довгострокового планування геологорозвідувальних робіт і вибору ділянок для постановки регіональних аерокосмогеологічних і досліджень [2, 3].

Метою регіональних аерокосмогеологічних досліджень (РАКГД) при ГДП-200 є:

- аналіз, узагальнення та комплексна інтерпретація інформації, одержаної раніше в результаті використання МКЗ при геологічних регіональних дослідженнях території;
- дешифрування МКЗ для уточнення або перегляду уявлень регіональної геологічної будови, в т. ч. і глибинної, з позицій сучасних дистанційних технологій. Виявлення нових лінеаментів, кільцевих структур;
- створення моделі глибинної геологічної будови регіону робіт на основі комплексного аналізу результатів дешифрування і геолого-геофізичних досліджень, яка передбачає нову інформацію про розломно-блокову тектоніку території;
- розробка пропозицій для подальших детальних, пошукових, в деяких випадках пошуково-розвідувальних або геоекологічних робіт.

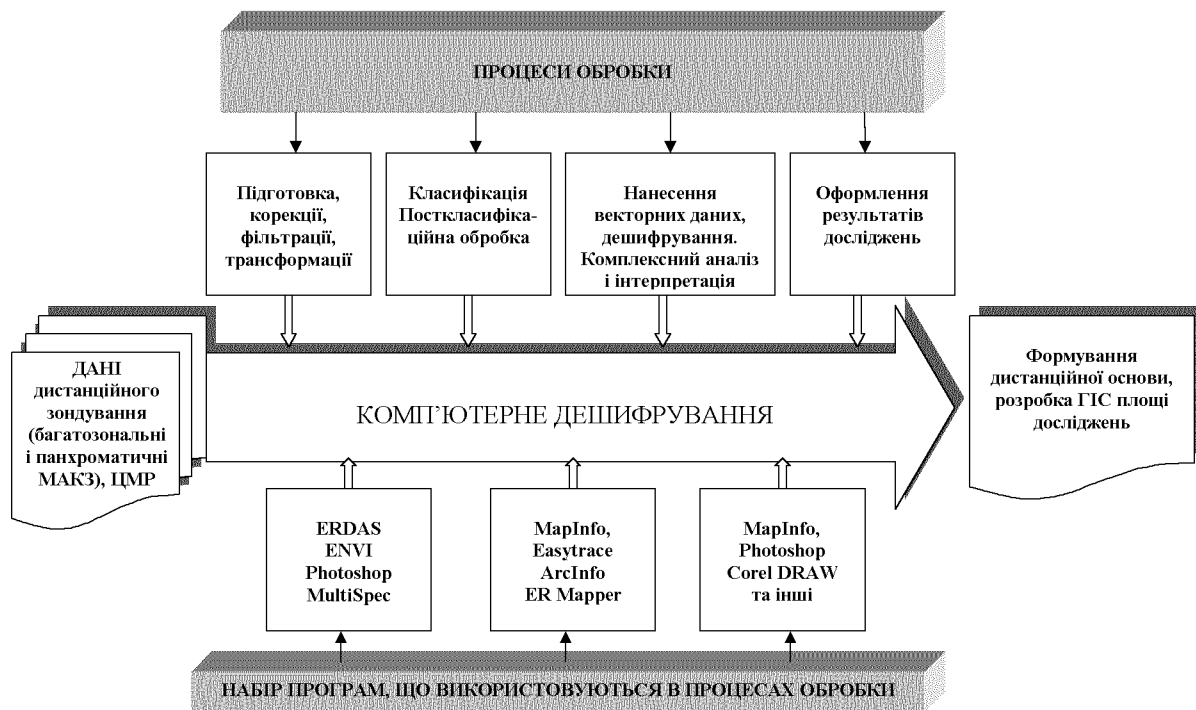


Схема обробки даних дистанційного зондування при ГЗР

Регіональні аерокосмогеологічні роботи проводяться, як правило, у межах площі однієї трапеції масштабу 1:200 000, або 2-3 площах трапецій, які мають спільні риси геологічної будови і належать до однієї регіональної серії аркушів. При регіональних дослідженнях використовуються дрібно- та середньомасштабні космічні знімки.

Детальні аерокосмогеологічні дослідження (ДАКГД) проводяться з метою:

- створення комплексу фактографічної дистанційної основи, на яких можлива побудова спеціальних карт різного змісту і призначення (тематичного дешифрування; структурного, геоморфологічного (морфоструктурного аналізу), сучасних екзогенних процесів, техногенного навантаження, зміни геологічного середовища та ін.);
- дешифрування МКЗ для детального вивчення геологічної будови району робіт, в т. ч. і глибинної, з позицій сучасних дистанційних технологій. У процесі дешифрування та інтерпретації знімків виділяються додаткові розривні порушення, з'ясовуються закономірності розподілу структурних форм, розміщення корисних копалин;
- створення моделі глибинної геологічної будови регіону робіт на основі комплексного аналізу результатів дешифрування і геолого-геофізичних

досліджень, яка передбачає нову інформацію про розломно-блокову тектоніку території та закономірностей розміщення корисних копалин;

- дешифрування МАКЗ територій для встановлення і вивчення геологічних небезпек (природних і техногенних), моніторингу небезпечних сучасних геологічних процесів;
- картування територій промислово-міських агломерацій і гірничопромислових районів з метою одержання геологічної основи для екологічного картографування, вирішення геоекологічних і інших питань;
- розв'язання інших загально геологічних завдань, що мають важливе значення для господарства країни та розвитку геологічної науки.

ДАКГД проводяться в гірничопромислових районах, на площах широкого розвитку продуктивних або потенційно високоперспективних геологічних утворень і структур, на площах інтенсивного розвитку або активізації небезпечних природних і техногенних геологічних процесів, на площах, що намічаються для будівництва великих підземних об'єктів спеціального призначення, а також в районах із важливими в науковому або господарському відношенні геологічними об'єктами.

Територіально ДАКГД можуть охоплювати 2-3

аркуші прийнятої в Україні розграфки топографічних карт масштабу 1:50000. При ГЗР-50 в залежності від вирішуваних завдань і вже досягнутої вивченості виділяються такі види: геологічна зйомка (ГЗ-50); геологічне довивчення раніше закартованих площ (ГДП-50); глибинне геологічне картування (ГГК-50); складання та підготовка до видання Геолкарти-50 (25). Детальні аерокосмогеологічні дослідження є невід'ємною складовою частиною технологічного процесу всіх цих видів досліджень. При детальних дослідженнях використовуються середньо та крупномасштабні космічні знімки.

Технологічна модель застосування даних ДЗЗ при геологічному вивченні надр у сучасних умовах наведені на рисунку.

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006.—357 с.

2. Організація та проведення геологічного довивчення раніше закартованих площ масштабу 1:200000, складання та підготовка до видання Державної геологічної карти України масштабу 1:200000. Інструкція. — К.: Геолком України, 1999.—295 с.
3. Організація та проведення геологозйомочних робіт і складання та підготовка до видання Геологічної карти України масштабу 1:50000 (1:25000). Інструкція. — К.: Департамент геології та використання надр Міністерства екології та природних ресурсів України, 2002.—204 с.

METHODICAL PRINCIPLES FOR THE USE OF DATA OF REMOTE SENSING OF THE EARTH FOR THE DEVELOPMENT OF THE STATE GEOLOGICAL MAP

A. H. Mychak, V. Ye. Filipovych

We consider the main methodical principles for the estimation of the geological informing, for digital treatment and interpretation of multizonal space survey data for the geological mapping and development of the distance basis for the State geological map. We offer some recommendations for application of remote sensing data at different levels of geological study of the Earth's bowels.

УДК 621.396:621.391.82

**О. В. Сытник¹, В. Б. Ефимов²,
В. Н. Цымбал², А. В. Кабанов²**

¹Інститут радіофізики і електроніки ім. А. Я. Усикова НАН України, Харків

E-mail:.. ssvp11@ire.kharkov.ua

²Центр радіофізического зондирования Земли ім. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харків

E-mail:.. kalmykov@ire.kharkov.ua

Метод объединения данных многочастотных систем дистанционного зондирования Земли

Представлено 25.06.07

У роботі розглядається метод об'єднання даних двочастотних РЛС зондування поверхні Землі. За основу методу прийнята властивість інваріантності до інверсних радіоконтрастів перетворення Хо. Аналіз радіозображень здійснюється у просторі спектрів параметрів на основі статистично оптимальних алгоритмів. Алгоритм ідентифікації просторово-розподілених об'єктів при двочастотному зондуванні полягає у формуванні РЛІ кожним локатором, квантуванні цих зображень і отриманні спектрів параметрів всієї сукупності об'єктів, відповідних кожному з бінарних зображень, а потім обчисленні оцінок спектрів параметрів для кожного класу об'єктів, що задовольняють мінімум середнього байесівського ризику. Застосування розглянутого алгоритму для ідентифікації тріщин і ополонів в льодах по зображеннях 3- і 23-сантиметрового локаторів показало можливість ідентифікації шуканих об'єктів з вірогідністю не нижче 0.95 при прямих та інверсних радіолокаційних контрастах понад 10 дБ.

Радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны (РСА) позволяют получать оперативную ин-

формацию о состоянии подстилающей поверхности в виде радиолокационных снимков местности. Осо-

бенно актуальными являются задачи идентификации ледовых покровов на судоходных трассах, обнаружения и локализации нефтяных и масляных пятен на поверхности моря и т. п. Однако применяемые на практике одночастотные РСА, как правило сантиметрового или дециметрового диапазонов в ряде случаев не позволяют получать оперативные однозначные решения и требуют либо дополнительных измерений, либо длительной статистической обработки принятых сигналов. В силу нестационарности наблюдаемых процессов, например подвижки льдов, быстрого промерзания трещин, переворачивания айсбергов, увлечения нефтяных пятен течениями использование дополнительных или повторных измерений не дает адекватных данных для решения задачи идентификации. В свою очередь, дополнительная детальная обработка информации на земле после проведения измерений снижает ценность получаемых решений в силу устаревания информации.

Оперативное решение задач идентификации представляется возможным при построении многочастотных систем дистанционного зондирования. Поскольку информативными параметрами объектов идентификации, как правило, являются оценки их координат, параметры формы, размеры, мощность рассеянного сигнала и т. п., то алгоритм идентификации должен включать стохастические модели рассеяния сигналов каждого из используемых диапазонов длин волн. Для оперативной обработки данных на борту носителя комплекса РСА возможно использование эмпирических моделей, например описанных в работах [2—5, 7]. Степень соответствия эмпирических моделей реальной действительности выражается в виде априорной неопределенности, как правило, относительно наблюдаемых данных (т. е. признаков распознавания), причем она не может быть устранена предварительным обучением в силу нестационарности наблюдаемого процесса.

Сигнал, рассеянный шероховатой подстилающей поверхностью для РСА дециметрового и сантиметрового диапазонов, описывается выражением [1]:

$$\begin{aligned} \dot{s}_{m,i}^K(t) &= \\ &= U_i^K G^K(t - t_i) \exp\{-j[2\pi V_n^2(t - t_i)^2 / (\lambda^K r_i)] - \psi_i^K\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{s}_{m,i}^K(t)$ — элементарный рассеянный сигнал K -го локатора i -й точечной цели в m -й полосе дальности, U_i^K — максимальное значение отраженного одиночной точечной целью радиосигнала, $G^K(t - t_i)$ — нормирующая функция, характеризующая модуляцию зондирующего и отраженного от цели сигнала при их передаче и приеме диаграммой направленности реальной антенны K -го лока-

тора, r_i — дальность до i -й точечной цели, V_n — скорость полета носителя, λ^K — длина волны зондирующего колебания соответствующего локатора, $t_i = x_i / V_n$, x_i — абсцисса точечной цели, расположенной в m -й полосе дальности, ψ_i^K — изменение фазы радиосигнала K -го локатора при отражении от i -й цели.

Тепловые шумы аппаратуры дополнительно искажают сигнал, и следовательно, их необходимо учесть в алгоритме

$$\xi_{m,i}^K(t) = \dot{s}_{m,i}^K(t) + \dot{n}_{m,i}^K(t), \quad (2)$$

где $\dot{n}_{m,i}^K(t)$ — некоррелированные гауссовские шумы с нулевым матожиданием и дисперсией $(\sigma_{m,i}^K)^2$.

При реализации в блоке обработки сигналов РСА этого алгоритма гармонического анализа радиолокационное изображение местности в m -й полосе дальности будет равно

$$J_m^K(\omega) = \int_{-T/2}^{T/2} \xi_m^K(t) \dot{h}_m^K(t) \exp(-j\omega t) dt. \quad (3)$$

Здесь $\omega = 4\pi V_n \chi / (\lambda r_m)$, χ — абсцисса сигнала радиолокационного изображения, T — интервал синтезирования, $\dot{h}_m^K(t)$ — опорная функция для m -й полосы дальности K -го локатора, которая выбирается как взвешенная функция, комплексно сопряженная с сигналом, отраженным от одиночной точечной цели.

При установке на борту носителя двух локаторов различных диапазонов длин волн и при однопольной обработке сигналов в каждом из локаторов формируется два радиолокационных изображения (РЛИ) одного и того же участка поверхности. После предварительной обработки этих изображений, заключающейся в коррекции геометрических искажений, привязки к географическим координатам, процедуры фильтрации и бинарного квантования этих изображений они могут быть использованы в процедуре идентификации.

Будем считать, что каждое из полученных бинарных изображений представляет собой пространство сигналов $L_2(R^n, R)$ размера n . Пространственно распределенные цели на подстилающей поверхности могут быть описаны совокупностью параметров α , которая принадлежит пространству $L_2(R^n, R)$, называемому пространством параметров сигналов размера l . В пространстве сигналов выделим подмножество $M \in R^n$ и введем в рассмотрение характеристическую функцию Θ , с помощью которой будем отмечать принадлежность элемента J_m^K пространства $L_2(R^n, R)$ подмножеству M , т. е.

$$\Theta(J_m^K/M) = \begin{cases} 1, & \text{если } J_m^K \in M, \\ 0, & \text{если } J_m^K \notin M. \end{cases} \quad (4)$$

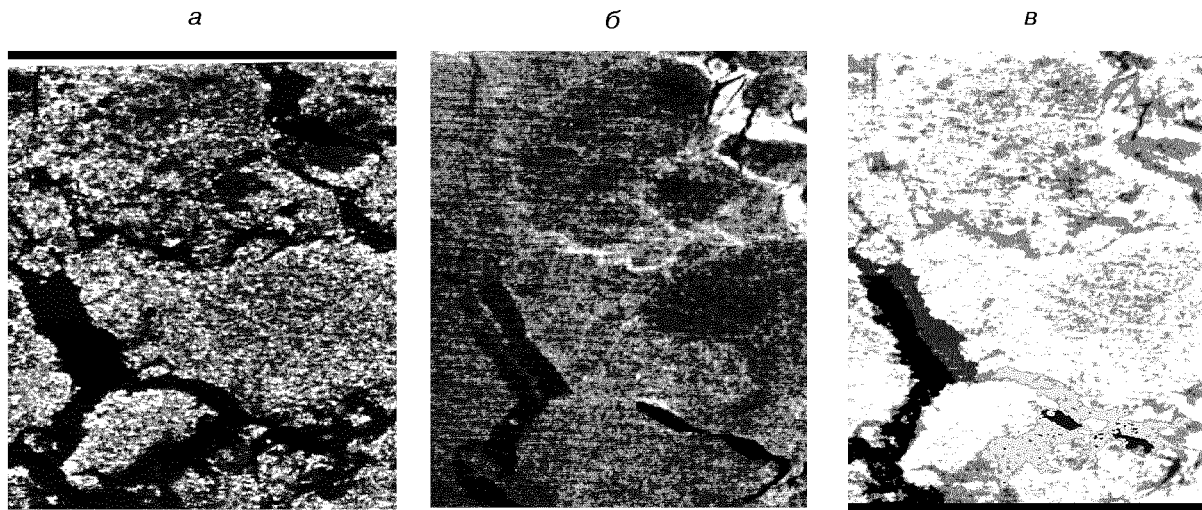


Рис. 1. Радиолокационные изображения участка поверхности моря, покрытого льдами: *а* — диапазон 23 см, *б* — диапазон 3 см, *в* — результат идентификации

Согласно [6, 8] спектр параметров $\alpha \in L_2(R^l, R)$ может быть найден как

$$S_{\varphi}^K(\alpha) = \int_{R^n} \Theta(J_m^K) \delta[\varphi(J_m^K, \alpha)] dJ_m^K = \int_{R^n} \Theta(J_m^K) \Theta\{J_m^K / [\varphi(J_m^K, \alpha) = 0]\} dJ_m^K, \quad (5)$$

где $\varphi(\cdot)$ — функция, устанавливающая зависимость между изображениями заданного класса объекта на подстилающей поверхности и совокупностью его параметров α .

Очевидно, что преобразование (5) необходимо выполнить $2p$ раз, где p — число классов распознаваемых функций $\varphi(J_m^K, \alpha)$. Поскольку всякое бинарное изображение можно рассматривать как характеристическую функцию $\Theta(J_m^K)$ некоторого подмножества M , то каждый спектральный отсчет $S_{\varphi}^K(\alpha)$ равен объему области, заключенной в пересечении подмножества M с поверхностью $J_m^K(\alpha)$. Очевидно, что максимальный спектральный отсчет $S_{\varphi}^K(\alpha)$ характеризует то значение вектора параметров α , при котором множество M в максимальной степени похоже на поверхность $J_m^K(\alpha)$. Другими словами, каждый спектральный отсчет $S_{\varphi}^K(\alpha)$ в точке α дает меру сходства произвольного подмножества M с заданной поверхностью $J_m^K(\alpha)$, имеющей параметр α .

В силу свойства линейности преобразования неаналитические контуры объектов на исходных изображениях можно идентифицировать в виде набора моделей аналитических кривых. Пусть Z — f -то-

чечная модель объекта одного из классов в подмножестве сигнальной области R^n , а $\Theta(J_m^K/Z)$ — его бинарное изображение. Тогда при наличии объекта на изображении хотя бы $f_1 < f$ точек в спектральной области (5) окажутся на поверхности тела, определяемого уравнением $\varphi(J_m^K, \alpha)$, где $\alpha \in M_Z$ — вектор параметров объекта, т. е. $S_{\varphi}^1(\alpha) \geq f_1^1$. Аналогичное решение по объекту Z выносится и при обработке изображения от лоатора другого диапазона, т. е. $S_{\varphi}^2(\beta) \geq f_1^2$, где β — вектор параметров объекта, соответствующий изображению 2-го лоатора.

Экспериментальное исследование алгоритма показало его эффективность при решении задач идентификации и оценивания координат неоднородностей ледовых и земных покровов. Радиолокационные изображения участка поверхности моря, покрытого льдами, полученные с помощью радиолокаторов дециметрового и сантиметрового диапазонов показано на рис. 1, *а* и рис. 1, *б* соответственно. На рис. 1, *в* показан результат работы алгоритма.

Очевидно, что используя только данные лоатора дециметрового диапазона (рис. 1, *а*) или только данные лоатора сантиметрового диапазона (рис. 1, *б*), из-за ряда эффектов (таких как рассеяние РЛ-сигнала от шероховатых поверхностей льда, отражение сигнала от боковых стенок трещин льдин, рассеяние сигнала от мокрого снега на поверхности воды и т. п.) однозначная идентификация состояния поверхности выделенных на рис. 1, *в* участков затруднительна.

На рис. 1, *в* представлен результат совместной обработки двухчастотных РЛИ по предложенному

методу анализа радиоконтрастов. Цветом выделены участки, которые отнесены алгоритмом к различным классам поверхностей. Применение рассмотренного алгоритма для идентификации трещин и разводей во льдах по радиолокационным изображениям 3-сантиметрового и 23-сантиметрового локаторов показало возможность идентификации искомым объектов с вероятностью не ниже 0.95 при прямых и инверсных радиолокационных контрастах свыше 10 дБ.

Таким образом, алгоритм идентификации пространственно-распределенных объектов при двухчастотном зондировании состоит в формировании РЛИ каждым локатором, квантовании этих изображений и получении спектров параметров всей совокупности объектов, соответствующих каждому из бинарных изображений, а затем вычислении оценок спектров параметров для каждого класса объектов, удовлетворяющих минимуму среднего байесовского риска.

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны. — М.: Радио и связь, 1988.—304 с.
2. Ефимов В. Б., Калмыков А. И., Шестопапов В. П. и др. Исследование ледовых покровов радиофизическими средствами с аэрокосмических носителей // Изв. АН СССР. Сер. ФАО.—1985.—21, № 5.—С. 512—519.
3. Калмыков А. И., Фукс И. М. Модели рассеяния радиоволн подстилающими поверхностями и их учет в системах радиолокационного зондирования // Радиофизика и радиоастрономия.—1996.—1, № 1.—С. 31—41.
4. Кулемин Г. П., Разказовский В. Б. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами. — К.: Наук. думка, 1987.—229 с.
5. Разказовский В. Б. Дифракция на полуплоскости с неровным краем в задаче распространения радиоволн под поверхностью при малых углах скольжения // Изв. вузов.

Радиофизика.—1997.—40, № 8.—С. 965—979.

6. Сытник О. В., Дубовицкий В. А. Алгоритм идентификации пространственно-распределенных объектов при двухчастотном зондировании поверхности земли с помощью РСА // Изв. вузов. Радиоэлектроника.—2000.—43, № 11.—С. 37—46.
7. Шестопапов В. П., Калмыков А. И., Комяк В. А. и др. Комплексные исследования природной среды Земли радиофизическими методами // ДАН СССР.—1985.—284, № 1.—С. 98—102.
8. Ballard D. H. Generalizing The Hough Transform To Detect Arbitrary Shapes // Pattern Recognition.—1981.—13, N 2.—P. 111—122.
9. Ulabi F. T. Microwave Backscatter Dependence on Surface, Roughness, Soil Moisture and Soil Texture: Part I. Bare Soil // IEEE Trans. Geosci. Electron.—1983.—GE-16, N 4.—P. 286—295.

THE MERGE INFORMATION METHOD FOR MULTIFREQUENCY SYSTEMS OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

O. V. Sytnik, V. B. Efimov, V. N. Tsybal, A. V. Kabanov

The merge information method for two-frequency radar earth surface remote sensing is considered. The method is based on the Hough transform property of radio contrast inverse invariance. The analysis of radio images is carried out in the space of spectrums of parameters on the basis of statistically optimal algorithms. The algorithm of identification of the spatially-distributed objects at two-frequency sounding consists in forming the SAR images by each radar, quantization of these images and obtaining spectrums of parameters for all multitude of objects corresponding to each of the binary images, and then in calculating estimations of spectrums of parameters for every type of objects satisfying the minimum of the middle Bayes risk. The application of the algorithm under consideration for identification of cracks in ices on the radar images of two-frequency radar remote sensing showed the possibility to identify the sought-for objects with a probability not below 0.95 at direct and inversed radar contrasts over 10 dB.

УДК 621.396:621.391.82

В. Б. Ефимов¹, А. С. Курекин¹, О. В. Сытник²,
В. Н. Цымбал¹, А. С. Гавриленко¹, А. В. Кабанов¹

¹Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков
kalmykov@ire.kharkov.ua

²Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков
ssvp11@ire.kharkov.ua

Обзорная радиолокационная система дистанционного зондирования Земли с повышенным азимутальным разрешением

Представлено 25.06.07

Пропонується система для дистанційного зондування Землі на основі імпульсного когерентного радіолокатора, що працює в двох режимах — оглядовому і високій роздільній здатності. У оглядовому режимі радіолокатор має азимутну роздільну здатність 50—100 м і смугу огляду 500—600 км при висоті орбіти носія 650—750 км. У режимі високій роздільній здатності локатор працює за принципом радіолокатора з синтезом апертури антени (РСА) і має близьку до потенційної роздільну здатність, що приблизно дорівнює 2—5 м в смузі 10—15 км в будь-якій частині загальної смуги огляду 500—600 км. РСА випромінює послідовність пачок радіоімпульсів з носійною частотою, яка змінюється від імпульсу до імпульсу. При цьому частота повторення імпульсів в пачці вибрана високою для однозначного опису доплерівського зсуву частоти, а частота випромінювання пачок вибрана настільки низькою, щоб виключити неоднозначність за дальністю. Частотна селекція імпульсів в межах однієї пачки здійснюється в широкосмуговому тракті проміжної частоти із загальною шириною смуги близько 100 МГц. Блок обробки сигналів будується за багатоканальною схемою. Кількість каналів блоку обробки визначається числом частотних зсувів усередині пачки імпульсів. Частотно-часова селекція відбитих від поверхні Землі сигналів і стиснення імпульсів для забезпечення високої роздільної здатності за дальністю здійснюється в кожному каналі окремо. У роботі розглядаються особливості побудови багатоканальної структури приймального пристрою РСА і алгоритм обробки траєкторного сигналу. Обговорюються обмеження на кількість додаткових вузькосмугових трактів і ширину частотної смуги кожного каналу.

В настоящее время большое внимание уделяется проблемам, связанным с экологическим и кризисным глобальным мониторингом Земли космическими системами дистанционного зондирования. К этим проблемам относятся наблюдения природных ледовых систем Арктики и Антарктики, обнаружение и оценка параметров активных метеорообразований над морской поверхностью, в том числе тропических ураганов, тайфунов и т. д. Все это требует использования адекватных средств дистанционного зондирования космического базирования, обеспечивающих оперативную съемку поверхности Земли в полосе обзора 400—500 км и более. Известен опыт многолетней эксплуатации космических радиолокаторов бокового обзора ИСЗ «Космос-1500»/«Океан»/«Сич-1» [2, 3]. В настоящее время успешно функционируют радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны (РСА) спутников RADARSAT, ENVISAT [www.rsi.ca/products/sensor/radarsat/

radarsat1.asp и www.esa.int/envisat], которые обеспечивают в режиме «Scan SAR» наблюдения в полосе обзора порядка 400 км. Реализация такого режима предполагает использование крупногабаритной и дорогостоящей фазированной антенной решетки.

В работе предлагается РСА для малых космических аппаратов (весом до 1000 кг). Радиолокатор для дистанционного зондирования Земли обеспечивает возможность проведения съемки поверхности Земли в одном из двух режимов:

- обзорный режим — в полосе обзора 500—600 км с разрешением 50—100 м;
- детальный режим в полосе захвата 500—600 км при полосе обзора 10—15 км с разрешением 2—5 м.

При выборе технических характеристик РСА, в частности полосы обзора и потенциально достижимого разрешения, существует ряд ограничений,

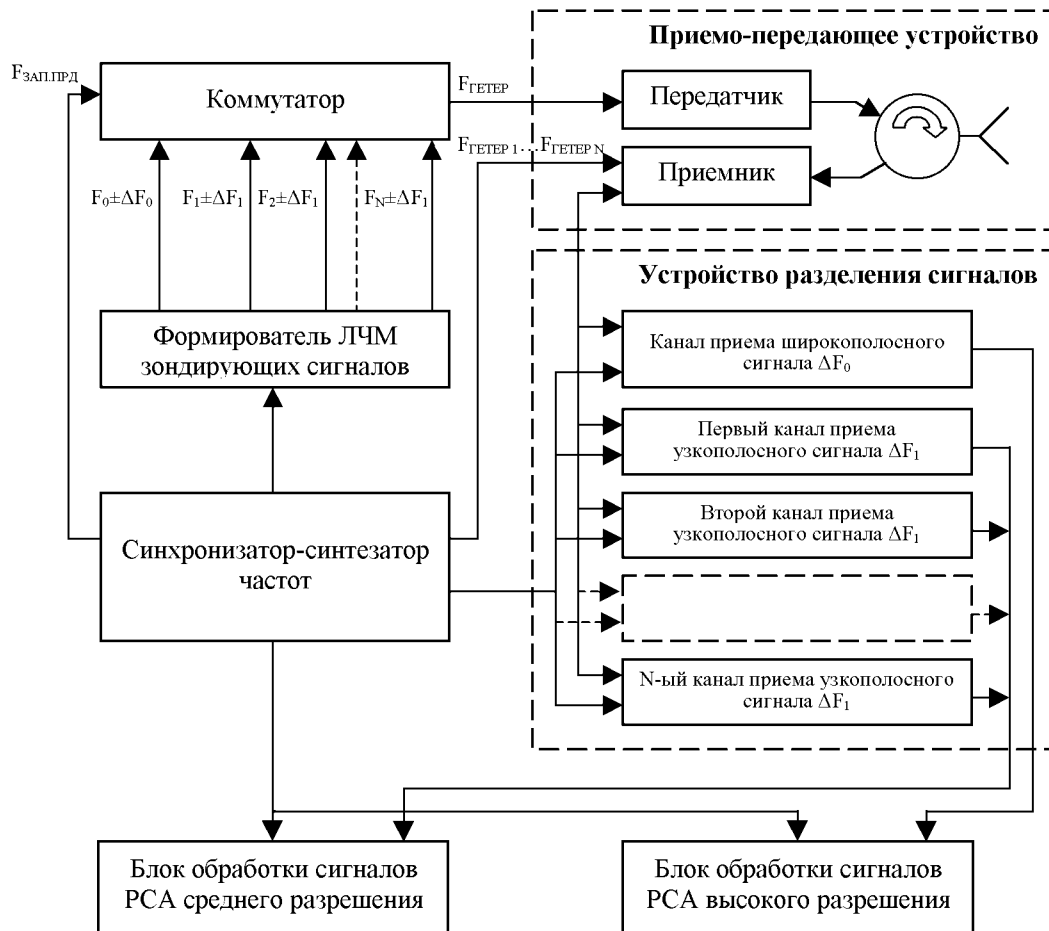


Рис. 1. Увеличенная структурная схема двухрежимного РСА

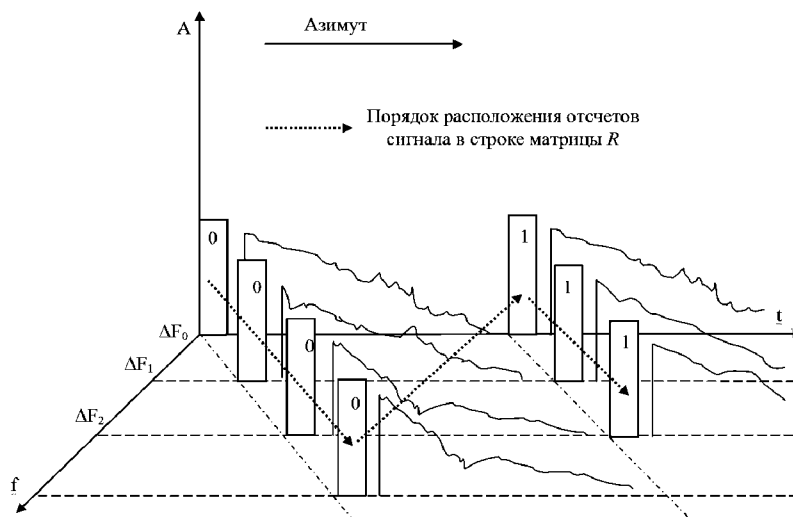


Рис. 2. Порядок расположения отсчетов сигналов в плоскости задержка — частота

связанных с особенностями построения этих систем. Так, максимальная полоса обзора РСА ограничена выбором минимально возможной частоты повторений ($f_{p, \min}$) зондирующих сигналов. Величина минимальной частоты повторений определяется из требований к описанию доплеровского спектра траекторного сигнала как

$$f_{p, \min} \geq 2v/d, \quad (1)$$

где v — скорость движения носителя РСА, d — размер апертуры антенны в азимутальной плоскости. В то же время потенциальное разрешение РСА в азимутальной плоскости составляет $L_a = d/2$. В свою очередь, для однозначного разделения сигналов по дальности (в угломестной плоскости) частота повторений ($f_{p, \max}$) зондирующих сигналов должна удовлетворять соотношению

$$f_{p, \max} \leq 1/[2\tau_u + 2\Delta R/c], \quad (2)$$

где ΔR — полоса обзора, τ_u — длительность зондирующего импульса, c — скорость света.

Для однозначного описания траекторного сигнала по дальности предлагается формировать пачку из n радиоимпульсов с разными (но достаточно близкими) несущими частотами. При этом частота повторения импульсов в пачке определяется соотношением (1), а частота следования пачек — соотношением (2). Для однозначного разделения сигналов в угломестной плоскости проводится фильтрация траекторного сигнала в частотной области и пространственная селекция по дальности. Процедура синтеза в азимутальной плоскости проводится с учетом изменения несущей частоты зондирующих импульсов в пределах последовательности. Укрупненная структурная схема двухрежимного РСА показана на рис. 1.

При реализации двухрежимной системы целесообразно использовать общие широкополосные (порядка 100 МГц) узлы приема-передатчика, а переключения режимов фактически сводится к изменению режимов в формирователе зондирующих радиосигналов и режимов работы антенны. Характерная полоса канала для обзорного режима 1–2 МГц, количество каналов 5–10 при полосе обзора порядка 500–600 км.

Синтезирование антенны в азимутальной плоскости в блоке обработки сигналов РСА высокого разрешения осуществляется методом свертки опорной функции и траекторного сигнала по известному алгоритму [1]. Полоса захвата 500–600 км обеспечивается перенацеливанием антенной системы.

В блоке обработки сигналов РСА среднего разрешения отсчеты сигналов каждого узкополосного частотного канала предварительно сжимают по дальности при помощи линий задержки, оцифровывают и записывают в ячейки памяти на сдвиговых

регистрах, откуда они поступают через коммутатор в блок памяти, где формируется матрица отсчетов сигналов взятых с выходов каждого частотного канала для последующего синтезирования и формирования радиолокационного изображения подстилающей поверхности. Порядок расположения отсчетов сигналов в плоскости задержка-частота при формировании матрицы сигналов показан на рис. 2. Результирующая матрица \mathbf{R} , элементы которой есть отсчеты траекторного сигнала, взятые в соответствии с теоремой Котельникова из каждого узкополосного канала и расположенные вдоль азимутальных строк следующим образом:

$$\mathbf{R}^0 = \begin{pmatrix} r_{1,1}^0 & r_{1,2}^0 & \dots & r_{1,m}^0 \\ r_{2,1}^0 & r_{2,2}^0 & \dots & r_{2,m}^0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p,1}^0 & r_{p,2}^0 & \dots & r_{p,m}^0 \end{pmatrix}, \dots,$$

$$\mathbf{R}^n = \begin{pmatrix} r_{1,1}^n & r_{1,2}^n & \dots & r_{1,m}^n \\ r_{2,1}^n & r_{2,2}^n & \dots & r_{2,m}^n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{p,1}^n & r_{p,2}^n & \dots & r_{p,m}^n \end{pmatrix}.$$

Здесь верхний индекс — номер отсчета в выбранном узкополосном канале по дальности, нижний двойной индекс — номер импульса в выбранном узкополосном канале и номер узкополосного частотного канала.

Таким образом, матрица \mathbf{R} имеет размер $m \cdot p \cdot n$, где m — число отсчетов сигнала по дальности; p — число импульсов одного частотного канала, которые используются для синтезирования текущей азимутальной строки (или число импульсов, укладываемых на интервале синтезирования $L_{\text{синт}}$); n — число частотных каналов блока обработки.

Синтезирование апертуры антенны в k -й строке дальности теперь может выполняться путем свертки k -й строки матрицы \mathbf{R} с соответствующей опорной функцией, то есть

$$\mathbf{S}_i^k = \mathbf{R}^k \otimes \mathbf{H}^k = \sum_{j=0}^{(n-1)p} R_{k,j+i} h_{k,j},$$

$$i = 0, 1, \dots, (n-1)p,$$

где $h_{k,j}$ — элементы весовой функции, k — номер строки по дальности.

Таким образом, благодаря многоканальной структуре приемного устройства с частотной окраской каждого излученного импульса оказывается возможным одновременное выполнение условий (1) и (2) для заданных ΔR и V/d . Ограничения на количество дополнительных узкополосных каналов и ширина частотной полосы каждого канала определяются требуемым разрешением и заданной шириной полосы обзора.

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горяинова. — М.: Радио и связь, 1988.—304 с.
2. Калмыков А. И., Синецын Ю. А., Сытник О. В., Цымбал В. Н. Информативность радиолокационных систем зондирования Земли из космоса // Изв. вузов. Радиофизика.— 1989.—32, № 9.—С. 1055—1062.
3. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова. — Л.: Гидрометеиздат, 1990.—200 с.

SURVEYING RADAR SYSTEM FOR THE REMOTE SENSING OF THE EARTH WITH ENHANCED AZIMUTHAL RESOLUTION

*V. B. Efimov, A. S. Kurekin, O. V. Sytnik,
V. N. Tsybal, A. S. Gavrilenko, A. V. Kabanov*

The system is offered for the remote sensing of the Earth on the basis of the pulse coherent radar operating in two modes, surveying and

of high resolution. In the surveying mode the radar has an azimuthal resolution 50—100 m and swath about 500—600 km at a height of orbit from 650 to 750 km. In the mode of high resolution the radar works on the SAR principle and has a potential resolution 2—5 m in swath 10—15 km in any part of general swath of 500 to 600 km. SAR radiates the sequence of packs of pulses with bearing frequency changing from one impulse to the other. Thus, pulse repetition frequency in a pack is chosen to describe the displacement of trajectory signal Doppler frequency, but the frequency of packs is chosen low enough to exclude an ambiguity on distance. The frequency selection of impulses within the limits of one pack is carried out in the wideband of intermediate frequency with the general width of band about 100 MHz. The signal processing block is built on a multichannel scheme. The amount of channels of the block is determined by the number of frequency changes into the pack of impulses. The frequency-temporal selection of the signals reflected from the surface and compression of impulses for providing high range resolution are carried out in every channel separately. The features of construction of multichannel structure of SAR receiving device and algorithm of the trajectory signal processing are examined. The limitations on the amount of additional narrowband channels and width of frequency band of every channel is the subject of wide discussion.

УДК 621.396:621.391.82

**О. В. Сытник¹, В. Б. Ефимов²,
В. Н. Цымбал², А. В. Кабанов²**

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков
ssvp11@ire.kharkov.ua

²Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН и НКА Украины, Харьков
kalmykov@ire.kharkov.ua

Динамическая адаптивная коррекция радиолокационных изображений

Представлено 25.06.07

Розглядаються задачі побудови адаптивних алгоритмів синтезу радіолокаційних зображень поверхневих шарів місцевості по сигналам когерентного бортового радіолокатора. Запропонований алгоритм належить до класу адаптивних алгоритмів, які вилучають інформацію о траєкторних похибках безпосередньо з відбитого від поверхневого шару землі радіолокаційного сигналу. Як інформаційні параметри використовується математичне очікування оцінки зсуву доплерівського спектру на інтервалі синтезування, а також її вищі похідні. Це забезпечує можливість автоматичного корегування зображень, що обумовлені не тільки похибками по швидкості польоту носія, а також дозволяють урахувати похибки прискорення та швидкості прискорення при формуванні радіолокаційних зображень. У роботі наведені результати обробки сигналів бортового РСА. Обговорюються особливості роботи алгоритму у різних умовах.

Отклонения от заданной траектории полета носителя радиолокатора с синтезированием апертуры антенны (РСА) [3, 5], которые не учтены в алгоритме обработки сигнала в виде соответствующих кор-

ректирующих функций, приводят к искажениям результирующего радиолокационного изображения. В частности это расфокусировка, смещение объектов относительно их истинного положения, потеря

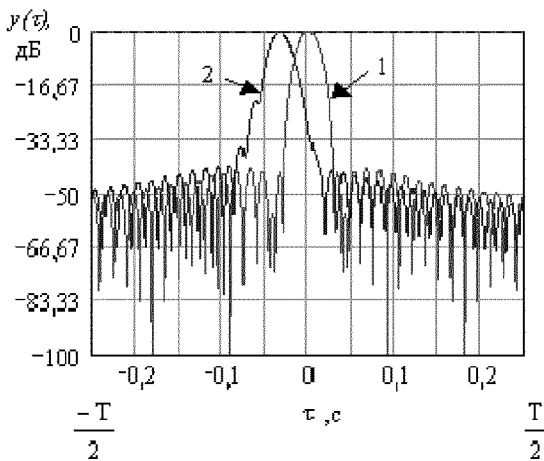


Рис. 1. Искажения синтезированной диаграммы направленности антенны РСА

яркости изображения, увеличение боковых лепестков синтезированной диаграммы направленности (ДН) и ряд других искажений [1, 4, 6, 7].

Создание радиолокационной аппаратуры, инвариантной к типу и характеристикам бортовых навигационных средств, и одновременно обеспечивающей автоматическую коррекцию радиолокационных изображений, возможно благодаря извлечению информации о траекторных ошибках непосредственно из отраженного сигнала.

В общем виде алгоритм формирования синтезированной апертуры в азимутальном направлении для фиксированной дальности можно представить в виде интеграла свертки [3]:

$$y(\tau) = \text{mod} \left\{ \int_{-T_c/2}^{T_c/2} \dot{x}(t - \tau) \dot{h}(t) dt \right\}, \quad (1)$$

где $\text{mod}\{\cdot\}$ — операция вычисления модуля, T_c — интервал времени, в течение которого выполняется синтезирование апертуры антенны, $\dot{x}(t - \tau) = \dot{s}(t - \tau) + \dot{h}(t)$ — аддитивная смесь отраженного от подстилающей поверхности сигнала $\dot{s}(t - \tau) = A(t - \tau) e^{-j14\pi r_i(t)/\lambda}$, A — амплитуда отраженного сигнала, $r_i(t)$ — текущее значение наклонной дальности от фазового центра передающей антенны до i -го точечного отражателя, λ — длина волны зондирующих колебаний (без потери общности множитель $\omega_0 t$ в этом выражении опущен) и некогерентного гауссовского шума $\dot{h}(t)$ с дисперсией σ^2 и нулевым математическим ожиданием; $\dot{h}(t) = H(t) e^{j[2\pi v t^2 / (2\lambda r_0)]}$ — опорная функция, где $H(t) \equiv 1$, v — путевая скорость движения носителя РСА.

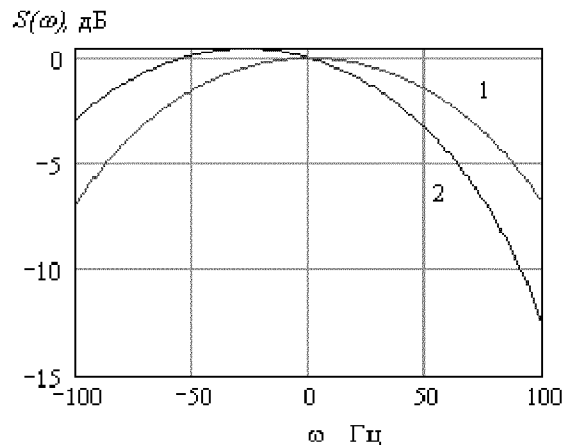


Рис. 2. Идеализированная форма диаграммы направленности антенны РСА огибающей спектра доплеровских частот

В результате работы алгоритма (1) при отсутствии траекторных ошибок формируется ДН эквивалентной антенны, показанная на рис. 1 (кривая 1). Кривая 2 иллюстрирует характер искажений, возникающих при нестационарном движении летательного аппарата. Характер изменения траекторного сигнала на интервале синтеза T_c при облучении бортовым доплером точечной цели подчиняется закону линейного частотно-модулированного колебания с круговой частотой $\omega = 4\pi v(t)/(\lambda r_0)$. При $v(t) = \text{const}$ закон изменения частоты сигнала в пределах главного лепестка реальной ДН есть линейная функция, а огибающая его спектра — симметрична относительно центрального элемента массива отсчетов траекторного сигнала и монотонно убывает с увеличением частоты (как показано на рис. 2, кривая 1). Ошибки в определении параметров движения носителя РСА приводят к искажениям формы спектральной плотности, в частности к ее асимметрии относительно середины распределения (кривая 2, рис. 2). Поэтому кажется перспективным использование отличия формы реального спектра сигнала от идеального путем введения соответствующих корректирующих составляющих в опорную функцию алгоритма синтеза (1).

Амплитудный спектр доплеровских частот реального сигнала, отраженного от различных по масштабу и радиофизическим свойствам элементов подстилающей поверхности, носит флуктуационный характер, и его непосредственное использование для построения корректирующей опорной функции затруднительно. На рис. 3 показан усредненный по 128 соседним стробам наклонной дальности спектр траекторного сигнала на участке траекто-

рии, где летательный аппарат совершал маневр.

Из-за значительной дисперсии отсчетов огибающей спектра построить формализованную процедуру вычисления достоверных оценок величин смещения и коэффициентов асимметрии для получения корректирующих составляющих опорной функции затруднительно. Однако, если полученные из реальной последовательности спектральные отсчеты аппроксимировать известной функцией, например полиномом, то процедура вычисления корректирующих коэффициентов опорной функции легко

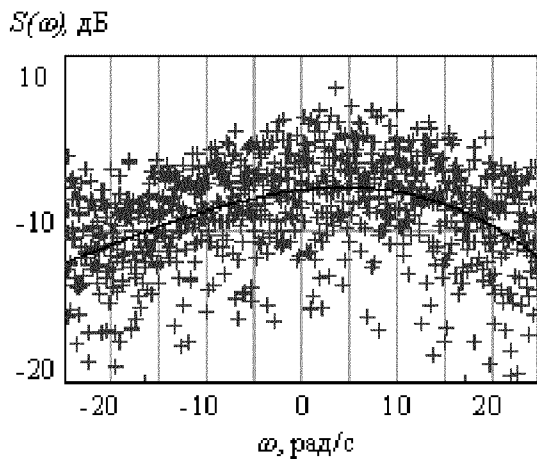


Рис. 3. Спектр траекторного сигнала

формализуется. Здесь крестиками показаны спектральные отсчеты траекторного сигнала, а сплошной линией — его полиномиальная аппроксимация полиномом третьей степени с коэффициентами 24.469, 0.024, $1.656 \cdot 10^{-5}$, $-4.507 \cdot 10^{-8}$.

Среднее квадратичное значение ошибки σ_p аппроксимации не превышало 0.248. Фазовые ошибки, связанные с неадекватным представлением закона изменения путевой скорости, можно представить в упрощенном виде:

$$\varphi_v(t) = -\frac{4\pi}{\lambda} \left[\Delta v t + \frac{1}{2} a t^2 + \frac{1}{6} a' t^3 \right], \quad (2)$$

где Δv , a , a' — ошибки измерения путевой скорости, ускорения и производной от ускорения соответственно.

Корректирующие фазу опорной функции (1) коэффициенты Δv , a , a' найдем из сравнения кривых 1 и 2 рис. 2. В качестве кривой 2 необходимо использовать модель аппроксимирующей функции, показанной на рис. 3. Ошибку Δv определения путевой скорости вычислим путем отыскания смещения экстремума кривой 2 по отношению к эталонной кривой 1. Формализовать эту процедуру можно при помощи метода сопряженных градиентов [2]. Обозначим смещенную спектральную плотность как $S_2(\omega)$. Тогда значение аргумента $\omega = \omega^*$, соответствующее экстремуму ω^* , находится путем итерирования:

$$\omega^{k+1} = \omega^k - \alpha_k \nabla S_2(\omega^k) + \beta_k (\omega^k - \omega^{k-1}), \quad (3)$$

а

б

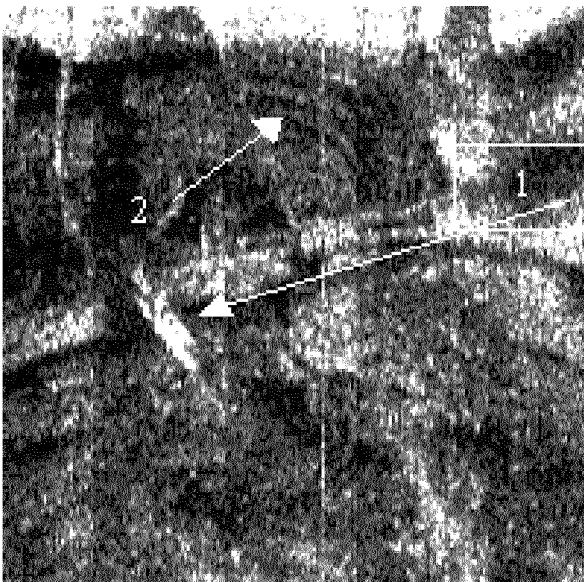


Рис. 4. Радиоизображение местности: а — при маневре летательного аппарата, б — при адаптивной компенсации траекторных ошибок

где оптимальные значения коэффициентов α_k , β_k на каждом шаге вычисляются из условия

$$\{\alpha_k, \beta_k\} = \underset{\{\alpha_k, \beta_k\}}{\operatorname{argmin}} [S[\omega^k - \alpha_k \nabla S_2(\omega^k) + \beta_k(\omega^k - \omega^{k-1})]].$$

Для упрощения вычислительной процедуры коэффициенты α_k , β_k можно выбирать в пределах $0 < \alpha \leq 1$, $0 \leq \beta < 1$. Тогда метод сопряженных градиентов (3) сводится к методу тяжелого шарика [2].

Эффект от применения адаптивной коррекции изображения, которое получено при синтезировании из голограммы самолетного радиолокатора дециметрового диапазона ($\lambda = 0.23$ м), виден при сравнении рис. 4, а и б. Здесь азимутальное направление показано сверху вниз, а направление по наклонной дальности — слева направо. Разрешение по наклонной дальности составляло 22.5 м, а по азимуту — примерно 10 м. В частности, в результате применения адаптивной коррекции радиоизображения повтор объекта 1 на рисунках отсутствует. Периодическая структура, отмеченная цифрой 2 на обоих рисунках, осталась практически без изменения. При вычислении корректирующих коэффициентов использовалась спектральная оценка, показанная на рис. 3. Кроме визуальной оценки синтезированных изображений подстилающей поверхности, в качестве оперативного критерия можно использовать сравнительный анализ радиолокационных контрастов вдоль строки записи сигнала на протяжении всего сеанса работы.

Таким образом, исходная когерентная запись траекторного сигнала подвергается предварительному фурье-анализу, и одновременно отсчеты траекторного сигнала сохраняются в элементах памяти. Затем с целью снижения дисперсии флуктуационной составляющей сигнала выполняется усреднение по нескольким соседним строкам дальности. Полученную таким образом спектральную оценку подвергают полиномиальной аппроксимации, и результирующий полином исследуют на экстремум при помощи рекуррентной двухшаговой процедуры. В зависимости от степени полинома, заранее заложенной в модель, алгоритм способен вычислять корректирующие коэффициенты Δv , a , a' опорной

функции. Выбор двухшаговой рекуррентной процедуры обусловлен необходимостью компромисса между скоростью сходимости и объемом вычислений, приходящихся на одну итерацию.

1. Ицхоки Я. С., Сазонов Н. А., Толстов Е. Ф. Основные характеристики РСА при произвольном движении летательного аппарата // Радиотехника и электроника.— 1984.—29, № 11.—С. 2164—2172.
2. Поляк Б. Т. Введение в оптимизацию. — М.: Наука, 1983.—384 с.
3. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / Под ред. В. Т. Горяинова. — М.: Радио и связь, 1988—304 с.
4. Сытник О. В., Кабанов А. В., Ефимов В. Б. и др. Критерий качества радиолокационного изображения когерентных систем дистанционного зондирования // Космічна наука і технологія.—2002.—8, № 2/3.—С. 287—288.
5. Томиясу К. Радиолокационные станции с синтезированием апертуры и их применение для отображения поверхности океана // Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектронике.—1978.—66, № 5.—С. 40—67.
6. Hounam D. Motion errors and compensation possibilities // AGARD Lecture Series 182. Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar (SAR).—1992.—P. 31—42.
7. Moreira J. A. A new method of aircraft motion error extraction from radar raw data for real time SAR motion compensation // Proc., IGARSS Symposium, Vancouver, Canada. — 1999.—P. 1—7.

DYNAMIC ADAPTIVE CORRECTION OF RADAR-TRACKING IMAGES

O. V. Sytnik, V. B. Efimov, V. N. Tsybal, A. V. Kabanov

We consider the problems of construction of adaptive algorithms for synthesizing radar-tracking images of spreading surface on the basis of signals of a coherent onboard radar. The offered algorithm belongs to the type of self-adapting algorithms in which the information on trajectory mistakes is taken directly from the reflected signal. As the information parameters, we use the estimation of displacement of a Doppler spectrum on the interval of synthesizing which is averaged on inclined range together with its supreme derivatives. This provides the possibility of automatic correction of the images caused not only by mistakes in speed of flight of the carrier, mistakes in the acceleration and speed of acceleration change. The results of synthetic aperture radar signals are given. Some features of the algorithm operation in various conditions are discussed.

Г. В. Нестеренко, Д. А. Шелковенков, Е. А. Иванова, Е. Ю. Бондарь

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

61166, Харьков, пр. Ленина, 14, кафедра ОРТ; тел.+38 (057) 700-22-84

E-mail: secort@kture.kharkov.ua

О возможности обеспечения автономной высокоточной синхронизации шкал времен (частоты) разнесенных хранителей по сигналам внешних источников

Представлено 25.06.07

При реализации процедуры обеспечения работы телекоммуникационных сетей необходима высокоточная синхронизация хранителей [3]. Задачи синхронизации шкал частоты и шкал времени различаются между собой и по сложности, и по методам, причем синхронизация (сличение) шкал времени, как правило, сложнее в реализации, чем синхронизация шкал частоты. Зачастую для ряда технических приложений решение задачи синхронизации шкал частоты оказывается достаточным.

Современный парк технических средств хранения и сличения/синхронизации весьма обширен. Используются различные хранители, каналы, сигналы, аппаратура, принципы, методы [1]. Запросы и требования потребителей также разнообразны, и иногда — весьма специфичны. Например, существует постановка задачи: создание сети синхронизированных хранителей в условиях полной автономности, т. е. независимости от использования в «своих» каналах «чужих» технических средств, способных проявить сбой или выключения (в особенности — преднамеренные). Известны случаи смещения навигационного поля и спутниковых шкал времени в критических ситуациях. Автономизация не всегда обеспечивается по совокупному критерию реализуемости и применимости метода. Из числа каналов и средств высокоточного сличения автономными являются радиометеорный канал (РМК) и комплекс перевозимых квантовых часов (ПКЧ). Недостаток РМК — необходимость излучения в эфир. Недостаток ПКЧ — высокая стоимость и очень низкая оперативность. Использование сигнала космических источников (пульсаров) требует использования дорогостоящей аппаратуры и длительных интервалов измерения.

Рассмотрим вариант построения автономной системы синхронизации шкал частоты, использующей сигналы вещания со спутников, расположенных на

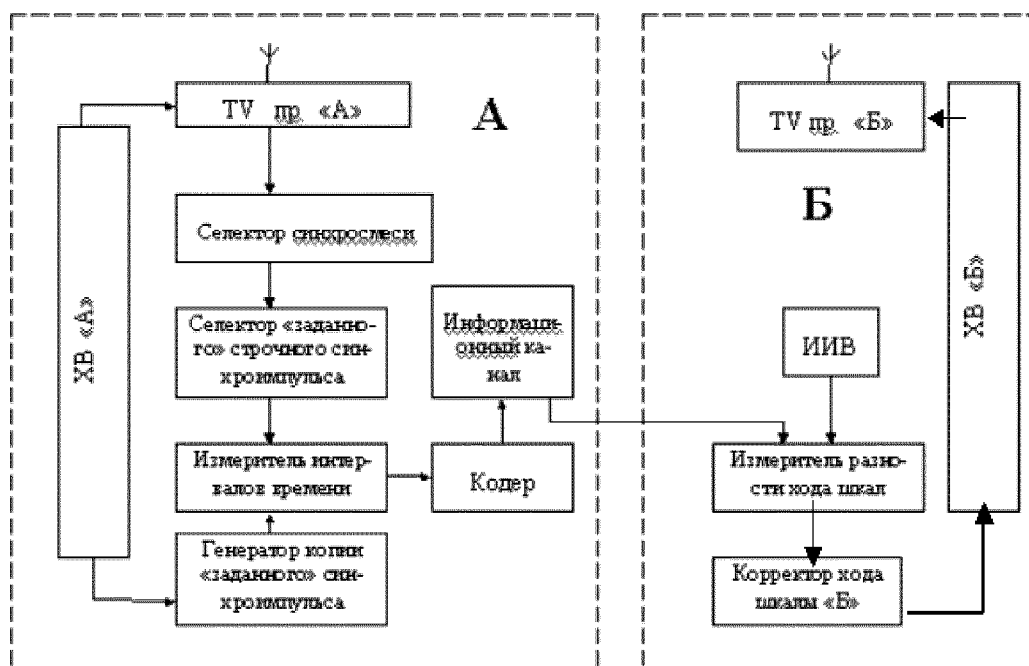
геостационарных орбитах.

Автономность такой системы, несмотря на кажущуюся зависимость от параметров состояния используемых спутниковых ретрансляторов, состоит в том, что эти спутники не являются стратегическими объектами; их количество — велико; большая часть вещательных каналов открыты для всеобщего пользования. Поэтому живучесть и надежность такой автономной системы синхронизации, использующей их сигналы, высоки. В ней используется метод «одного общего внешнего события». Потенциальная погрешность этого метода определяется разностью хода сличаемых хранителей частоты/времени на интервале разности задержек распространения между пунктами А, Б независимо от значения относительной нестабильности хранителей на борту спутника.

Предположим, что в некоторый момент времени на спутнике происходит событие $\delta(t_0)$ — излучается локализованный на известном интервале времени фрагмент сигнала (например, синхросмесь кадра). Этот сигнал формируется на борту спутника и его характеристики стабильности определяются стабильностью бортового хранителя. Обычно для ТВ вещания она имеет порядок 10^{-6} . Время распространения сигнала от спутника в пункты А, Б неизвестно. Расстояние между пунктами хранения шкал А, Б — также неизвестно.

Задача: используя только сигналы спутникового телевидения, произвести синхронизацию шкал частоты хранителей в пунктах.

Событие $\delta(t_0)$ воспринимается в пункте А с задержкой $T_A = D_A/c$, где D_A — наклонная дальность до спутника в пункте А, c — скорость света. Событие $\delta(t_0)$ в пункте Б будет зафиксировано на $\Delta T = (D_B - D_A)/c$ позже. Разность задержек моментов фиксации события в пунктах максимальна для



Вариант системы синхронизации шкал частоты

случая, когда пункт А «видит» спутник в зените, а пункт Б — на горизонте. Для геостационарного спутника (ГСС) она не превосходит величины R_3/c , где R_3 — радиус Земли, т. е. $20 \cdot 10^{-3}$ с. Если считать, что часы в пунктах имеют порядок неустойчивости 10^{-9} , а их взаимный ход — максимален, то при корректном измерении параметра задержки события $\delta(t_0)$ в пунктах при высоких соотношениях «сигнал/шум» оценка сверху погрешности такого метода имеет порядок 10^{-12} .

Предлагается такой вариант системы синхронизации шкал частоты по предлагаемому методу (рисунок). В пунктах синхронизации устанавливается аппаратура для приема телевизионных сигналов одной и той же программы одного и того же спутника, выделяется заранее оговоренное событие и измеряется интервал времени между ним и собственной шкалой времени. Измеренное значение периодически передается из ведущего (пункт А) в ведомые пункты по какому-либо информационному каналу. В них проводятся измерения задержек между моментами приема оговоренных событий и характерными точками собственных шкал времени. Располагая информацией о значении этой задержки в ведущем пункте, легко произвести коррекцию хода собственной шкалы по критерию минимума разности хода ведомой и ведущей шкал.

При наличии в спектре телевизионных сигналов остатка несущей возможна реализация предложен-

ного метода путем компарирования частот принятого со спутника и сформированного из собственной шкалы сигналов с последующей передачей информации о разности их значений в ведомые пункты для последующей коррекции хода их шкал.

Односторонняя трансляция измерительной информации из ведущего в ведомые пункты обеспечивает возможность синхронизации по частоте, а взаимный обмен информацией о моментах фиксации событий в пунктах позволяет производить сличения шкал времени.

1. Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Б. Л. Кашеева, М. Ф. Лагутина, Е. Г. Прошкина. — Харьков: Бизнес информ, 2002. — С. 219—305.
2. Коваль Ю. А., Антипов И. Е., Бавыкина В. В. и др. Прием телевизионных сигналов времени и частоты по метеорному радиоканалу // Радиотехника. — 2001. — Вып. 117. — С. 42—45.
3. Коваль Ю. А., Антипов И. Е., Крючкова Л. П. и др. Радиометеорный метод синхронизации в сетях электросвязи // Сб. науч. тр. НГА Украины. — 2001. — 2, № 11. — С. 53—57.

ON THE POSSIBILITY OF PROVISION OF AUTONOMOUS HIGH-ACCURACY SYNCHRONIZATION OF TIME SCALES (FREQUENCY) OF SPACE-APART KEEPERS ON THE BASIS OF EXTERNAL SOURCE SIGNALS

G. V. Nesterenko, D. A. Shelkovenkov, E. A. Ivanova, E. Yu. Bondar