

УДК 528.8.04

Автоматическая радиолокационная дистанционная внутренняя калибровка систем зондирования

С. Е. Яцевич², А. С. Курекин¹, В. Н. Уваров², А. С. Левда¹

¹Центр радіофізичного зондування Землі НАН і НКА України, Харків

²Інститут радіофізики і електроніки НАН України, Харків

Надійшла до редакції 20.03.98

Розглядаються питання автоматичної внутрішньої калибровки бортових радіолокаторів бокового огляду дистанційного зондування поверхні Землі типу «Космос-1500», «Січ-1», літакових систем — «Аналог» та МАРС. Приводяться оцінки похибок вимірювань кількісних значень питомої ефективної площі розсіяння зондованих поверхонь та результати радіолокаційної зйомки тестових полігонів.

В настоящее время важное значение в народном хозяйстве Украины приобретают дистанционные методы исследования Земли, направленные на решение природоохранных, гидрологических, мелиоративных, сельскохозяйственных, гляциологических и др. задач.

Наибольшее количество исследований проведено в оптическом и ИК-диапазонах, однако в последнее время широкое распространение получили радиолокационные системы (РЛС), среди которых значительное место занимают радиолокаторы бокового обзора (РБО) как космического, так и самолетного базирования [1, 3, 6].

Такие системы обладают рядом преимуществ [2], практическая реализация которых в значительной мере связана с необходимостью определения абсолютных значений характеристик рассеяния зондируемых поверхностей. Так, для решения многих задач достаточно знать абсолютную величину удельной эффективной площади рассеяния ω_0 (УЭПР). Для ее измерения необходима абсолютная калибровка РЛС, которая должна учитывать аппаратные нестабильности и влияние тропосферы на условия распространения радиоволн.

В настоящее время применяются два вида калибровки радиолокационных систем аэрокосмического базирования — внешняя и внутренняя. Внешняя калибровка проводится с использованием как пассивных (уголковые отражатели, линзы Люнеберга, плоские пластины и др.), так и активных отражателей (источников электромагнитного излучения). Кроме того, для проведения калибровки РБО нашли применение тестовые полигоны со стабильными во времени электродинамическими характеристиками (тропические леса, пустыни, широколиственные опадающие леса, тундра) [8].

При внутренней калибровке применяются, как правило, специальные калибраторы, подключаемые к радиолокатору или встроены в его тракт. К первым можно отнести, например, измерители мощности и генераторы стандартных сигналов, контролирующие уровень излучения передатчика и чувствительность приемного устройства. Ко вторым относятся калибраторы, позволяющие определять потенциал радиолокатора непосредственно в процессе его работы.

Существенным ограничением при использовании внешней калибровки является необходимость регу-

лярных пролетов носителя над тестовыми полигонами, что приводит к определенным сложностям при работе с системой.

В данной статье основное внимание уделено внутреннему контролю энергетического потенциала радиолокационных систем аэрокосмического базирования, автоматическому учету его изменения, алгоритмам получения абсолютных значений УЭПР, основанных на таком контроле.

ВНУТРЕННЯЯ КАЛИБРОВКА АЭРОКОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Известно, что УЭПР рассеивающей поверхности определяется (пренебрегая влиянием атмосферы и потерями в системе) как:

$$\sigma^0 = \frac{(4\pi)^3 R^4 \rho_{пр}}{\lambda^2 \rho_{пер} G^2 S^0}, \tag{1}$$

где $\rho_{пр}$ — мощность принятого сигнала, $\rho_{пер}$ — мощность излучения передатчика в импульсе, G — коэффициент усиления антенны, R — наклонная дальность до участка поверхности, λ — длина волны, S^0 — проекция импульсного объема на поверхность.

Используя (1) и один из методов калибровки, можно получить абсолютные значения σ^0 .

В радиолокационных системах космического базирования типа «Космос-1500», «Океан», «Сіс-1», авиационных системах «Аналог», многоцелевой авиационной радиолокационной системе (МАРС) нами использован метод автоматической внутренней калибровки потенциала, который исключает необходимость постоянного контроля мощности излучения и измерения мощности принятого сигнала и чувствительности приемника.

Достигалась такая калибровка путем подачи ослабленного на известную величину и задержанного во времени СВЧ-импульса передатчика на вход приемного тракта. Задержка, необходимая для разделения видеоимпульса модулятора и СВЧ-импульса излучения, обеспечивалась акустической линией, выполненной на алюмоиттриевом гранате, имеющей потери задержки 8 мкс.

Мощность калибровочного импульса на входе приемника равна

$$\rho_k = \frac{\rho_{пер}}{\gamma}, \tag{2}$$

где γ — сумарное ослабление задержанного (калибровочного) импульса передатчика, подаваемого на вход приемника.

Тогда из (1) и (2) при равенстве мощностей принятого и калибровочного сигналов (или равен-

стве их амплитуд на выходе системы обработки сигналов)

$$\sigma^0 = \frac{C}{\gamma}, \tag{3}$$

где

$$C = \frac{(4\pi)^3 R^4}{G^2 \lambda^2 \gamma},$$

— функция, зависящая от угла наблюдения (дальности) и определяемая расчетным путем.

Как правило, в процессе работы аэрокосмических радиолокационных систем бокового обзора возникает необходимость управления коэффициентом усиления приемного тракта и системы обработки. Это связано, во-первых, с различной отражательной способностью подстилающих поверхностей (УЭПР может изменяться от -30 дБ для морской поверхности до +10 дБ для построек), а во-вторых — с наличием угловой зависимости УЭПР и изменением коэффициента усиления антенны в полосе обзора РБО. В этой связи соответствие уровня сигнала и динамического диапазона приемника устанавливается путем изменения общего коэффициента усиления приемника, а выравнивание яркости радиолокационного изображения (РЛИ) по дальности (строке) производится применением временной автоматической регулировки (ВАРУ) коэффициента усиления. При этом, если изменение общего коэффициента усиления при расчете УЭПР в соответствии с (2) не требует учета, то зависимость его от дальности необходимо фиксировать и вводить в расчет соответствующим образом. Структуру блока калибровки см. на рис. 1.

Задержанный импульс передатчика, пройдя все цепи приемника, блока обработки и линии передачи информации регистрируется совместно с радиолокационным изображением зондируемой поверхности в одних и тех же отсчетных единицах. После этого ко входу приемника через направленный

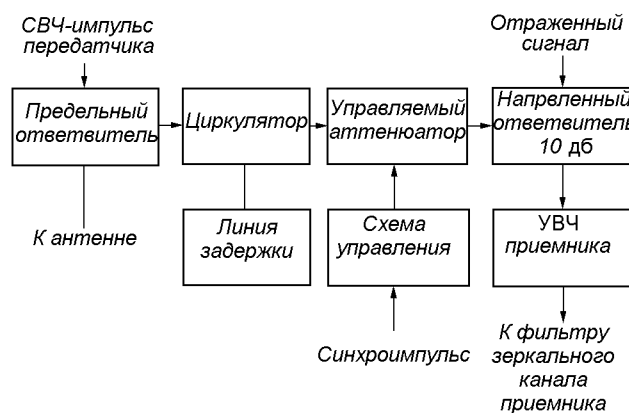


Рис. 1. Структурная схема тракта калибровки РБО

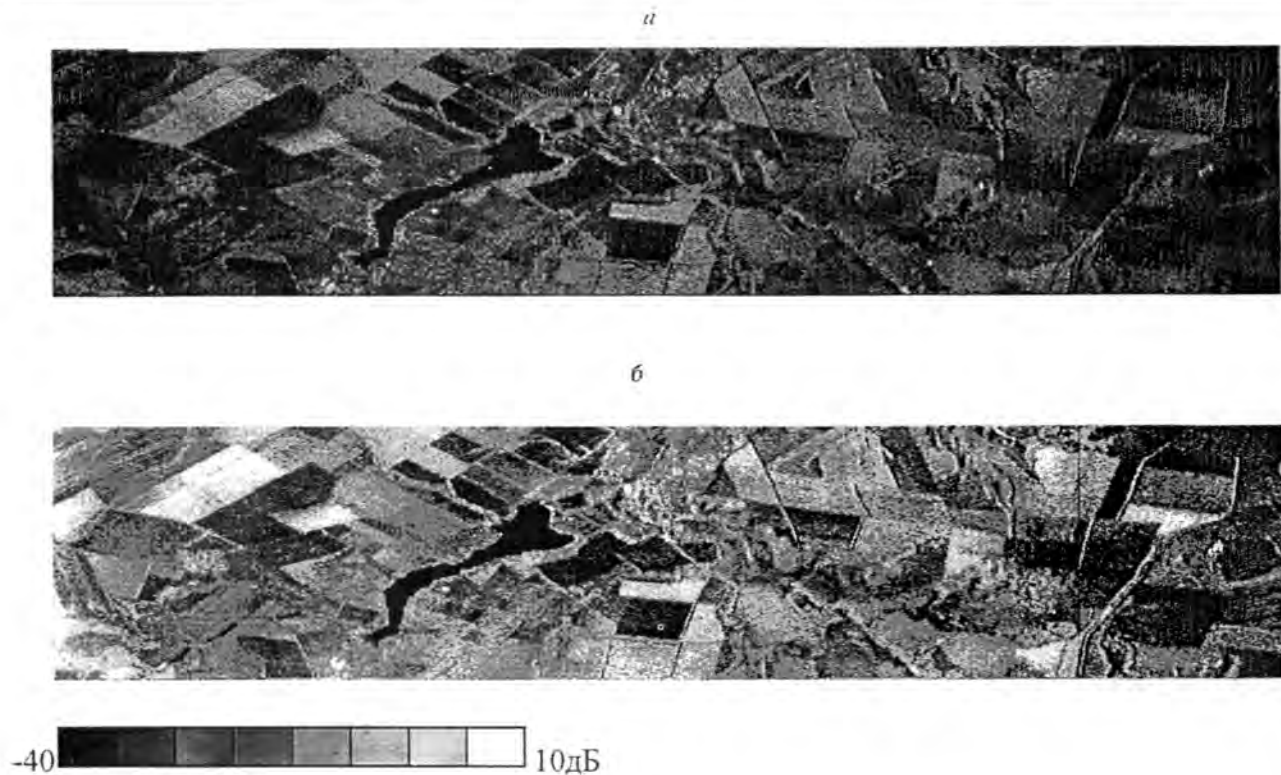


Рис. 2. Необработанное (а) и обработанное (б) РЛ-изображения РБО-3

ответитель подключается генератор стандартных сигналов, на котором оператор устанавливает уровень сигнала, по амплитуде равный уровню калибровочного импульса. Вследствие наличия ВАРУ, регистратор фиксирует сигнал в виде опорной калибровочной кривой, повторяющей закон изменения коэффициента усиления по дальности.

Значения УЭПР зондируемой поверхности, уровни отражений от которой будут на соответствующих дальностях совпадать по амплитуде с амплитудой калибровочной кривой, рассчитываются в соответствии с (2).

В общем случае (при любой амплитуде отраженного сигнала) для расчета УЭПР при сравнении амплитуд используется семейство калибровочных кривых, получаемых в пределах динамического диапазона приемника. Кривые записываются путем ступенчатого изменения ослабления опорного калибровочного уровня генератора. Значение ослабления относительно опорного уровня учитывается при определении УЭПР в соответствии с (2) путем изменения величины γ .

Таким образом, точность определения абсолютных значений УЭПР зависит от точности расчета коэффициента C и точности измерения величины γ .

Ошибки измерения коэффициента усиления ан-

тенны, как правило, не превышают 0.5 дБ [7].

По нашим оценкам общая ошибка измерения значения коэффициента C составляет не более 0.5—1 дБ, а коэффициента γ — 0.5 дБ. Таким образом, суммарная погрешность измерения УЭПР поверхности при использовании метода внутренней калибровки составляет 1.5—2 дБ.

Для проверки этой цифры нами были использованы внешние эталонные отражатели с известной эффективной площадью рассеяния.

Для получения абсолютных значений УЭПР поверхности с высокой точностью в общем случае необходимо учитывать условия распространения на трассе летательный аппарат — Земля. В сантиметровом и миллиметровом диапазонах радиоволн можно использовать например результаты [4].

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ УЭПР ПРИ ВНУТРЕННЕЙ КАЛИБРОВКЕ РБО

Программный комплекс автоматического определения абсолютных значений УЭПР состоит из:

- программы вычисления калибровочных кривых и выбора опорной кривой;

— программы перевода значений исходного сигнала в значения УЭПР, приведенных к диапазону 256 уровней.

Первая программа осуществляет усреднение калибровочных сигналов, записанных в виде нескольких строк (10—30 строк), для устранения их флуктуаций, вызванных шумами приемника. Усреднение осуществляется путем медианной фильтрации скользящим окном. Размер окна выбран таким образом, чтобы, с одной стороны, минимизировать время счета, а с другой — обеспечить достаточную гладкость калибровочных кривых.

Программа переводит исходный файл калибровочных кривых в массив данных. Каждый массив содержит 64 отсчета по наклонной дальности. Из сформированных калибровочных кривых выбирается опорная, по уровню соответствующая уровню калибровочного сигнала. Результаты записываются

в файл в форме с плавающей точкой.

По запуску программы происходит запрос о числе калибровочных ступеней и числе строк в ступеньке, обработка файла и формирование калибровочного массива в виде чисел с плавающей точкой. Сформированные кривые выводятся на экран. Одна из этих кривых высвечивается в мигающем режиме для выбора оператором в качестве опорной. Оператор имеет возможность вызывать изменение выбираемой кривой для внесения коррекции систематической погрешности. После выбора опорной кривой программа осуществляет запись данных в файл с именем и заканчивает работу.

Программа калибровки РЛИ осуществляет перевод данных зарегистрированного сигнала в значения УЭПР путем сопоставления амплитуд сигнала с амплитудами калибровочных кривых и приводит его к диапазону 256 машинных уровней, что бес-

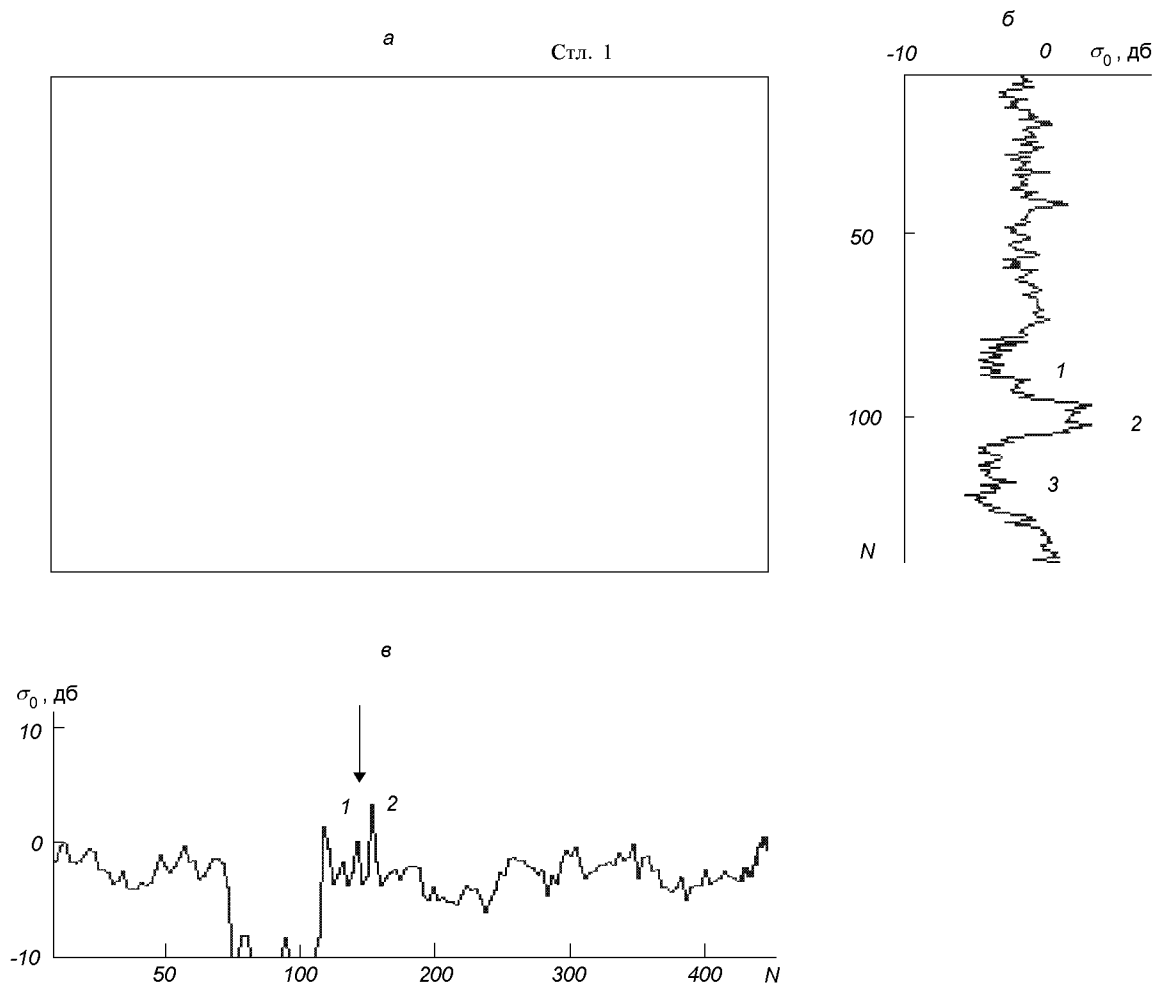


Рис. 3. Фрагмент радиолокационного изображения тестового полигона (а), строчные разрезы Стл. 1 (б), Стр. 1 (в)

печивает максимальную точность и формирует файл байтовых данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ УЭПР

Описанный выше алгоритм расчета УЭПР прошел апробацию в ЦРЗЗ НАНУ и НКАУ на материалах, полученных на тестовых полигонах с помощью радиолокационного комплекса МАРС, размещенного на самолете лаборатории ИЛ-18Д. В качестве основного калибровочного полигона использовались сельскохозяйственные поля в Харьковской области. Эталонными источниками переизлучения служили уголкового отражатели и активные ответчики с известными ЭПР, расставленные через 100 м. Ответчики устанавливались на боронованном поле без растительного покрова, что позволило уверенно их наблюдать на фоне подстилающей поверхности.

Измерения ЭПР-эталонов проводились под различными углами места путем дискретного смещением трассы полета через каждые 5 километров, что позволило внести окончательные коррективы в алгоритм определения УЭПР и уточнить форму диаграммы направленности антенн.

На рис. 2, а показано исходное радиолокационное изображение, полученное в реальных условиях радиолокатором бокового обзора 3-см диапазона. Здесь представлен водоем, леса, сельскохозяйственные угодья. Ниже представлены изображения тех же участков после работы программы расчета в виде поля УЭПР.

Заметное повышение качества изображения объясняется полным программным устранением всех искажений исходного РЛИ. Каждому пикселу изображения соответствует абсолютное значение УЭПР. При определении описанным методом ЭПР эталонных уголков, имеющих реальные значения $\sigma_1 = 30$ дБ/м² и $\sigma_2 = 27$ дБ/м², была получена точность измерений не хуже 0.5 дБ при хорошей повторяемости результатов во всем диапазоне углов наблюдения.

На рис. 3, а показан увеличенный фрагмент обработанного изображения (рис. 2, а), на котором представлены его строчные разрезы Стр. 1, Стл. 1 (рис. 3, б, в), приведенные к шкале абсолютных значений УЭПР. УЭПР вспаханных (1 и 3) и кукурузного (2) полей, согласуются с данными [5]. Стрелками обозначены также отклики от эталонных ответчиков 1 и 2, ЭПР которых нормирована на величину S^0 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен метод контроля энергетического потенциала радиолокаторов бокового обзора аэрокосмического базирования, проводимый с целью автоматического определения абсолютных значений УЭПР зондируемых поверхностей, базирующийся на использовании внутренней калибровки РЛС собственным импульсом излучения. В качестве инструмента исследований использовались радиолокационные изображения, полученные самолетным комплексом МАРС ЦРЗЗ НАНУ и НКАУ.

Проведенные натурные работы на тестовых полигонах показали высокую точность метода расчета УЭПР. Разработанный и опробованный алгоритм может быть использован в перспективных системах обработки радиолокационных сигналов РБО для получения данных об УЭПР зондируемых поверхностей в реальном масштабе времени. Представление РЛИ в виде поля УЭПР существенным образом снижает затраты на их тематическую обработку.

1. Гавриленко А. С., Крыжановский В. В., Кулешов Ю. А. и др. Комплекс радиофизической аппаратуры для дистанционного зондирования природной среды. — Харьков, 1986. — 39 с.—(Препринт / АН УССР. ИРЭ; № 321).
2. Калмыков А. И., Тимченко А. И., Шербинин И. В. Возможности исследования подповерхностных эффектов с помощью радиолокационного зондирования. — Харьков, 1990.—25 с.—(Препринт / АН УССР. ИРЭ; № 90-13).
3. Калмыков А. И., Цымбал В. Н., Блинков А. Н. и др. Многоцелевой радиолокационный самолетный комплекс исследования Земли. — Харьков, 1990.—34 с.—(Препринт / АН УССР. ИРЭ; № 90-21).
4. Кулемин Г. П., Курекин А. С. Влияние условий распространения на точность калибровки РЛС дистанционного зондирования // Радиолокационные системы летательных аппаратов. — Харьков: ХАИ, 1991.—С. 86—95.
5. Радиолокационные методы исследования Земли / Под ред. Ю. А. Мельника. — М.: Сов. Радио, 1980.—264 с.
6. Радиолокация поверхности Земли из космоса / Под ред. Л. М. Митника, С. В. Викторова. — Л.: Гидрометеоздат, 1990.—200 с.
7. Фрадин А. З., Рыжков Е. В. Измерения параметров антенно-фидерных устройств. — М: Связь, 1972.—352 с.
8. Soode's Wordl Atlas.—14th ed. — Chicago: Rand McNally, 1974.—263 p.

AUTOMATIC INTERNAL CALIBRATION OF REMOTE SENSING SYSTEMS

S. E. Yatsevich, A. S. Kurekin, V. N. Uvarov, A. S. Levda

The paper deals with the automatic internal calibration of the side-looking radars for the remote sensing of the Earth aboard the «Cosmos-1500» and «Sich-1» satellites, as well as of the airborne multipurpose radar system MARS. Measurement errors are estimated, and some results of the radar surveying of testing sites are given.