

Комбинированная калибровка радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны авиационного комплекса дистанционного зондирования Земли "Марс"

Д. М. Бычков, А. С. Гавриленко, Е. М. Ганапольский*, Г. И. Клочко, А. И. Логвиненко, А. Я. Матвеев, В. Н. Цымбал, С. Е. Яцевич*

Центр радиофизического зондирования Земли им. А. И. Калмыкова НАН Украины и НКА Украины, 61085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12

**Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, 61085, г. Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12*

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2004 г.

В работе анализируются особенности комбинированной калибровки радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны (РСА) авиационного многоцелевого радиолокационного комплекса "МАРС". Описаны устройства и методики внутренней и внешней калибровок РСА, а также результаты испытаний РСА на тестовых полигонах.

В роботі аналізуються особливості комбінованої калібровки радіолокаторів з синтезуванням апертури антени (РСА) авіаційного багаточільового радіолокаційного комплексу "МАРС". Описані засоби і методики внутрішньої та зовнішньої калібровок РСА, а також результати випробувань РСА на тестових полігонах.

1. Введение

Для решения задач оперативного мониторинга земной поверхности в настоящее время наиболее перспективными являются многочастотные радиолокаторы с синтезированием апертуры антенны (РСА) [1]. Сопоставление и совместная тематическая обработка результатов зондирования, полученных с помощью таких многоканальных радиолокаторов, эффективны только с использованием данных об абсолютной величине удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР) σ^0 исследуемых объектов, измеренной на различных частотах. К сожалению, опыт использования экспериментальных радиолокационных космических (например, SIR-A,B [2]) и авиационных (например, P-3, SAR-580 [3, 4]) комплексов показывает, что вопросы ка-

либровки многочастотных РСА решены не полностью. Поэтому разработка методов калибровки радиолокаторов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является важным этапом в их создании.

Наиболее известны два способа калибровки бортовых радиолокационных систем [5, 6]: использование калиброванных по эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) σ отражателей радиолокационных сигналов – "внешняя калибровка" – и непрерывный контроль всех необходимых параметров радиолокатора (например, излучаемой мощности, усиления приемного тракта и т. д.) непосредственно на борту – "внутренняя калибровка".

Внутренняя калибровка не обеспечивает высокой точности определения σ^0 (ошибка измерений может достигать $\approx 4 \div 5$ дБ [6, 7]) из-за невозможности оперативного учета

параметров трассы распространения и параметров полета (траектории движения, пространственной ориентации и скорости самолета), из-за трудностей контроля диаграммы направленности (ДН), коэффициента усиления антенны и др. Но она позволяет отследить изменения во времени параметров аппаратного комплекса, влияющих на выходную информацию радиолокатора. Непрерывная запись параметров полета носителя дает возможность учесть в дальнейшем их влияние расчетным путем. При внутренней калибровке применяются, как правило, специальные калибраторы, подключаемые к радиолокатору или встроенные 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.

Внешняя калибровка является единственной возможностью измерения реальных параметров сквозного тракта (передатчик – антенна – приемник – система обработки). При этом высокие точности измерения σ^0 (с ошибкой до $\approx 2.5 \div 3$ дБ [7-10]) можно обеспечить при размещении калиброванных точечных отражателей (ответчиков) или эталонных рассеивающих поверхностей непосредственно вблизи исследуемых образований. Но при длительной съемке протяженных участков земной поверхности, особенно при дистанционном зондировании морской поверхности, ледовой разведке, мониторинге горных районов и пр., размещение калиброванных отражателей в исследуемых районах практически неосуществимо. Существенным ограничением при использовании внешней калибровки является также необходимость регулярных пролетов носителя над тестовыми полигонами, что приводит к определенным сложностям при работе с комплексом ДЗЗ.

В настоящей работе рассмотрены особенности системы и методики проведения комбинированной калибровки [11] РСА де-

циметрового (РСА-23, $\lambda \approx 23$ см) и метрового (РСА-180, $\lambda \approx 180$ см) диапазонов длин радиоволн многоцелевого радиолокационного комплекса (МРЛК) “МАРС” [12, 13]), которая сочетает преимущества непрерывной внутренней калибровки каждого радиолокационного канала и периодической внешней калибровки по расположенным вблизи исследуемых объектов (или на оборудованных полигонах) малоразмерным (точечным) отражателям с известной эффективной поверхностью рассеяния σ . В момент проведения внешней калибровки система внутренней калибровки радиолокатора сравнивает эталонные сигналы бортового источника с сигналами, принятыми от внешнего эталона, и использует их в перерывах между сеансами внешней калибровки для оценки характеристик исследуемых поверхностей. Очевидно, что для получения высокой точности измерения необходимо обеспечить в интервалах между внешними калибровками стабильность и непрерывный контроль параметров радиолокатора – коэффициентов передачи калибровочного и приемно-передающего трактов, систем обработки и регистрации, – а также измерение и регистрацию текущих параметров полета носителя.

Главной особенностью реализации процедур внутренней и внешней калибровки РСА комплекса “МАРС” является широкое использование ультразвуковых линий задержки СВЧ сигналов [14], открывающих новые возможности непрерывного измерения и контроля характеристик РСА. Реализация систем калибровки РСА и результаты калибровки приведены ниже.

2. Комбинированная калибровка РСА

Комбинированная калибровка РСА проводится в два этапа. На первом этапе (внешняя калибровка) выполняется радиолокационная съемка специального участка поверхности, на котором размещены источники эталонных сигналов. При этом одновременно со съемкой в приемный тракт РСА вводится через систему внутренней калибровки ослабленный сигнал из переда-

ющего тракта, который в дальнейшем используется как калибровочный. В момент сравнения амплитуд эталонного и калибровочного сигналов система внутренней калибровки ведет непрерывную регистрацию параметров полета самолета и характеристик РСА.

На втором этапе выполняется радиолокационная съемка исследуемых поверхностей, также с непрерывной регистрацией параметров полета самолета и характеристик РСА системой внутренней калибровки. Оценка УЭРП исследованных поверхностей σ_S^0 с учетом указанных параметров съемки проводится путем сравнения амплитуд сигналов, принятых от исследуемых поверхностей, и калибровочных сигналов внутренней калибровки, полученных по результатам первого этапа калибровки. Это сравнение может проводиться не одновременно со съемкой исследуемых объектов, а в перерывах между съемками или их сериями. Окончательное выражение для определения σ_S^0 по результатам двухэтапной калибровки выглядит следующим образом [15]:

$$\sigma_S^0 = \frac{\sigma_{эт}}{\delta_{аз} \delta_{ум}} \frac{(U_S^2 - U_{NS}^2) k_{ПЧэт} k_{ВАРУэт} G^2(\Theta_{эт}) R_S^4}{(U_{эт}^2 - U_{Nэт}^2) k_{ПЧС} k_{ВАРУС} G^2(\Theta_S) R_{эт}^4}, \quad (1)$$

где величины, измеренные для внешнего эталона и исследуемого объекта, снабжены соответственно индексами эт и S; $\delta_{аз}$ и $\delta_{ум}$ – азимутальное и угломестное разрешения, м; U и U_N – амплитуды сигнала и шума на выходе системы обработки РСА; $k_{ПЧ}$ и $k_{ВАРУ}$ – коэффициенты усиления приемника на промежуточной частоте (ПЧ) и формы временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) приемника; $G(\Theta)$ – коэффициент усиления антенной системы, Θ – угол наблюдения; R – наклонная дальность, м.

Сравнение (1) с аналогичным выражением, полученным для σ_S^0 по данным внешней калибровки [10], показывает, что они отличаются на величину $k_{ПЧэт}/k_{ПЧС}$ только

в случае, если съемка внешнего эталона на первом этапе калибровки проводилась с усилением ПЧ тракта приемного устройства, которое отличается от усиления при съемке исследуемого объекта на втором этапе.

Проанализируем причины возможных ошибок, приводящих к снижению точности определения σ_S^0 по результатам комбинированной калибровки. В первую очередь, оценим зависимость условий распространения радиоволн от часто изменяющихся погодных условий. Данные о прозрачности атмосферы в дециметровом и метровом диапазонах длин радиоволн, а также анализ данных космических РСА (SIR-B, “Алмаз” и др.) [2, 16, 17] свидетельствуют о том, что поглощение в облаках или тумане на длине волны $\lambda \approx 23$ см составляет $\approx 0.0002 + 0.002$ дБ/км, что для самолетного РСА ($R \approx 5 + 40$ км) приведет к ошибкам ≤ 0.1 дБ. Для метрового диапазона влияние трассы распространения начинает сказываться только при высотах полета более 100 + 150 км из-за неоднородностей концентрации зарядов в ионосфере.

Согласно (1), система внутренней калибровки должна измерять характеристики приемного тракта (усиление ПЧ и форму ВАРУ) и контролировать их стабильность как в моменты приема сигналов, отраженных от эталонного точечного отражателя и исследуемого объектов, так и в перерывах между этими измерениями. Особенно сложным является непрерывный контроль коэффициента усиления $G(\Theta)$ антенной системы РСА. Измерения $G(\Theta)$ обычно проводятся на этапе наземных испытаний. Как показывает опыт, изменение $G(\Theta)$ маловероятно, так как может быть вызвано только механическим смещением или повреждением жестко закрепленных вибраторов антенной решетки, закрытой от внешних воздействий радиопрозрачным колпаком. Поэтому для контроля $G(\Theta)$ достаточно, чтобы внутренняя калибровка обеспечила контроль амплитудно-фазовых характеристик приемно-передающих каналов РСА. Фактически, при обеспечении этого контроля основные ошибки возникают при оп-

ределении дальности R до объекта и разрешения по азимуту $\delta_{аз} = 2L_b/R\lambda$ (где L_b – длина бортового синтезирования апертуры антенны). Так как дальность до исследуемого объекта определяется по данным системы GPS с достаточно высокой точностью, то необходимо минимизировать погрешности определения азимутального разрешения, связанные с точностью вычисления L_b . Для этого на борту самолета одновременно проводится регистрация обработанного (синтезированного) изображения и полного необработанного сигнала (радиоголограммы), а также параметров полета. На земле радиоголограммы обрабатываются по тем же алгоритмам, что и на борту, но с учетом всех нестабильностей полета. При этом длина синтезирования апертуры антенны L_g , уточненная по данным наземной обработки, и длина бортового синтезирования апертуры антенны L_b связаны следующим образом [11]:

$$L_b = KL_g, \quad K = \frac{\sqrt{U_b^2 - U_{bN}^2}}{\sqrt{U_g^2 - U_{gN}^2}}, \quad (2)$$

где U_b , U_g и U_{bN} , U_{gN} – амплитуды сигналов внешнего эталона и шумов в изображении, синтезированном на борту (индекс b) и на земле (индекс g), соответственно. Как показали эксперименты, значения коэффициента K в зависимости от условий полета могут изменяться в пределах $K \approx 0.75 \div 0.95$. Учет изменений K при наземной обработке позволяет уменьшить ошибку определения разрешения по азимуту до 0.1 дБ.

Таким образом, при контролируемой стабильности работы аппаратуры РСА и известных параметрах полета, а также коррекции на земле результатов бортового синтезирования комбинированная калибровка позволяет обеспечить высокую инструментальную точность РСА, сравнимую с точностью, которая достигается при внешней калибровке – 2.5 ÷ 3 дБ [10].

Необходимо также отметить, что точность измерения $\sigma_{эТ}$ эталона – активного

ответчика (АО) – при внешней калибровке зависит от окружающей его местности (фоновых отражений). Для оценки фоновых отражений воспользуемся соотношением сигнал/фон (S/C) для РСА [18]:

$$(S/C)_{РСА} = \frac{\sigma_{эТ}}{\sigma_{\phi}^0 \delta_{аз} \delta_{ум}}, \quad (3)$$

где σ_{ϕ}^0 – удельная эффективная площадь поверхности рассеяния, на которой установлен АО. Оценки показывают, что при пространственном разрешении 50×50 м обеспечить на выходе системы обработки сигналов РСА отношение $(S/C)_{РСА} \approx 100$ можно при $\sigma_{эТ} \approx 10^3$ м². При этом АО должен быть установлен на поверхности с $\sigma_{\phi}^0 \leq 0.004$ (–24 дБ). На специально оборудованном полигоне такую поверхность организовать несложно (незасеянные обработанные поля со среднеквадратической высотой неровностей не более 0.02 м, поля со скошенной травой, бетонированные площадки и др. [10]). Однако в реальных условиях, при установке АО в непосредственной близости от исследуемого объекта (поверхности) или в районе наиболее частого проведения экспериментов, как правило, удается подобрать площадки с $\sigma_{\phi}^0 \approx -10 \div -20$ дБ. Поэтому необходимо использовать АО с более высокой $\sigma_{эТ}$, которая обычно реализуется путем увеличения коэффициента усиления приемо-передающего тракта АО. Однако при значительном увеличении коэффициента усиления возникает опасность самовозбуждения АО. Поэтому на практике используют АО с $\sigma_{эТ} \approx 10^4$ м², а для дополнительного ослабления влияния фона проводят измерения $\sigma_{эТ}$ на взаимно-ортогональных поляризациях (РСА – ВГ или ГВ, АО – ГВ или ВГ, соответственно). Величина дополнительного ослабления при таких измерениях определяется уровнем кросс-поляризационной развязки антенной решетки РСА, приемной и передающей антенн АО (не более –20 дБ), а также характеристиками рассеяния площадки, на которой он установлен.

3. Системы внутренней калибровки РСА-23 и РСА-180

Построение и процедуры внутренней калибровки РСА комплекса "МАРС" имеют свои особенности из-за различий в реализации антенных систем (активная фазированная антенная решетка АФАР с электронно перестраиваемой ДН в РСА-23 и неуправляемая пассивная ФАР в РСА-180). Эти различия проявляются как в выборе способа внутренней калибровки, так и в решении наиболее сложной задачи – непрерывного контроля основных параметров антенной решетки РСА (коэффициента усиления, ширины и формы ДН). Как показано ранее, для контроля указанных параметров достаточно, чтобы внутренняя калибровка РСА обеспечивала непрерывный контроль стабильности амплитудно-фазовых характеристик приемно-передающих каналов АФАР/ФАР РСА.

АФАР РСА-23 представляет собой электрически управляемую многоэлементную (16 приемно-передающих вибраторов) антенную решетку с высоким коэффициентом усиления (≈ 19.4 дБ), обеспечивающую при-

ем и передачу сигналов с линейной частотной модуляцией с вертикальной или горизонтальной поляризацией и позволяющую быстро ($1 \div 3$ мкс) изменять пространственное положение суммарной ДН в азимутальной плоскости ($\pm 10^\circ$). Для АФАР РСА-23 использованы отдельные активные системы запитки (16 приемных и 16 передающих каналов) общей антенной решетки. Это, кроме увеличения развязки, открывает возможности для построения многофункциональной системы непрерывной калибровки и контроля работоспособности (см. рис. 1). Принцип работы такой системы основан на том, что определенная часть выходной мощности каждого из 16 передающих каналов через систему коммутаторов "прием/передача", сумматор и циркулятор периодически поступает на вход СВЧ линии задержки (работающей по принципу многократного отражения). Задержанные линией радиоимпульсы направляются циркулятором через делитель и систему коммутаторов "прием/калибровка" на симметричный по номеру вход приемной фазированной системы (1-й на 16-й, 2-й на 15-й и т. д.). В случае правильного функционирования системы фазирования

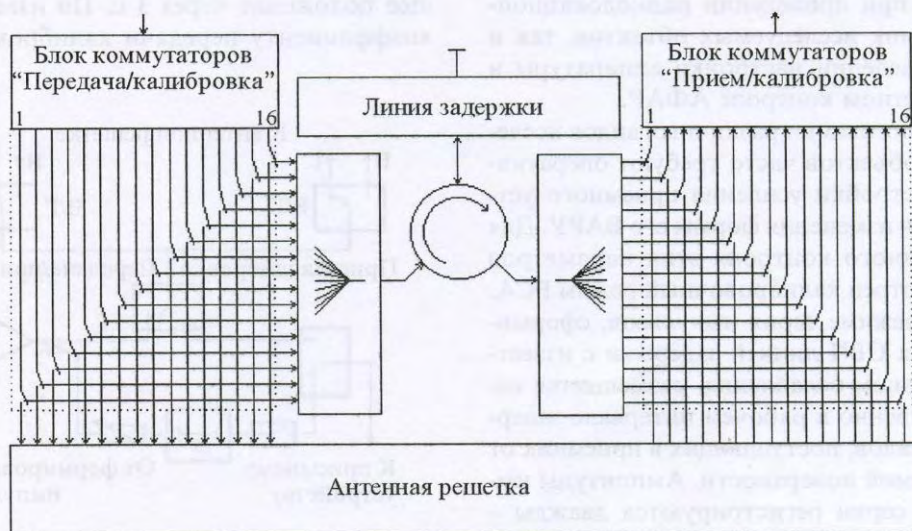


Рис. 1. Функциональная схема калибровки АФАР РСА-23 авиационного комплекса "МАРС"

приемной и передающей части АФАР на выходе приемного устройства радиоимпульсы равны по амплитуде и фазе (так как проходят по цепям с равной электрической длиной и ослаблением). Отличие амплитуды или фазы в какой-либо из пар каналов свидетельствует об ошибках в передающей или приемной системах фазирования. Точность этих измерений во многом определяется стабильностью коэффициента затухания радиосигналов в СВЧ линии задержки. Поэтому СВЧ линия помещена в специальный термостабилизированный корпус. Контроль точности таких измерений проводится по результатам прямых измерений амплитудных и фазовых характеристик приемных и передающих каналов АФАР. Предложенная методика позволяет сравнивать коэффициенты передачи указанных выше пар приемно-передающих трактов с точностью $\leq \pm 0.15$ дБ и определять разность фаз между ними с погрешностью не более $\pm 3 \div 5^\circ$. Использование различных режимов переключения быстродействующих СВЧ коммутаторов на р-і-n-диодах позволяет получать оперативную информацию (регистрируемую в служебной части строки изображения) о состоянии всех пар приемно-передающих каналов АФАР как непосредственно при проведении радиолокационных съемок исследуемых объектов, так и при проведении настройки аппаратуры и предполетном контроле АФАР.

Условия съемки различных видов исследуемых объектов часто требуют оперативной подстройки усиления приемного устройства и изменения формы его ВАРУ. Для оперативного контроля этих параметров предусмотрен калибровочный режим РСА. В этом режиме серия импульсов, сформированных СВЧ линией задержки с известным законом ослабления, размещается непосредственно в рабочем интервале задержек сигналов, поступающих в приемник от исследуемой поверхности. Амплитуды импульсов серии регистрируются дважды – при включенном и выключенном ВАРУ приемника. Сравнение этих данных между собой позволяет восстановить форму

ВАРУ приемника и оценить его динамический диапазон.

В системе внутренней калибровки РСА-180 комплекса “МАРС” СВЧ линия задержки используется для формирования калибровочных уровней (клина) сигналов, которые так же, как и в РСА-23, регистрируются в служебной части строки изображения. Для этого часть мощности выходного СВЧ усилителя через направленный ответвитель попадает в систему калибровки (см. рис. 2). Уровень ответвленной мощности регулируется ступенчатым (число ступеней 16) аттенуатором с шагом ~ 3 дБ. Ступенчатый аттенуатор вместе с СВЧ линией задержки обеспечивают необходимый уровень линейности передачи калибровочного сигнала через приемное устройство. Из серии импульсов, сформированных СВЧ линией задержки, ключ на ее выходе пропускает на вход приемного устройства 2-й импульс, задержанный относительно излученного на 30 мкс. Этот сигнал также усиливается приемным устройством и затем обрабатывается системой обработки сигналов по такому же алгоритму, как и сигналы, принятые от исследуемого объекта. Для удобства последующей обработки информации ступенчатый аттенуатор переключается в следующее положение через 3 с. По известному коэффициенту передачи калибровочного

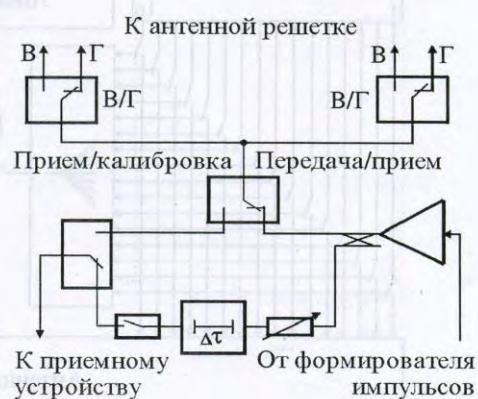


Рис. 2. Функциональная схема калибровки РСА-180 авиационного комплекса “МАРС”

тракта определяется уровень мощности излучаемого сигнала и контролируется его стабильность, а также контролируется усиление, динамический диапазон всего приемного тракта и оценивается потенциал РСА-180. Для повышения точности измерений СВЧ линия задержки (как и в системе калибровки РСА-23) помещена в специальный термостабилизированный корпус.

4. Наземный контрольно-поверочный модуль МРЛК "МАРС"

Для проведения внешней калибровки и наземного контроля основных параметров радиолокаторов авиационного комплекса "МАРС" был создан контрольно-поверочный модуль, в состав которого входили активные (АО) и пассивные (ПО) точечные

ответчики (см. табл. 1, рис. 3). Внешняя калибровка всех радиолокаторов комплекса "МАРС" проводилась одновременно по калиброванным отражателям (см. табл. 1), установленным на специальном полигоне. Нужно подчеркнуть, что для обеспечения превышения сигнала калиброванного отражателя над фоном местности на ≥ 20 дБ необходимо, например для РСА-23 и РСА-180, чтобы эффективная поверхность рассеяния $\sigma_{\text{э}}^*$ ответчика составляла $\geq 10^4$ м². Расчеты показывают, что среди отражателей с такой большой $\sigma_{\text{э}}^*$ для работы в полевых условиях оптимальными являются АО. По сравнению с ПО они имеют большие функциональные возможности при значительно меньших размерах. Поэтому для внешней калибровки РСА применялись активные ответчики (см. табл. 1).

Таблица 1. Основные характеристики калиброванных отражателей МРЛК "МАРС"

1. Диапазон длин радиоволн	Ка (0.8 см)	X (3 см)	L (23 см)	VHF (180 см)
2. Тип отражателя	Пассивный отражатель		Активный ответчик	
3. Тип антенны	Трехгранные уголки ($a_1 = 0.56$, $a_2 = 0.66$)*		Рупорная	Волновой канал
4. Полоса рабочих частот, ГГц	8 ÷ 40		1 ÷ 2	(0.165 ± 0.02)
5. Коэффициент усиления приемной и передающей антенн, дБ	–	–	12.5	10
6. Суммарный коэффициент усиления активного ответчика, дБ	–	–	41.6	31
7. Эффективная поверхность рассеяния отражателя $\sigma_{\text{э}}^*$, м ²	≈ 6700 ($a_1 = 0.56$) ≈ 12800 ($a_2 = 0.66$)	≈ 500 ($a_1 = 0.56$) ≈ 900 ($a_2 = 0.66$)	≈ 11100	≈ 33200

* a – длина ребра уголкового отражателя, м

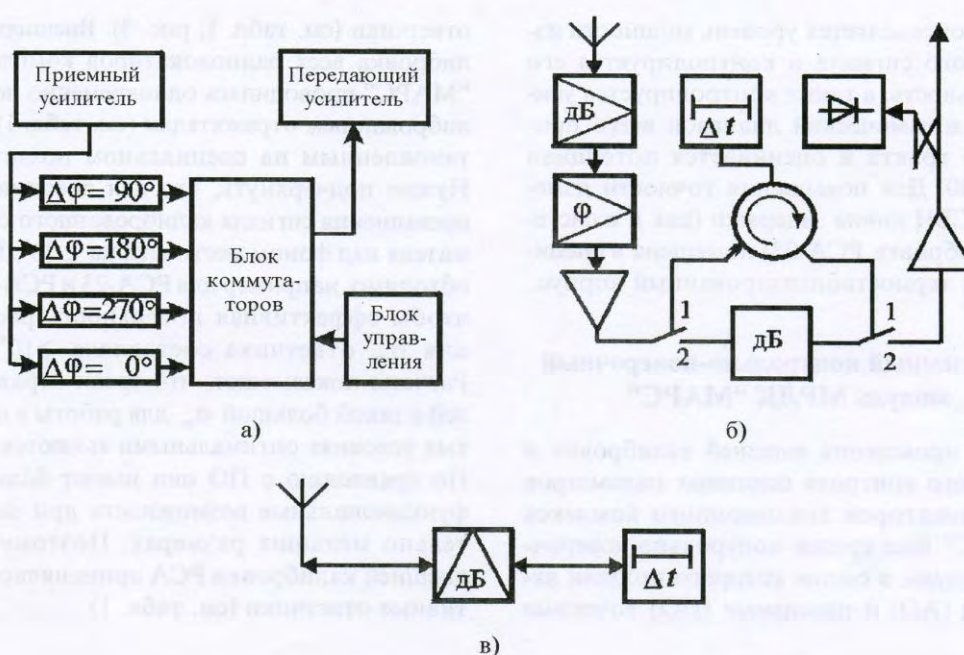


Рис. 3. Функциональные схемы активных (а, б) и пассивных (в) ответчиков для контроля и калибровки РСА комплекса "МАРС":

а – с фазовым модулятором; б, в – с линией задержки Δt ; 1, 2 – варианты включения АО

В отличие от традиционных [8], АО дополнены фазовым модулятором (см. рис. 3, а) и СВЧ линией задержки (см. рис. 3, б).

В АО (см. рис. 3, а) фазовый модулятор реализован в виде фазовращателей с фазами 90° , 180° , 270° и 0° , последовательно переключаемых с различной скоростью, для имитации доплеровского смещения спектра в переотраженном сигнале. Это делает его полезным при контроле основных характеристик РСА на земле. С помощью ответчика с фазовой модуляцией переизлучаемых сигналов можно проводить поляризационные измерения диаграммы направленности и уровня боковых лепестков АФАР и ФАР, настройку блока измерения смещения центра доплеровских частот и системы управления положением луча АФАР, проверку системы бортовой обработки сигналов, а также оценивать потенциал РСА.

По сигналам, принятым от АО с включенной линией задержки (см. рис. 3, б) (представляющим на радиолокационном изображении серию отстоящих друг от друга на $\tau = 6$ мкс, спадающих по амплитуде импульсов), легко определить местоположение АО на фоне любой местности. Наличие на радиолокационном изображении временных (а следовательно, и пространственных) реперных точек позволяет оценить геометрические искажения полученного радиоизображения.

Кроме АО, для контроля характеристик РСА также был использован пассивный ответчик с линией задержки (см. рис. 3, в). С его помощью осуществлялся предполетный контроль состояния элементов антенной решетки РСА-23. При этом ответчик поочередно устанавливался на определенном расстоянии от плоскости антенной решетки напротив каждого из вибраторов, а система внутренней калибровки РСА-23

переключала соответствующие пары приемно-передающих каналов. Пассивный ответчик отражал назад каждый излученный передающим каналом импульс в виде серии задержанных линией задержки импульсов. Контроль состояния вибраторов производился по измерению количества задержанных импульсов на выходе приемного устройства.

Результаты испытаний МРЛК "МАРС", полученные с помощью описанного контрольно-поверочного модуля, приведены ниже.

5. Результаты испытаний МРЛК "МАРС"

В качестве основного калибровочного полигона использовались сельскохозяйственные поля в Харьковской области. Активные и пассивные ответчики устанавливались через 100 м 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 км. Это дало возможность внести окончательные коррективы в алгоритм определения УЭПР и уточнить форму ДН антенн.

На рис. 4 показаны результаты калибровки РСА-23 по активному ответчику с СВЧ линией задержки (см. рис. 3, б, вариант включения 1), работающему в режиме ответа на каждый принятый радиолокационный импульс серией спадающих по известному закону импульсов (сформированных линией задержки). Для дополнительного ослабления влияния фона измерения $\sigma_{\text{эт}}$ проводились на взаимно-ортогональных поляризациях. На подлете к зоне действия АО (см. рис. 4, а) РСА-23 был переключен из режима ВВ (излучение и прием на вертикальной поляризации) зондирования поверхности в режим ВГ. При этом АО работал на ортогональных поляризациях. Сравнение записей амплитуд сигналов в строке радиолокационного изображения (РЛИ) при работе РСА в режиме

ВВ (см. рис. 4, б) и в режиме ВГ (см. рис. 4, в) показывает эффективность подавления фона поверхности при выбранном режиме измерений. При этом сравнение закона спада амплитуд импульсов АО по радиолокационным данным и закона спада амплитуд на СВЧ линии задержки по данным наземных испытаний (рис. 4, г кривые 1 и 2, соответственно) дает возможность оценить форму ВАРУ приемника РСА-23.

На рис. 5 показаны результаты наземного синтеза дециметрового РЛИ активного ответчика с учетом параметров движения самолета. При съемке АО был включен в режиме однократного ответа на каждый принятый от РСА-23 радиоимпульс (см. рис. 3, б, вариант включения 2). Видно, что размер изображения точечного АО по уровню -3 дБ вдоль направления полета не превышает ≈ 2 м. Отметим, что при длине реальной апертуры АФАР РСА-23 $L = 3.3$ м, максимальное теоретическое азимутальное разрешение РСА-23 равно $\delta_{\text{Аз}} = L/2 = 1.65$ м. Близость экспериментально измеренного значения и теоретического подтверждает высокое качество выбранной процедуры наземного синтеза.

Для проверки метрологических характеристик РСА МРЛК "МАРС" были проведены оценки σ^0 различных типов поверхностей с различным интервалом между внешними калибровками. В качестве примера на рис. 6 (сплошные кривые) приведены угловые зависимости σ^0 удельных эффективных поверхностей рассеяния различных поверхностей в дециметровом диапазоне, полученные по результатам съемки РСА-23 комплекса "МАРС" указанного калибровочного полигона в Харьковской области 27.08.92 г. (для леса, пашни, воды), а также по результатам ледовой разведки в Северном Ледовитом океане 07.02.90 г. (для морского однолетнего льда). Там же для сравнения (пунктир) приведены результаты других авторов. Из рис. 6 видно, что для леса, пашни, воды и морского однолетнего льда данные эксперимента и литературные данные [19-22] практически находятся в пределах точности измерений РСА-23. Следует

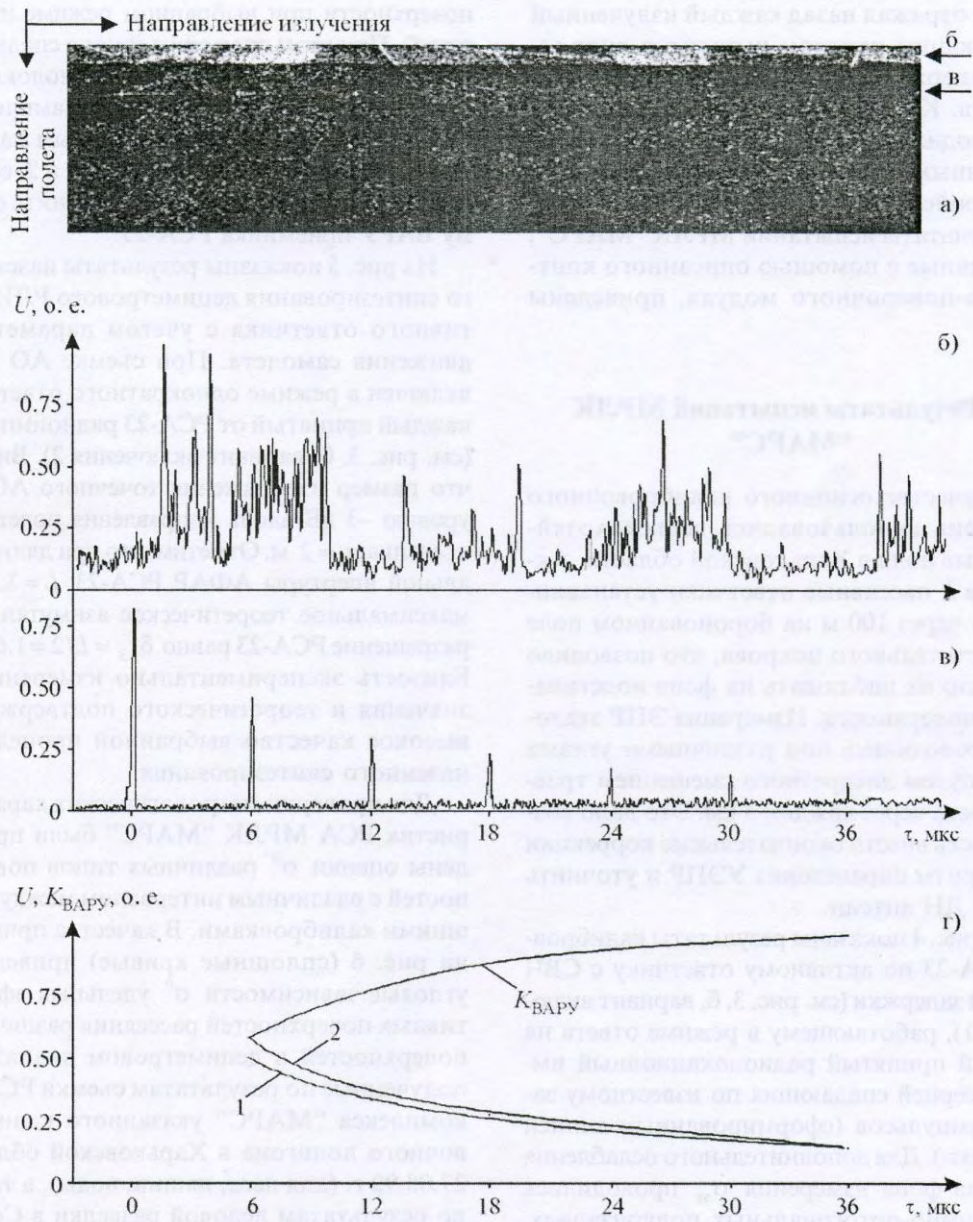


Рис. 4. Внешняя калибровка по активному ответчику ДМ диапазона:

а – фрагменты радиолокационного изображения при съемке в режиме *VV* (по стрелке *б*) и в режиме *VG* (по стрелке *в*); *б*, *в* – изменение нормированной амплитуды сигнала вдоль строк РЛИ по стрелкам *б* и *в*, соответственно; *г* – оценка формы *VAPU* приемника по результатам внешней калибровки, *1* – закон спада амплитуд импульсов *АО* по радиолокационным данным, *2* – закон спада амплитуд импульсов на выходе *СВЧ* линии задержки по данным наземных испытаний

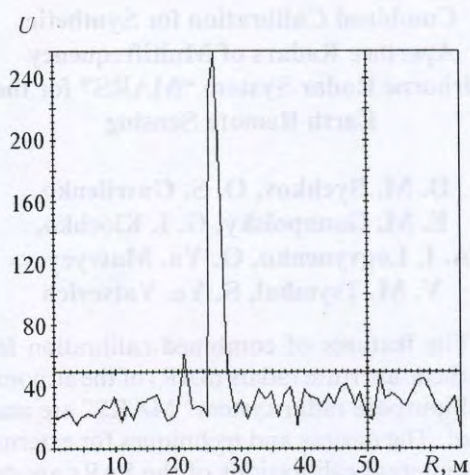


Рис. 5. Результаты наземного синтезирования дециметрового РЛИ активного ответчика: U – нормированная амплитуда сигнала АО на выходе системы обработки РСА-23; R – расстояние вдоль линии полета самолета, м

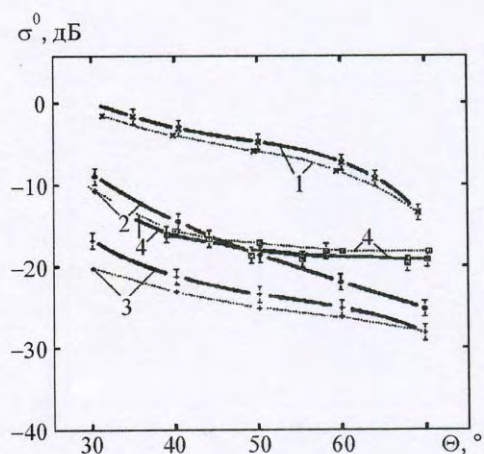


Рис. 6. Угловая зависимость σ^0 для различных видов земной поверхности в дециметровом диапазоне ($\lambda \approx 23$ см), экспериментальные (—) и литературные (-----) данные: 1 – лиственный лес, сады (поляризация ГГ [19]); 2 – пашня (поляризация ГГ [20]); 3 – пресная вода (поляризация ВВ [21]), 4 – морской однолетний лед (поляризация ВВ [21, 22])

обратить внимание на кривые 4. Приведенные оценки σ^0 для морского однолетнего льда выполнены по результатам внутренней калибровки РСА-23 во время серии полетов из Мурманска к Северному полюсу. Последняя внешняя калибровка проводилась по активным ответчикам на полигоне под Харьковом. Отметим, что кривые 4 достаточно хорошо согласуются с данными [22], полученными с помощью классического измерителя параметров рассеяния – скаттерометра. Это свидетельствует о достаточной стабильности работы аппаратуры и способности системы внутренней калибровки обеспечивать высокую измерительную точность на время, большее длительности одного полета ($T > 10$ ч), что подтверждает эффективность и практическую ценность метода комбинированной калибровки.

Литература

1. W. Keydel. Proc. European Conf. on Synthetic Aperture Radar, EUSAR'96, 26-28 March 1996. Königswinter (Germany). VDE-VERLAG GMBH *Berlin* Offenbach. 1996, pp. 19-24.
2. R. K. Raney. Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar (SAR). AGARD Lecture Series 182. North Atlantic Treaty Organization, Neuilly-Sur-Sene, France. 1992. ISBN 92-835-0683-9, pp. 11-1-11-18.
3. A. Kazma, A. D. Nichols, R. F. Rawson, C. W. Haney. Shanner Jr J. J. Proc. IGARSS'86 Symposium, Zürich, 8-11 Sept. 1986, pp. 715-719.
4. K. Maeda, F. Kitazawa, N. Kodaira. Proc. 14th Int. Symp. Space Technol. and Sci., Tokyo, May 27 - June 1. 1984, pp. 1291-1299.
5. А. А. Белокуров, С. И. Глыбовский. Зарубежная радиоэлектроника. 1990, №2, с. 19-31.
6. A. Freeman. SAR Calibration: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1992, 30, No. 6, pp. 1107-1121.
7. Г. П. Кулемин, В. Б. Разказовский. Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. Киев, Наукова думка, 1987, 232 с.
8. D. R. Brunfeldt, F. T. Ulaby. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1984, GE-22, No. 2, pp. 165-169.

9. E. S. Kasischke, G. W. Fowler, C. C. Wackerman. Proc. IEEE Nat. Radar Conf., Ann Arbor, Mich, Apr.20-21. New York (N.Y.), 1988, pp. 115-117.
10. R. W. Larson, P. L. Jackson, E. S. Kasischke. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1988, **26**, No. 6, pp. 753-763.
11. А. Я. Матвеев, V. N. Tsymbal, A. S. Gavrilenko, A. I. Logvinenko, D. M. Bychkov. Proc. European Conf. on Synthetic Aperture Radar, EUSAR'96: 26-28 March 1996. Königswinter (Germany). VDE-VERLAG GMBH *Berlin*Offenbach. pp. 511-514.
12. А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал, А. С. Курекин, В. Б. Ефимов, А. Я. Матвеев, А. С. Гавриленко, В. В. Иголкин. Радиофизика и радиоастрономия. 1998, **3**, №2. с. 119-129.
13. А. И. Калмыков, В. Н. Цымбал, А. Н. Блинков, А. С. Курекин, Г. П. Кулемин. Препринт ИРЭ НАН Украины. Харьков, 1990, №90-21, 35 с.
14. А. Я. Matveyev. Proceedings of the 3rd International Conference on Antenna Theory and Techniques, 8-11 Sept., 1999. Sevastopil (Ukraine). 1999, pp. 517-519.
15. А. Я. Матвеев. Сборник докладов III Всероссийской научной конференции "Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды", 17-18 июня, 1999. Муром (Россия). 1999, с. 145-146.
16. М. Сколник. Справочник по радиолокации. Том 1. Основы радиолокации. Пер. с англ. Москва, Сов. радио, 1976, 456 с.
17. М. И. Финкельштейн. Основы радиолокации. Москва, Сов.радио, 1973, 496 с.
18. W. Keydel. Fundamentals and Special Problems of Synthetic Aperture Radar (SAR). AGARD Lecture Series 182.-North Atlantic Treaty Organization, Neuilly-Sur-Sene, France. 1992, ISBN 92-835-0683-9. pp. 2-1-2-10.
19. G. Sun, D. S. Simonett. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 1988, **54**, No. 8, pp. 1195-1201.
20. F. T. Ulaby, P. P. Batlivala, M. C. Dobson. IEEE Transactions on Geoscience Electronics. 1978, **GE-16**, No. 4, pp. 286-295.
21. R. G. Onstott, R. K. Moore, S. Gogineni, C. Delker. IEEE J. Oceanic Engin. 1982, **QE-7**, No. 1, pp. 44-50.
22. R. Q. Onstott, R. Q. Moor, Weeks W. F. et al. IEEE Trans. Geosci. Electronic. 1979, **GE-17**, No. 1, pp. 78-85.

Combined Calibration for Synthetic Aperture Radars of Multifrequency Airborne Radar System "MARS" for the Earth Remote Sensing

**D. M. Bychkov, O. S. Gavrilenko,
E. M. Ganapolsky, G. I. Klochko,
A. I. Logvynenko, O. Ya. Matvyeyev,
V. M. Tsymbal, S. Ye. Yatsevich**

The features of combined calibration for synthetic aperture radars (SAR) of the airborne multipurpose radar system "MARS" are analyzed. The devices and techniques for external and internal calibrations of the SARs are described, the SAR ground test results given.

