

УДК 621.396.96

**Вопросы обеспечения калибровки радиолокационных станций
в системах дистанционного зондирования Земли****Calibration issues of radars in Earth remote sensing systems****Евсеев / Evseev V.**

Владимир Иванович

(v.evseev43@mail.ru)

доктор технических наук, профессор,

член-корреспондент РАЕН.

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный

технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д. Ф. Устинова»,

(БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова),

профессор кафедры радиоэлектронных

систем управления.

г. Санкт-Петербург

Титов / Titov K.

Константин Игоревич

(Konstantin_titov@mail.ru)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

им. А. Ф. Можайского» МО РФ,

начальник отдела.

г. Санкт-Петербург

Колачев / Kolachev I.

Игорь Олегович

(kolachev_io@voenmeh.ru).

БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова,

ассистент кафедры радиоэлектронных систем

управления.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: радиолокационная станция – radar; дистанционное зондирование Земли – the Earth remote sensing; калибровка – calibration; транспондер – transponder; активный ретранслятор – active repeater; активный радиолокационный калибратор – active radar calibrator; радиолокационное изображение – radar image.

В статье рассмотрены основные теоретические и практические положения, определяющие сущность калибровки радиолокационных станций (РЛС) в системах дистанционного зондирования Земли, и используемые для этого средства. В представленном обзоре основных калибровочных средств особое внимание уделено транспондерам (активным ретрансляторам), поскольку они являются наиболее перспективным средством калибровки РЛС. Представлен ряд недостатков, ограничивающих их применение для калибровки РЛС. Предложена новая структура транспондера – активного радиолокационного ретранслятора (АРК), устраняющая выявленные недостатки и отвечающая современным требованиям. Рассмотрена проблема отсутствия наиболее приемлемого показателя качества работы АРК. Сформулированы направления дальнейших исследований.

The article considers the main theoretical and practical provisions, which determine the essence of the calibration of radars and the instruments used for this process. The review of the main calibration instruments is presented. Special attention is paid to transponders (active repeaters), because they are the most promising instruments for radars calibration. A number of shortcomings are presented that limit their use for calibration of radars. A new structure of the transponder is proposed – an active radar repeater (ARR), which eliminates the identified shortcomings and meets modern requirements. The problem of the lack of the most acceptable indicator of the ARR work quality is considered. Directions for further research are formulated.

Введение

В настоящее время одним из основных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса являются радиолокационные станции (радары). Эти средства ДЗЗ позволяют определять энергетические, пространственные и с ними связанные характеристики интересующих объектов, следовательно, современные РЛС могут использоваться в качестве средств измерения.

Как и любые средства измерения, РЛС нуждаются в калибровке. Сама идея калибровки РЛС возникла примерно в 80-е годы XX века, однако это было время начального периода их применения как средства ДЗЗ из космоса, поэтому некалиброванных радиолокационных изображений (РЛИ) было достаточно для существующих в то время методик обработки радиолокационных данных (изображений). Так, большинство прорывов того времени, например обнаружение русла древней реки под песками Сахары с помощью РЛС SIR-A [1], были сделаны без калибровки. Всё изменилось в начале разработки в США РЛС SIR-C/X-SAR, в рамках которой множество учёных по всему миру разработало и апробировало различные методики калибровки во время двух запусков многоразового космического корабля Space Shuttle Columbia в 1994 году. С этого момента калибровка считается не просто полезной, а необходимой для применений РЛИ в различных областях использования ДЗЗ из космоса.

Это обусловлено тем, что с 90-х годов применение РЛС перестало ограничиваться топографией, для которой калибровка, как правило, не требуется. Количественное измерение энергетических и пространственных характеристик объектов и различных подстилающих поверхностей в настоящее время позволяет применять РЛС для решения таких задач, как [2]: классификация растительного покрова, мониторинг лесов, обнаружение полезных ископаемых, наблюдение за геологическими процессами, мониторинг морских экосистем, классификация разливов нефти, мониторинг ледников, составление карт океанических течений и распределения морских волн, определение влажности почв, обнаружение и классификация антропогенных объектов и многих других.

Для осуществления калибровки необходимы объекты с известным местоположением и характеристиками рассеяния. Наиболее современным и перспективным подобным средством для систем космического базирования является активный ретранслятор (транспондер), также известный как активный радиолокационный калибратор (АРК). Он позволяет создавать на РЛИ несколько ярких отметок в различных координатах за счёт внесения дополнительной задержки в зондирующий сигнал и изменения его частоты при ретрансляции. Однако подобный подход не удовлетворяет потребностям современных космических РЛС, поскольку отметки от сигналов транспондера на

формируемых изображениях расфокусированы, что снижает возможность их применения для калибровки. Для решения этой проблемы в статье предлагается изменение параметров сигнала во времени в соответствии с некоторой функцией. Подобный подход является новым для науки и техники, а также актуальным в силу стремительного развития отрасли.

Статья организована следующим образом. В первом разделе кратко даны основные теоретические и практические положения, определяющие процесс калибровки РЛС, и рассмотрены её виды. Во втором осуществлён обзор основных калибровочных средств с акцентом внимания на их недостатках, которые возможно устранить с помощью АРК, подробному рассмотрению которого посвящён третий раздел. В четвёртом предлагается новая конструкция транспондера, отвечающая современным требованиям ДЗЗ из космоса, а в пятом кратко рассмотрена проблема отсутствия наиболее приемлемого показателя качества работы АРК. В завершение изложения статьи содержатся предложения по дальнейшим исследованиям и практическим работам.

Сущность калибровки РЛС

Калибровка РЛС осуществляется с целью отождествления значений пикселей РЛИ с отражательной способностью соответствующего участка радиолокационной сцены, а также положения пикселя и пространственных координат участка. Для достижения первой цели осуществляется радиометрическая калибровка, а второй – геометрическая.

Геометрическая калибровка осуществляется путём сравнения РЛИ и информации о фактических координатах объектов на нём. В случае, если обнаруживаются расхождения реального положения отметок по отношению к ожидаемым, осуществляется двумерная коррекция РЛИ с помощью известных методов обработки [3].

Радиометрическая калибровка заключается в сопоставлении значения пикселя РЛИ с известной характеристикой цели. При обработке данных радар считается линейной системой, для которой имеет место следующее уравнение [4]:

$$V(x, y) = \sqrt{K_s} e^{j\varphi_s} S(x, y) \otimes h(x, y) + \sqrt{K_n} n(x, y), \quad (1)$$

где $V(x, y)$ – измеренное напряжение на выходе системы синтеза РЛИ в координатах (x, y) ; K_s и φ_s – результирующий коэффициент усиления и фазовый сдвиг РЛС и системы обработки; $S(x, y)$ – эффективная поверхность рассеяния, соответствующая пространственному положению (x, y) ; $h(x, y)$ – импульсная характеристика РЛС и системы обработки; K_n – коэффициент усиления шума $n(x, y)$.

Поскольку шум $n(x, y)$ является случайной величиной, $V(x, y)$ также случайна. Поэтому определя-

ется не точное значение $S(x, y)$, а её математическое ожидание. В настоящее время существуют методы, подавляющие влияние шумов, например некогерентное накопление нескольких РЛИ одного и того же участка местности, однако подавить его полностью не представляется возможным. На практике стремятся к тому, чтобы дисперсия шумов была на несколько порядков меньше мощности полезного сигнала. Обычно информация об уровне собственных шумов определяется бортовыми средствами, но существуют методы оценки шумов непосредственно по изображениям [5].

Импульсная характеристика РЛС считается нормированной, а фазовый множитель не влияет на модуль РЛИ. Поэтому в однополяризационных радарх задача радиометрической калибровки сводится к определению коэффициента K , который можно представить следующим образом [4]:

$$K_s = \frac{P_t G_t^A(\theta_{el}, \theta_{az}) G_r^A(\theta_{el}, \theta_{az}) \lambda^2 G_r^E G_p(x, y)}{64\pi^3 R^4 L_s L_a}, \quad (2)$$

где P_t – мощность зондирующего сигнала; $G_t^A(\theta_{el}, \theta_{az})$ и $G_r^A(\theta_{el}, \theta_{az})$ – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн для заданного угла места θ_{el} и азимута θ_{az} ; λ – длина волны; G_r^E – коэффициент усиления приёмника РЛС; $G_p(x, y)$ – коэффициент усиления системы обработки; R – наклонная дальность до объекта; L_s – потери в приёмном тракте (например, в фидере); L_a – ослабление сигнала при распространении в атмосфере.

Для определения энергетической характеристики рассеянного от объекта сигнала с помощью РЛИ необходимо, чтобы $K_s = 1$. Это можно сделать только за счёт соответствующего выбора функции системы обработки $G_p(x, y)$. Для её расчёта необходимо знать все основные параметры радара. В определении и контроле этих параметров и заключается радиометрическая калибровка.

Часть величин, входящих в выражение (2), например мощность зондирующего сигнала, может быть определена с помощью внутренних измерителей – подобная калибровка называется внутренней. Однако с помощью внутренних средств невозможно измерить диаграмму направленности антенны и коэффициент потерь в атмосфере – для этого приходится использовать внешние средства. Следовательно, помимо внутренней калибровки существует внешняя. Внешняя радиометрическая калибровка РЛС заключается в сравнении данных, извлекаемых из РЛИ, с априорно известными радиолокационными характеристиками и координатами объектов на них, а также измерения диаграмм направленности антенны путём записи зондирующего сигнала наземным приёмником или с помощью анализа РЛИ однородных поверхностно распределённых объектов.

Представленная радиометрическая калибровка, являющаяся абсолютной, избыточна для ряда исследовательских и хозяйственных применений РЛС, которые сформулированы в статье ранее. Например, в интерферометрии достаточно знать не значения энергетических характеристик отражённого сигнала, а их относительные изменения. В частности, для оценки масштаба наводнения достаточно сравнить РЛИ местности до природной катастрофы и после её начала. С этой целью необходимо осуществить относительную калибровку, которая может быть выполнена путём сравнений участков РЛИ с высокостабильными техногенными или природными объектами с последующей коррекцией одного из них.

В случае полностью полиметрических РЛС формируются четыре РЛИ. Совокупности отдельных пикселей РЛИ являются оценками матрицы обратного рассеяния:

$$M = \begin{pmatrix} M_{hh} & M_{hv} \\ M_{vh} & M_{vv} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где M_{xy} – значение пикселя РЛИ при поляризации x на приём и y на передачу.

Формирование этой матрицы можно описать следующим образом [6, 7]:

$$M = R^T S T + N = A e^{i\phi} \begin{pmatrix} 1 & \delta_2 \\ \delta_1 & f_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \delta_3 \\ \delta_4 & f_2 \end{pmatrix} + N, \quad (4)$$

где R^T и T – матрицы искажений при приёме и передаче; S – матрица обратного рассеяния объекта; N – матрица шумов; $A e^{i\phi}$ – коэффициент усиления и фазового сдвига системы; $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$ – коэффициенты перекрёстных помех полиметрических каналов приёма и передачи, выражающихся в утечках сигналов в другие каналы; f_1 и f_2 – коэффициенты амплитудно-фазового дисбаланса каналов приёма и передачи основной поляризации.

Цель полиметрической калибровки заключается в определении шести неизвестных величин, входящих в выражение (4). Для этого необходимо использовать набор объектов, при подстановке матриц обратного рассеяния которых в выражение (4) возможно получить шесть независимых уравнений, после совместного решения которых эти величины могут быть найдены. Доказано, что для этого достаточно трёх объектов, матрицы которых имеют вид [8]:

$$S_1 = \sigma_1 \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, S_2 = \sigma_2 \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, S_3 = \sigma_3 \begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где σ_1, σ_2 и σ_3 – значения энергетических характеристик соответствующих объектов.

Необходимо отметить, что существуют и иные конфигурации базиса (5), однако они получаются в

результате линейных комбинаций исходных членов [9, 10].

В случае, если априорно известно, что матрица рассеяния исследуемого объекта обладает симметрией ($S_{vi} = S_{iv}$), то возможна полиметрическая калибровка с использованием двух объектов. Если доступен лишь один, то подобная калибровка невозможна.

В настоящее время с применением большинства полиметрических РЛС определяют лишь два компонента матрицы обратного рассеяния (основной поляризации и кроссполяризованной к зондирующему излучению). Однако описание этих систем и методы их калибровки те же, что и для полностью полиметрических РЛС [11].

За последнее десятилетие возрос интерес исследователей к космическим РЛС Р-диапазона. В этом диапазоне начинают проявляться эффекты, которыми пренебрегают для космических радаров более высоких частот. Наиболее существенный из них – эффект Фарадея, проявляющийся в повороте плоскости поляризации электромагнитной волны из-за влияния ионосферы Земли [12]. Этот эффект искажает измерения матрицы обратного рассеяния, поэтому угол поворота необходимо учитывать при обработке радиолокационных данных. В настоящее время известно, что для измерения этого угла нет необходимости в дополнительном оборудовании – с этой задачей справляется полиметрическая калибровка с использованием трёх эталонных объектов [9].

Исходя из сказанного, для калибровки РЛС необходимо иметь объекты с известными радиолокационными характеристиками и местоположениями. Для радиометрической калибровки одноканальных РЛС достаточно одного, а для полиметрических – трёх. Зачастую на практике используется большее число, поскольку помимо радиометрической калибровки необ-

ходимо осуществить геометрическую. Помимо этого, необходимо иметь средства, позволяющие определять форму диаграммы направленности антенны, которая будет скорректирована при обработке радиолокационных данных. Средства, используемые для этой задачи, рассмотрены в следующем разделе.

Средства, применяемые для калибровки РЛС

На рис. 1 приведена классификация средств, используемых для калибровки РЛС.

В качестве распределённых объектов, как правило, используют естественные природные образования с равномерным значением мощности рассеянного сигнала, например, тропические леса Амазонки [13] или тайгу. Благодаря однородности уровня рассеянного сигнала в пространстве возможно определение сечения диаграммы направленности антенны в угломестной плоскости по РЛИ. В азимутальной плоскости подобное, к сожалению, выполнить не представляется возможным.

Отражатели используются для радиометрической и геометрической калибровок. Они должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь априорно известное положение;
- обладать известными высокостабильными радиометрическими характеристиками;
- собственное значение мощности рассеянного объектом сигнала должно значительно превышать мощность фона;
- ширина диаграммы обратного излучения должна быть больше потенциального углового размера антенны.

Указанным требованиям не соответствуют металлические пластины и сферы, часто применяемые для калибровки традиционных радаров [14]. Также для

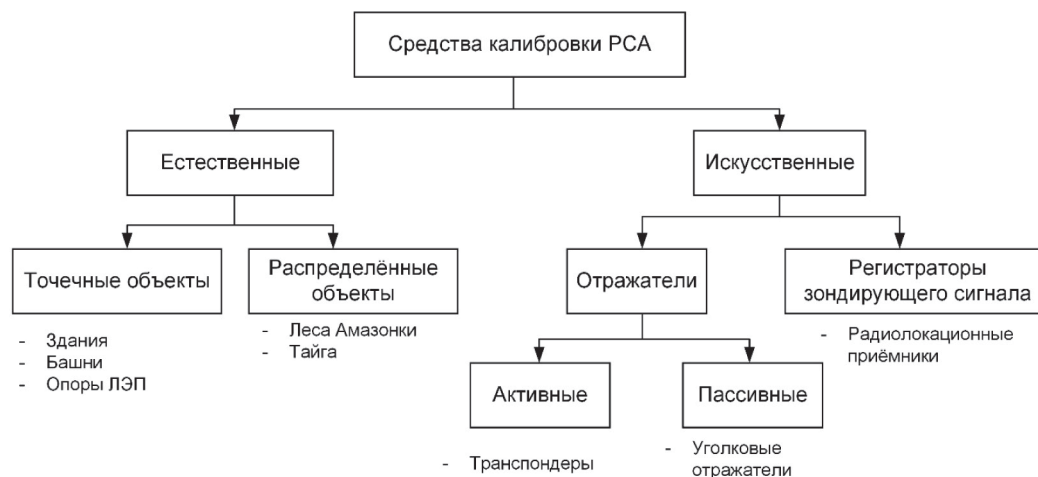


Рис. 1. Средства, применяемые для калибровки РЛС

калибровки не подходят и линзы Люнеберга из-за слишком большого требуемого размера. Приведённым требованиям удовлетворяют двугранные, трехгранные и трехгранные с металлической сеткой уголкового отражателя. Ниже приведены их поляризационные матрицы обратного рассеяния [9]:

$$S_{\text{двух.}} = A_{\text{двух.}}(\theta, \phi) \begin{pmatrix} \cos 2\psi & \sin 2\psi \\ \sin 2\psi & -\cos 2\psi \end{pmatrix}; \quad (6)$$

$$S_{\text{трех.}} = A_{\text{трех.}}(\theta, \phi) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$S_{\text{сет.}} = \frac{A_{\text{сет.}}(\theta, \phi)}{\sin^2 \phi + \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \theta} \begin{pmatrix} \sin^2 \phi & -\sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \sin \theta \\ -\sin \phi \cdot \cos \phi \cdot \sin \theta & \cos^2 \phi \cdot \sin^2 \theta \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где A – диаграмма обратного рассеяния соответствующего отражателя; θ и ϕ – азимут и угол места; ψ – угол поворота двугранного отражателя.

Из анализа выражений (6)–(8) становится ясно, что ни изменение ориентаций отражателей, ни их линейные комбинации не позволяют составить базис (5),

поскольку уголкового отражатель не может обеспечить зависимость фазы отражённой волны от её поляризации. Следовательно, подобных объектов недостаточно для осуществления полиметрической калибровки. Однако их совокупность позволяет провести геометрическую калибровку.

Помимо уголкового отражателей в качестве объектов для радиометрической калибровки можно использовать антенны больших размеров, которые были разработаны, например, для дальней космической связи [15]. Поскольку эти антенны обладают высоким коэффициентом направленного действия, их необходимо модифицировать для расширения диаграммы обратного излучения, например установив проводящий диск в фокальной плоскости апертуры.

Для осуществления полиметрической калибровки вместе с уголковыми отражателями используют АРК, осуществляющие ретрансляцию принятого зондирующего сигнала РЛС. Их уровень мощности рассеянного сигнала можно оценить, используя следующее выражение [16]:

$$\sigma = \frac{\lambda}{4\pi} G_a G_T G_R, \quad (9)$$

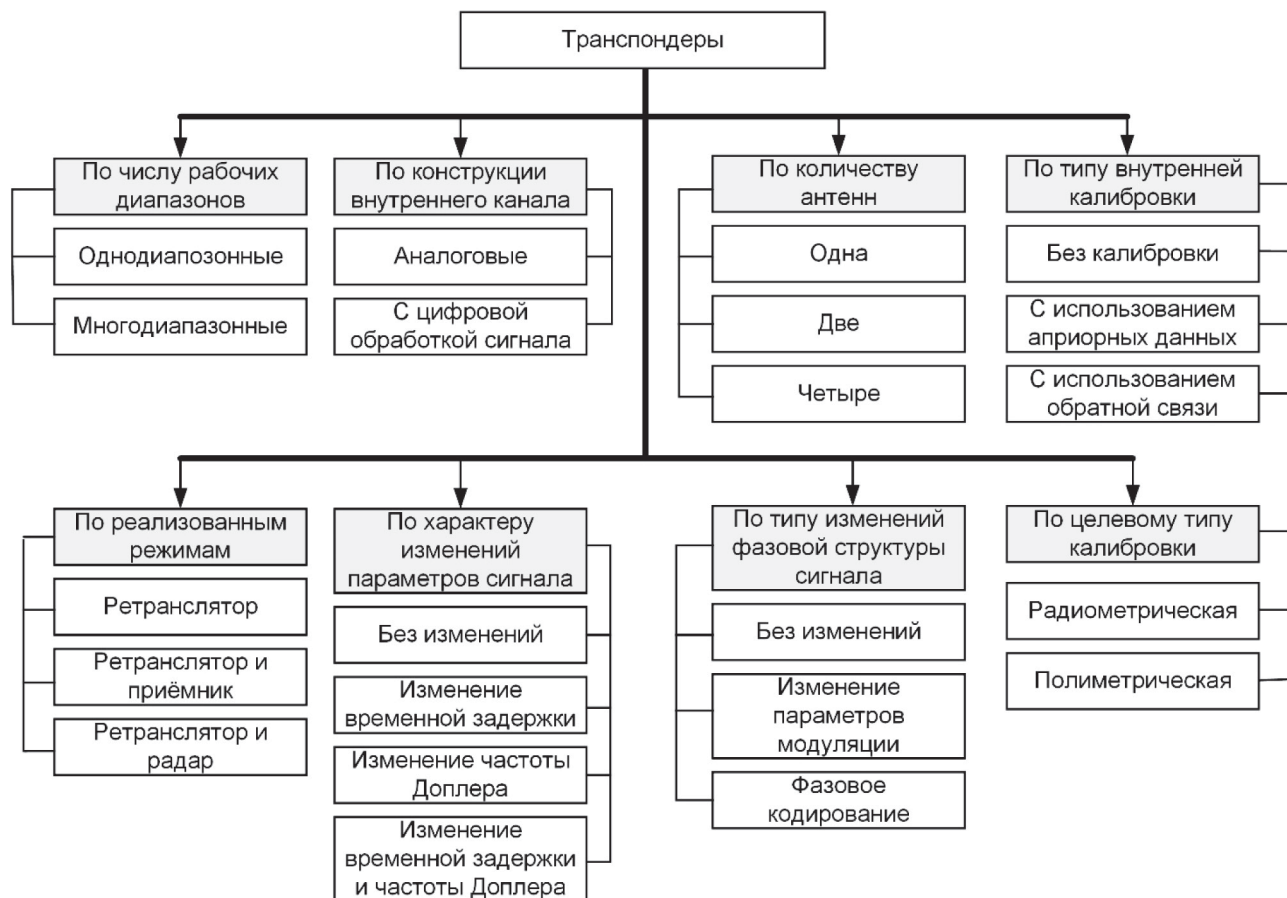


Рис. 2. Классификация конструкций транспондеров по их признакам

где G_a – коэффициент усиления электронной части системы; G_T и G_R – коэффициенты усиления приёмной и передающей антенн.

На практике мощность сигнала транспондера определяется его усилителями (G_a), а не конструкцией антенны. Поэтому энергетические характеристики подобной системы не зависят от ширины диаграммы обратного рассеяния в отличие от пассивных отражателей. Помимо этого, используя различные антенны, возможно сформировать требуемую матрицу рассеяния, что позволяет осуществлять полиметрическую калибровку. Поэтому транспондеры используются как средства калибровки практически с самых первых экспериментов в этой области [8]. Важно отметить, что в транспондерах могут быть реализованы дополнительные функции, например, регистрация зондирующего сигнала, что позволяет определить диаграмму направленности антенны РЛС в азимутальной плоскости, что очень трудно сделать с помощью пассивных средств.

Указанные факторы делают транспондер очень привлекательным средством для внешней радиометрической калибровки радаров. Поэтому представляется целесообразным использовать его в качестве основы будущих исследований. В следующем разделе представлен краткий обзор конструкций транспондеров для калибровки РЛС.

Обзор конструкций транспондеров для калибровки РЛС

На рис. 2 приведена классификация существующих конструкций транспондеров, предлагаемая авторами настоящей работы.

АРК представляет собой активное устройство, которое в наиболее простом случае излучает усиленный принятый сигнал в сторону источника. В идее транспондера лежит антенная решётка Ван Атта [17]. За счёт объединения принимающих и излучающих

элементов в одну систему и специальной их коммутации подобная антенна обладает высоким значением мощности рассеянного сигнала в широком диапазоне углов и позволяет синтезировать недостающий элемент базиса (5), однако её размеры очень велики. В работе [14] излучающие и принимающие элементы антенны Ван Атта было предложено выделить в две отдельные антенны и дополнить систему усилителями. Именно эта конструкция, схема которой приведена на рис. 3, в настоящее время называется АРК.

Подобная система позволяет синтезировать любую матрицу обратного рассеяния путём изменения ориентации антенн. Помимо усилителей в системе может использоваться и другие устройства, расширяющие функциональность. При применении двух антенн аппаратура устанавливается в один канал между ними, а для антенны Ван Атта её необходимо устанавливать в каждый канал решётки, которых может быть сотни, что усложняет проектирование подобных систем [18].

Коэффициент усиления усилителя может быть постоянным либо переменным. Второй вариант является более гибким, поскольку позволяет осуществить внутреннюю калибровку транспондера.

Тракт транспондера может быть чисто аналоговым, либо с использованием цифровой обработки сигнала. Если необходима регистрация принимаемого сигнала, например для измерения диаграммы направленности антенны РЛС, то в основной тракт устанавливается направленный ответвитель, передающий сигнал на приёмник. В некоторых случаях, например для калибровки, в состав АРК также входит передатчик.

У транспондеров может быть различное число антенн. Наиболее распространённая конструкция включает две антенны: приёмную и передающую. Однако сигнал передающей антенны просачивается в приёмную, что приводит к искажениям. Поэтому существуют конструкции, использующие одну антенну [19]. Развязка в этом случае осуществляется с помощью

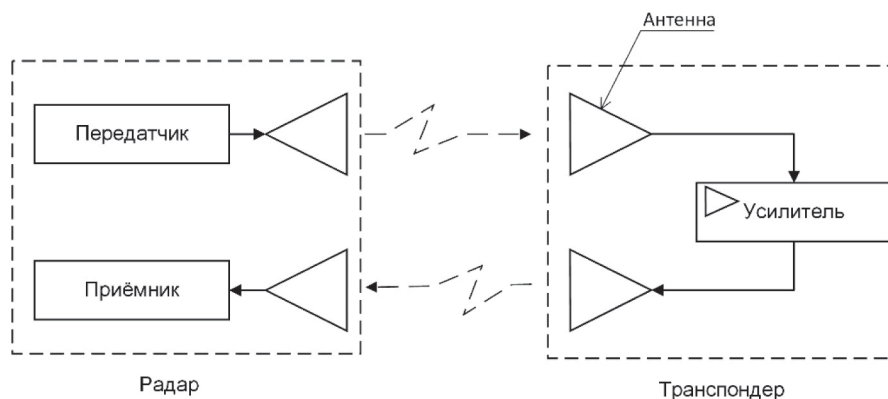


Рис. 3. Схема простейшего АРК, демонстрирующая принцип работы транспондера

ортогональных поляризаций. Встречаются варианты с четырьмя антеннами [20], позволяющие изменять поляризационную матрицу обратного рассеяния путём коммутации внутренних каналов, но они не получили широкого распространения из-за массивности антенных систем.

Для обеспечения эффективной калибровки радаров АРК также необходимо калибровать. В настоящее время получили распространение четыре метода внешней калибровки, выбор между которыми осуществляется, исходя из имеющегося оборудования и конструкции транспондера.

Первый из них предполагает измерение отдельных величин, входящих в выражение (9), что было использовано для калибровки АРК РЛС TerraSAR-X [21]. С этой целью транспондер необходимо разбирать, что ограничивает применение метода.

На практике получила широкое распространение методика, использующая радар и эталонный объект. Сначала радар измеряет мощность сигнала, отражённого от эталона с известным уровнем мощности рассеянного сигнала, а затем – калибруемого транспондера. Этот подход использовался при калибровке АРК для РЛС RADARSAT-2 [22]. Недостатком метода является необходимость использования эталона, но транспондер не требуется разбирать.

Альтернативный метод калибровки предполагает использование АРК в качестве радара. Транспондер излучает тестовый импульс в направлении объекта с известной мощностью отражённого сигнала, после чего ретранслирует усиленный отражённый сигнал. Этот принцип использовался при калибровке АРК РЛС ERS-1 [23]. Недостатками этого метода являются необходимость большого расстояния между АРК и эталонным объектом, а также трудности, связанные с развязкой антенн АРК.

Наиболее совершенным подходом для калибровки АРК является метод трёх транспондеров [24]. Он предполагает использование транспондеров как объектов калибровки, а также в качестве источников и приёмников сигналов, что накладывает некоторые ограничения на используемые конструкции. Однако эти ограничения могут быть преодолены для ряда существующих транспондеров. Авторы метода отметили, что погрешность калибровки определяется в основном точностью измерения расстояний между АРК. В случае, если необходимо откалибровать только один транспондер, можно модифицировать этот метод. В работе [25] предложено заменить два транспондера векторным анализатором цепей и уголковым отражателем с треугольными гранями.

Одним из основных дестабилизирующих факторов во время работы АРК является изменение температуры. В современных системах существует два способа уменьшения её влияния на режим работы. Первый основан на априорных знаниях о влиянии

температуры на коэффициенты усиления, что позволяет изменять режим работы усилителей в зависимости от температуры. Другой предполагает использование обратной связи, которая позволяет поддерживать мощность выходного сигнала на требуемом уровне. Второй подход получил более широкое распространение.

Современные АРК помимо усиления сигнала способны изменять его параметры и фазовую структуру. Изменение фазовой структуры заключается в преобразовании параметров модуляции сигнала, например, обращение линейной частотной модуляции [26], добавления фазовой манипуляции [27] и т. п. Благодаря этому, используя разные опорные функции при формировании РЛИ, возможно получить изображение местности без АРК, либо чистое изображение, на котором присутствует только сигнал транспондера и спекл-шум. Это увеличивает отношение сигнал/фон, необходимое для радиометрической калибровки.

Наибольший интерес среди исследователей вызывает изменение задержки сигнала и его частоты в транспондере. Изменение задержки эквивалентно смещению отклика на РЛИ по направлению наклонной дальности, а частоты – азимута. Эти изменения позволяют сместить отметку виртуального объекта в область с низкой удельной отражающей способностью фона, что снижает требования к местоположению транспондера. Он должен находиться в зоне прямой видимости РЛС, например на берегу озера, а отметка может располагаться на озере. Побочным эффектом подобного смещения является расфокусировка отметки из-за несоответствия параметров ретранслированного сигнала и опорной функции, используемой при формировании изображения.

В наиболее простом случае конструкция транспондера предоставляет возможность изменять задержку сигнала на фиксированную величину с помощью линий задержек: ультразвуковых, оптических и т. п. [23]. В более продвинутых конструкциях возможно её регулировать. Изменение частоты Доплера осуществляется с помощью гетеродинирования [28]. Поскольку частоты зондирующих сигналов РЛС, как правило, составляют единицы-десятки ГГц, а величина смещения не более единиц кГц, реализовать этот процесс с помощью одного частотного преобразования очень трудно, поэтому оно осуществляется путём переноса цифровой квадратурной обработки сигнала либо с помощью нескольких частотных преобразований.

В одной из относительно ранних работ [29] был предложен интересный вариант транспондера, в котором линия задержки включалась не в прямую цепь усилителя, а в обратную связь. В результате на РЛИ формировался ряд отметок с разными наклонными дальностями. Если в подобной системе изменять величину задержки, то можно оценить реальную разрешающую способность по дальности.

Для оценки разрешающей способности по азимуту необходимо формировать сигналы с разными смещениями частоты. Для нецифровых систем это можно сделать с помощью двух каналов. В первом канале сигнал передаётся без изменений, а во втором – частота смещается [28]. Изменяя величину смещения, можно измерить разрешение. Если необходимо несколько отметок с разным азимутом, то следует использовать цифровые системы, поскольку многоканальные полностью аналоговые транспондеры имеют большую сложность и использование их при современном уровне развития техники не имеет смысла.

Для определения разрешающей способности РЛС с использованием описанных ранее принципов, необходима серия экспериментов, что нерационально в настоящее время, поскольку, используя цифровую обработку, можно создать группу сигналов с разными значениями задержки и смещения частоты. В этом случае на РЛИ будет сформирована группа точечных откликов с различными расстояниями между друг другом. Помимо этого, возможно сформировать точечный объект на удалении от этой группы, что позволит оценить радиометрическое разрешение по боковым лепесткам этого отклика.

При изменении частоты принимаемого сигнала на постоянное значение отметка на РЛИ смещается в азимутальном направлении. Однако крутизна частотной модуляции траекторного сигнала остаётся

неизменной, что приводит к расфокусировке отметки, проявляющейся в виде расширения главного лепестка отклика и росту уровня его боковых лепестков [30]. В работе [31] оценено влияние смещения частоты в транспондере для космической РЛС L-диапазона на возможность калибровки. Было установлено, что при смещении более чем на 40 Гц применение метода радиометрической калибровки, основанного на определении максимума отклика, не представляется возможным из-за слишком больших ошибок. Поэтому возможности по изменению азимута у транспондера в значительной мере ограничены.

Влияние дополнительной задержки на качество фокусировки исследовано значительно меньше, чем смещение частоты. Одной из тенденций развития РЛС является улучшение разрешающей способности как по азимуту, так и по дальности, что требует специальных методов обработки принятых сигналов. Известно, что применение подобных методов приводит к росту влияния эффекта миграции дальности, который необходимо корректировать. Авторы одного из популярных алгоритмов коррекции CSA показали [32], что закон миграции дальности зависит от задержки сигнала. Следовательно, для каждой наклонной дальности должна использоваться своя корректирующая функция. Поэтому при дополнительной задержке используемые алгоритмы не смогут осуществить коррекцию, что проявит себя в виде

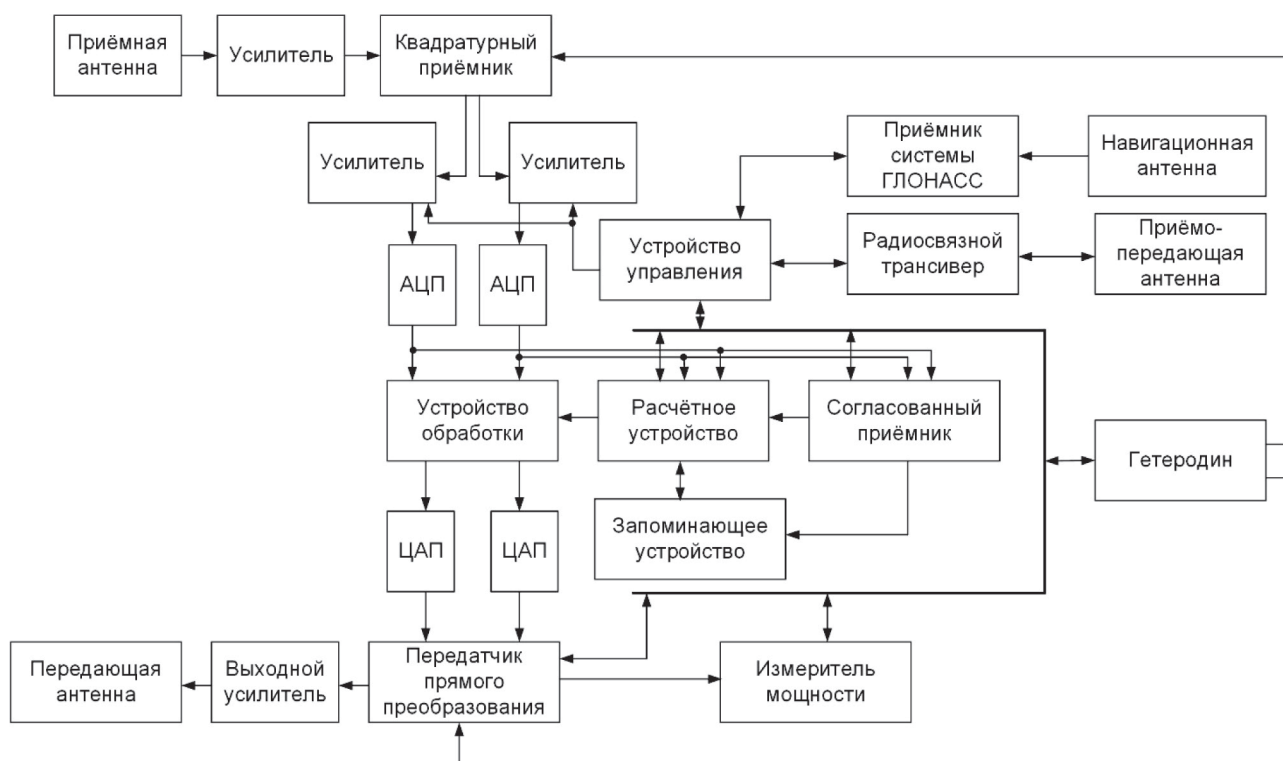


Рис. 4. Структурная схема АРК с параметрическим изменением доплеровской частоты и задержки сигнала

расширения отклика транспондера по азимуту и появления ложных отметок – на РЛИ будет дуга. Следовательно, смещение по дальности ухудшает качество формируемого изображения виртуального объекта, делая его менее пригодным для радиометрической калибровки. Однако этот вопрос требует дополнительных исследований.

Исходя из сказанного, современные АРК позволяют смещать виртуальные объекты в область с низкой отражающей способностью фона и формировать групповые объекты, что может оказаться очень полезным для калибровки РЛС. Одновременно со смещением отклика на РЛИ возникает его расфокусировка, сильно ограничивающая допустимый диапазон изменений параметров сигнала. Одним из способов решения этой проблемы является изменение задержки сигнала и его частоты Доплера не на постоянную величину, а в соответствии с некой функцией, параметры которой определяются требуемым положением виртуального объекта на РЛИ и характеристиками движения носителя РЛС. Подобный вопрос ещё не является достаточно изученным в науке. В следующем разделе рассмотрен концепт транспондера, реализующего эту идею.

Предлагаемая структура перспективного транспондера

Исходя из предпосылок, описанных в предыдущем разделе, для обеспечения качественной калибровки современных и перспективных РЛС предлагается транспондер, авторская структурная схема которого изображена на рис. 4.

Предлагаемая структура транспондера способна осуществлять все виды калибровки. Для радиометрической калибровки она ретранслирует принятый сигнал, изменяя его параметры во времени с целью

смещения отклика АРК в зону с низким уровнем отражения от фона.

Для осуществления геометрической калибровки с помощью встроенного приёмника ГЛОНАСС определяются собственные координаты транспондера. Затем с помощью известных законов изменения параметров зондирующего сигнала осуществляется расчёт географических координат виртуальных объектов, которые с помощью радиоканала передаются в центр обработки информации.

Для оценки диаграммы направленности антенны РЛС в азимутальной плоскости осуществляется запись комплексной огибающей принятого сигнала с последующей оценкой её параметров. Передавать следует именно эти параметры, оставив передачу самого сигнала в качестве сервисного режима.

Для полиметрической калибровки следует использовать сеть из трёх АРК с разными ориентациями антенн (рис. 5). Это не только обеспечит создание базиса (5), но и позволит применить метод трёх транспондеров для самокалибровки АРК. Для этого необходимо организовать радиоканалы между транспондерами. С целью экономии ресурсов каналов один из них должен взять на себя роль ведущего, управляющего процессом калибровки и взаимодействующего с пунктом управления. Два ведомых транспондера по команде ведущего переключают режимы работы между ретранслятором, приёмником и радаром, излучают необходимые сигналы и передают результаты измерений ведущему, который осуществляет обработку данных. В случае, если не требуется корректировка параметров работы транспондеров, необходимые константы сохраняются в памяти ведущего АРК и передаются на пункт управления. При необходимости ведущий транспондер передаёт команды коррекции ведомым устройствам, после чего самокалибровку следует повторить. С целью повышения надёжности комплекса можно увеличить число используемых устройств в сети.

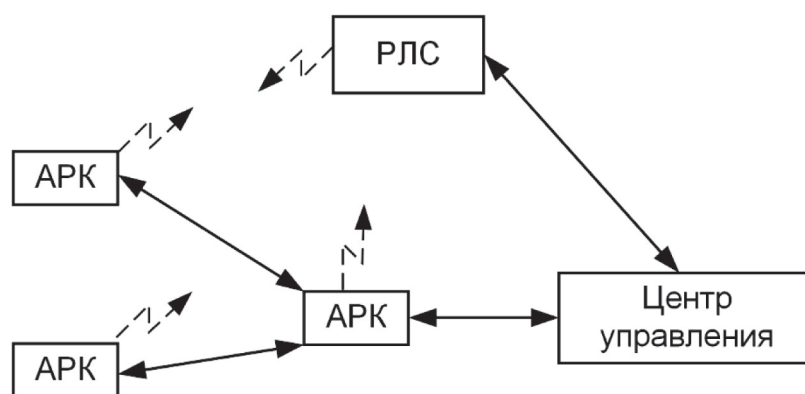


Рис. 5. Схема сети АРК

Поскольку в АРК предполагается изменять задержку сигнала и частоту Доплера во время сеанса калибровки, необходимо установить параметры используемого закона этого изменения. С этой целью перед калибровкой на АРК необходимо передать информацию о текущем режиме работы РЛС и априорные данные о движении его носителя. Во время калибровки необходимо по комплексной огибающей принятого зондирующего сигнала оценить параметры движения носителя и скорректировать коэффициенты применяемого закона.

Одновременно с этой оценкой необходимо осуществлять контроль параметров излучаемого сигнала с помощью обратной связи. С этой целью в АРК должен быть предусмотрен калибровочный контур.

Рассмотрим процесс калибровки РЛС, используя предлагаемый транспондер. Сначала центр управления формирует задание, определяющее необходимые параметры работы транспондеров и калибруемой РЛС и набор формируемых объектов. После обмена информацией между центром и РЛС определяются параметры движения носителя, которые вместе с заданием передаются на АРК. Если транспондеров несколько, то формируется сеть, которая призвана обеспечивать передачу информации между транспондерами.

Поскольку центр управления, калибруемая РЛС и АРК могут находиться на значительном удалении друг от друга, то для обеспечения связи между этими средствами следует использовать сеть космических ретрансляторов. Как показано в обзоре [33], наземные центры управления подобными сетями позволяют измерять параметры движения космических аппаратов, которые необходимы для калибровки РЛС.

После получения задания на калибровку осуществляется процесс самокалибровки АРК. Если используется сеть, то происходит внешняя калибровка с помощью метода трёх транспондеров и внутренняя – с использованием внутренних калибровочных контуров и тестовых сигналов. Если транспондер один, то осуществляется только внутренняя калибровка с целью поддержания мощности выходного сигнала на постоянном уровне. Абсолютное значение этой величины должно быть заранее определено с помощью внешних средств.

После завершения самокалибровки с помощью системы ГЛОНАСС определяются географические координаты транспондеров, которые вместе с результатами калибровки передаются в центр управления. Одновременно с этим антенны АРК поворачиваются в направлении точки ожидаемого прихода зондирующего сигнала РЛС, а также, в зависимости от необходимых видов поляризации сигнала, осуществляется поворот их плоскостей. Параллельно с этими процессами осуществляется расчёт законов изменения параметров принятого сигнала для обеспечения требуемых отметок на РЛИ.

Радиотехническая часть АРК представляет собой ретранслятор, построенный на основе программно-определяемой радиосистемы. Суть подобного подхода состоит в том, что сигнал, принимаемый приёмной антенной, усиливается предварительным усилителем, после чего из него выделяется комплексная огибающая с помощью квадратурного приёмника прямого преобразования. Сигналы квадратурных каналов усиливаются с помощью усилителей, после чего оцифровываются высокоскоростными аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). Полученный таким образом цифровой сигнал передаётся на устройство обработки с использованием программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС), на базе которой реализовано несколько устройств, а именно:

1. Расчётное устройство, которое осуществляет определение параметров корректирующих функций по априорным данным о движении и режиме работы РЛС, а также проводит их коррекцию в зависимости от принимаемого сигнала.

2. Устройство обработки, в которое вводятся коэффициенты, определённые расчётным устройством. Оно осуществляет изменение частоты принимаемого сигнала и его задержки. Это устройство является многоканальным, поскольку часто требуется создавать множество отметок на РЛИ.

3. Третье устройство представляет собой цифровой согласованный приёмник, сжимающий зондирующий сигнал. Выходной сигнал приёмника сохраняется в памяти для последующей оценки диаграммы направленности антенны РЛС, а также передаётся на расчётное устройство с целью оценки параметров движения носителя радара.

Цифровой сигнал, сформированный устройством обработки, передаётся на высокоскоростные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП), подключённые к передатчику прямого преобразования. Передатчик и приёмник АРК должны быть когерентными, поэтому они управляются одним гетеродином.

После выхода РЛС из зоны работы транспондеров либо прекращения излучения в расчётном устройстве проводится оценка параметров диаграммы направленности антенны по ранее сохранённой сжатой комплексной огибающей зондирующего сигнала. Эти параметры вместе с отчётом о результатах работы передаются в центр управления. Параллельно с этим РЛС передаёт в центр массив радиолокационных сигналов (если система работала в полиметрическом режиме, то набор массивов).

В центре управления осуществляется формирование РЛИ с учётом коррекции паразитной амплитудной модуляции траекторного сигнала диаграммой направленности антенны. Затем на изображении находятся отклики от АРК и измеряются их величины. Если система работала не в полиметрическом режиме, то определяется константа, связывающая известное значение мощности рассеянного вирту-

альным объектом сигнала с интенсивностью его РЛИ, которая впоследствии будет использоваться при вторичной обработке. В случае полиметрического режима определяется набор констант.

Геометрическая калибровка проводится после преобразования РЛИ к требуемой системе координат и его геометрической привязке к объекту с известными координатами или к одной из виртуальных отметок. Затем определяются координаты всех сформированных откликов. В случае несовпадения полученных значений с ожидаемыми осуществляется геометрическая коррекция РЛИ.

Стоит отметить, что не существует чёткого показателя качества работы подобных АРК. Поэтому достаточно трудно определить необходимый набор параметров движения носителя РЛС и требуемую точность их оценки для качественной калибровки. Принятый или выбранный показатель определяет также точность задания коэффициентов функций, согласно которым будут изменяться задержки и частоты сигналов в устройстве обработки. В следующем разделе рассмотрены существующие показатели качества, которые возможно адаптировать к предлагаемой системе калибровки.

Критерии качества системы калибровки

Естественным показателем качества работы любой системы калибровки является достижимая точность измерений в откалиброванной системе. Этот показатель трудно применить для предлагаемой структуры АРК, поскольку он включает не только работу самого транспондера, но и качество РЛС, алгоритмов формирования РЛИ и оценки мощности рассеянного сигнала от объектов на нём. Поэтому стоит ввести отдельный показатель качества работы АРК как устройства, моделирующего сигналы точечных объектов.

Предполагается, что разработчик всего комплекса ДЗЗ предоставит информацию о необходимой точности измерений, на основании которой будет определён требуемый диапазон допустимых значений предложенного параметра. А также он определит требуемую точность оценки характеристик движения носителя РЛС и необходимый закон изменения параметров сигнала в транспондере и точность его коэффициентов.

Поскольку транспондер имитирует точечный объект, формируемый отклик на РЛИ стремится к импульсной характеристике системы. Следовательно, качество работы АРК можно оценить по параметрам этой характеристики: ширине основного лепестка, относительном уровне первого бокового лепестка, интегральном уровне боковых лепестков и т. п., как это делают в оценках влияния смещения частоты Доплера сигнала на РЛИ, формируемое транспондером [34]. Подобный подход является одномерным и не учитывает искажения, обусловленные задержкой сигнала. Его можно адаптировать для двумерного

случая, рассматривая не только азимутальное сечение РЛИ, но и дальностное, введя количественные оценки искажений, обусловленные коррекцией миграции дальности. Однако в этом случае придётся рассматривать большой набор связанных между собой параметров, установление зависимостей между которыми является сложной задачей. Это усложняет построение целевой функции, поэтому для предлагаемой концепции АРК подобный подход не применим.

Альтернативным вариантом является применение методики оценки качества формирования виртуальных объектов транспондерами, предложенная в работе [35]. Она основана на определении вероятностей правильного обнаружения или пропуска виртуального объекта. Методика хорошо подходит для оценки качества воспроизведения РЛИ реального объекта с помощью транспондеров, но она разработана для групповых объектов. Практика показывает, что обнаружить на РЛИ яркий точечный объект не является сложной задачей даже при значительной расфокусировке. Поэтому эта методика не даст полное представление о качестве воспроизведения точечного объекта, используемого для радиометрической калибровки.

Исходя из сказанного, можно сделать вывод, что для разработки нового типа транспондера необходимо обоснование нового показателя качества имитации точечного объекта и его анализ при изменении временной задержки и частоты Доплера. Без этого показателя выбор функции, по которой будет осуществляться это изменение, не представляется возможным.

Направления дальнейших работ

В предыдущем разделе было показано, что для дальнейшей работы необходимо обосновать новый показатель качества работы АРК. Для его определения необходим анализ РЛИ, сформированных транспондером и РЛС. Поэтому дальнейшая работа будет сосредоточена на создании математических моделей этих систем, на выходе которых будут сформированы массивы радиолокационных сигналов для различных задержек зондирующего сигнала и смещения его частоты. Формирование РЛИ будет осуществлено с помощью уже существующих алгоритмов. После обоснования показателя будет проведён выбор функции преобразования сигнала и необходимого набора параметров с требуемой точностью их измерений. На завершающем этапе работы будет сформулирована методика калибровки перспективных РЛС и требования к транспондерам, а также алгоритмы управления ими.

Заключение

В XXI веке РЛС совершили огромный скачок в своём развитии, чего нельзя сказать о методах

активной калибровки. Современные транспонеры позволяют смещать отклик на РЛИ в области с низким уровнем сигнала от фона, что снижает требования к местам их установки. Поэтому они могут быть развернуты, например, на временных взлётно-посадочных полосах крайнего Севера для наблюдения из космоса. Однако с улучшением разрешающей способности РЛС уменьшается допустимый диапазон смещения, поскольку точечное РЛИ расфокусируется и перестаёт быть пригодным для калибровки. Был предложен концепт перспективного транспонера, устраняющий эту проблему за счёт изменений задержки и частоты ретранслируемого транспондером сигнала во времени, согласно некоторой функции. Эта концепция является новой для науки и техники, поэтому для её реализации необходимо провести некоторые дополнительные исследования, главным из которых является обоснование показателя качества работы нового класса АРК. Эти исследования планируются к проведению в рамках дальнейшей работы.

Литература

1. Subsurface Valleys and Geoarcheology of the Eastern Sahara Revealed by Shuttle Radar / J.F. McCauley, G.G. Schaber, C.S. Breed [et al.] // *Science*. – 1982. – Vol. 218, No. 4576. – P. 1004–1020.
2. SAR data applications in earth observation: An overview / A. Tsokas, M. Rysz, P.M. Pardalos, K. Dipple // *Expert Systems with Applications*. – 2022. – Vol. 205. – P. 117342.
3. An Improved Geometric Calibration Model for Spaceborne SAR Systems With a Case Study of Large-Scale Gaofen-3 Images / Y. Feng, Z. Lei, X. Tong [et al.] // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 15. – P. 6928–6942.
4. Freeman, A. SAR calibration: an overview / A. Freeman // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1992. – Vol. 30, No. 6. – P. 1107–1121.
5. NESZ Estimation and Calibration for Gaofen-3 Polarimetric Products by the Minimum Noise Envelope Estimator / L. Shi, L. Yang, L. Zhao [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 59, No. 9. – P. 7517–7534.
6. Freeman, A. A new system model for radar polarimeters / A. Freeman // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1991. – Vol. 29, No. 5. – P. 761–767.
7. Van Zyl, J. J. Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflector responses / J.J. Van Zyl // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1990. – Vol. 28, No. 3. – P. 337–348.
8. Freeman, A. Polarimetric SAR calibration experiment using active radar calibrators / A. Freeman, Y. Shen, C.L. Werner // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1990. – Vol. 28, No. 2. – P. 224–240.
9. Chen, J. Calibration of Spaceborne CTLR Compact Polarimetric Low-Frequency SAR Using Mixed Radar Calibrators / J. Chen, S. Quegan // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 49, No. 7. – P. 2712–2723.
10. Fujita, M. Polarimetric calibration of space SAR data subject to faraday rotation – a three-target approach / M. Fujita // *Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '05*. – P. 5497–5500.
11. A general polarimetric radar calibration technique / M.W. Whitt, F.T. Ulaby, P. Polatin, V.V. Liepa // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1991. – Vol. 39, No. 1. – P. 62–67.
12. Revisiting the conducting of measurements from the board of International Space Station by decimeter synthetic aperture radar system / A.A. Kalinkevich, B.G. Kutuzov, V.Yu. Manakov [et al.] // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1632, No. 1. – P. 012015.
13. Hawkins, R. K. Determination of antenna elevation pattern for airborne SAR using the rough target approach / R.K. Hawkins // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1990. – Vol. 28, No. 5. – P. 896–905.
14. Brunfeldt, D. R. Active Reflector for Radar Calibration / D.R. Brunfeldt, F.T. Ulaby // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1984. – Vol. GE-22, No. 2. – P. 165–169.
15. On the stability of large antennas as calibration targets / A. Zakharov, P.A. Zherdev, M.M. Borisov [et al.] // *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium : proceedings*. – 2003. – Vol. 7. – P. 4518–4520.
16. Design and Implementation of a Novel Polarimetric Active Radar Calibrator for Gaofen-3 SAR / L. Li, Y. Zhu, J. Hong [et al.] // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, No. 8. – P. 2620.
17. Larsen, T. Reflector arrays / T. Larsen // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1966. – Vol. 14, No. 6. – P. 689–693.
18. Fujita, M. Development of a Retrodirective PARC for ALOS/PALSAR Calibration / M. Fujita // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 41, No. 10. – P. 2177–2186.
19. Ahne, J. J. Design and implementation of single antenna polarimetric active radar calibrators / J.J. Ahne, K. Sarabandi, F.T. Ulaby // *Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. – P. 1280–1283.
20. Development of active transponder for KOMPSAT-5 mission / D. Park, S. Ahn, Y. Chun [et al.] // *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR) Proceedings*. – 2011. – P. 1–4.
21. Absolute Radiometric Calibration of TerraSAR-X-Approach and Ground Targets / B.J. Döring, D. Schrank, M. Schwerdt, R. Bauer // *German Microwave Conference*. – VDE, 2008.
22. Foged, L. J. Facility comparison campaigns within EurAPP / L.J. Foged, M. Sierra-Castaner, L. Scialacqua // *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation, EUCAP (Rome, Italy, 2011)*. – 2011. – P. 2541–2545.
23. Jackson, H. D. Development of the ERS-1 active radar calibration unit / H.D. Jackson, A. Woode // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 1992. – Vol. 40, No. 6. – P. 1063–1069.
24. The three-transponder method: a novel method for accurate transponder RCS calibration / B.J. Döring,

J. Reimann, S. Raab [et al.] // Progress In Electromagnetics Research B. – 2014. – Vol. 61. – P. 297–315.

25. Highly Accurate Radar Cross-Section and Transfer Function Measurement of a Digital Calibration Transponder without Known Reference – Part I: Measurement and Results / J. Reimann, A.M. Вьchner, S. Raab [et al.] // Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – P. 1153.

26. Liang, L. Study on digital coded technology in active radar calibrator of SAR / L. Liang, H. Jun, M. Feng // 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Munich, Germany, 2012). – 2012. – P. 4509–4512.

27. Hounam, D. A technique for the identification and localization of SAR targets using encoding transponders / D. Hounam, K.-H. Wagel // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 39, No. 1. – P. 3–7.

28. Fujita, M. Development Of A Frequency Offsetting Arc / M. Fujita // IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management : proceedings (Espoo, Finland, 1991). – 1991. – Vol. 2. – P. 1023–1025.

29. Daleman, P. S. Experience With Active Radar Calibrators For Airborne Sar / P.S. Daleman, R.K. Hawkins, T.I. Lukowski // 10th Annual International Symposium on Geoscience and Remote Sensing (College Park, MD, USA, 1990). – P. 795–798.

30. Pieraccini, M. Cross-Pol Transponder with Frequency Shifter for Bistatic Ground-Based Synthetic Aperture Radar / M. Pieraccini, L. Miccinesi // Remote Sensing. – 2018. – Vol. 10, No. 9. – P. 1364.

31. Shimada, M. SAR calibration using frequency-tunable active radar calibrators / M. Shimada, H. Oaku, M. Nakai // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1999. – Vol. 37, No. 1. – P. 564–573.

32. Precision SAR Processing Using Chirp Scaling / R.K. Raney, H. Runge, R. Bamler [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1994. – Vol. 32, No. 4. – P. 786–799.

33. Пантенков, Д. Г. Обзор современного состояния орбитальных группировок космических аппаратов дистанционного зондирования земли и космических ретрансляторов / Д.Г. Пантенков, Н.В. Гусаков, А.А. Ломакин // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2022. – Т. 27, № 1. – С. 120–149.

34. Shift-Frequency Jamming Imaging and Analysis Based on Active Radar Calibrator / G. Liu, L. Li, J. Hong, F. Ming // 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (Brussels, Belgium, 2021). – 2021. – P. 3948–3951.

35. Гусев, С. Н. Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях / С.Н. Гусев, И.В. Сахно, Р.В. Хуббиев // Труды МАИ. – 2019. – № 104. – С. 10.