

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ И СИСТЕМ / RESEARCH AND DEVELOPMENT OF RADIO-ELECTRONIC EQUIPMENT AND SYSTEMS

DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-2-8-17
УДК 621.317.08

Методы и средства верификации параметров радиочастотных локаторов

Я.Г. Ибрагимова¹, О.А. Терешенкова¹, А.А. Ким^{1, 2}, В.С. Лугиня^{1, 2}

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

² АО «Лазерные системы», Санкт-Петербург, Россия

Радиочастотные локаторы, или радиолокаторы, являются одними из наиболее распространенных и эффективных средств дистанционного зондирования атмосферы с целью обнаружения и распознавания удаленных объектов, измерения их динамических параметров или исследования свойств самой атмосферы. Большой интерес представляют методы и средства верификации их эксплуатационных параметров, поскольку специфика работы радиолокаторов в большинстве случаев делает затруднительной их верификацию ввиду невозможности создания эталонной атмосферной трассы. На сегодняшний день не существует единой методики оценки контроля основных эксплуатационных параметров радиолокаторов. Используемые методы и технические средства зачастую сложны в реализации, имеют узкий спектр применений и требуют подтверждения собственных характеристик. В статье представляется классификация и результаты анализа известных методов и технических средств верификации эксплуатационных параметров радиочастотных локаторов. На основании анализа приводятся рекомендации по выбору подхода к проведению верификационных мероприятий в зависимости от типа радиолокатора.

Ключевые слова: радиочастотный локатор, верификация параметров, калибровка, имитатор цели, радиочастотное зондирование

Для цитирования:

Методы и средства верификации параметров радиочастотных локаторов / Я.Г. Ибрагимова, О.А. Терешенкова, А.А. Ким, В.С. Лугиня // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 2. С. 8–17. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-2-8-17

© Ибрагимова Я.Г., Терешенкова О.А., Ким А.А., Лугиня В.С., 2020



Methods and tools for radio frequency locators parameters verification

Ya. G. Ibragimova¹, O. A. Tereshenkova¹, A. A. Kim^{1, 2}, V. S. Luginya^{1, 2}

¹ State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, Saint Petersburg, Russia

² Laser Systems JSC, Saint Petersburg, Russia

Radio frequency locators, or radars, are one of the most common and effective devices of remote sensing of the atmosphere which are used to detect and recognize distant objects, measure their dynamic parameters, or research the properties of the atmosphere. The methods and tools for verifying their operational parameters are of great interest, since the specificity of the radar in most cases makes it difficult to verify them due to the impossibility of creating a reference atmospheric path. To date, there is no single methodology for assessing the control of the basic operational parameters of radars. The methods and technical tools used are often difficult to implement, have a narrow range of applications and require confirmation of their own characteristics. The article presents the classification and analysis results of existing methods and technical tools of radio frequency locators operational parameters verification. Based on the analysis, recommendations for choosing an approach to conducting verification measures depending on the type of radar are given.

Keywords: radio frequency locator, parameter verification, calibration, target simulator, radiofrequency sounding

For citation:

Ibragimova Ya. G., Tereshenkova O. A., Kim A. A., Luginya V. S. Methods and tools for radio frequency locators parameters verification. Radio industry (Russia), 2020, vol. 30, no. 2, pp. 8–17. (In Russian). DOI: 10.21778/2413-9599-2019-30-2-8-17

Введение

Оценка эксплуатационных характеристик радиочастотных локационных систем (РЛС) является неотъемлемой частью их производства и эксплуатации. Однако подтверждение характеристик оказывается достаточно сложной задачей, до сих пор не имеющей универсального и комплексного решения. Подтверждение соответствия заявленным характеристикам и определение погрешностей измерений может производиться либо при измерении некоторых эталонных величин, либо при сравнении с эталонным измерительным устройством. В случае РЛС речь идет либо о создании эталонной атмосферной трассы большой протяженности, содержащей эталонные цели, либо об эталонном референсном измерителе, обладающим существенно большей точностью по сравнению с испытуемым радаром. Первый путь решения задачи оказывается достаточно трудоемким и дорогим, иногда даже нереализуемым; второй требует наличия эталонного измерителя, что также далеко не всегда возможно. Эти принципиальные трудности приводят к тому, что для каждой модели РЛС может существовать своя собственная методика и средства оценки ее характеристик, предлагаемые производителем. Более того, эти методики существенно различаются в зависимости от типа и принципа действия РЛС. Но даже несмотря на это, в большинстве случаев радиолокаторы классифицируются как средства индикации, а не средства измерения. Это в меньшей

степени характерно для РЛС – измерителей расстояния и в большей для доплеровских радаров (ДРЛС) и особенно – метеорологических РЛС (далее – метеолокаторов).

Классификация методов верификации параметров радиочастотных локаторов

Оценка эксплуатационных характеристик на предмет соответствия заявленным параметрам производится с учетом индивидуальных особенностей функционирования РЛС. Простейший импульсный радар, работающий по времяпролетному принципу, является измерителем расстояния до одного или множества удаленных объектов, о размере и свойствах которых можно судить косвенно по интенсивности обратно отраженного сигнала. Определение их скорости и направления движения возможно лишь дифференциальным методом при анализе относительного положения объекта в различные моменты времени. В более сложной реализации РЛС также обеспечивает измерение доплеровского смещения частоты при отражении зондирующего излучения от объектов, имеющих ненулевую проекцию вектора скорости на ось зондирования. Это позволяет судить о скорости приближения или удаления объекта; в некоторых случаях ДРЛС способны также классифицировать тип объекта по вторичным признакам цели. Введение модуляции зондирующего излучения, например линейной частотной модуляции (ЛЧМ), позволяет

добиться существенного улучшения характеристик, однако может усложнить процедуру их верификации. В отдельный тип РЛС можно выделить так называемые метеорологические радары, которые по сути являются профилометрами обратного атмосферного рассеяния в радиодиапазоне. В отличие от (Д)РЛС, работающих по твердым локальным целям, метеолокаторы должны обеспечивать обнаружение распределенных атмосферных образований и оценку их параметров. Доплеровские модели метеолокаторов обеспечивают также измерение величины радиальной проекции скорости ветра и построение ее пространственного профиля. Обычно для метеорологических целей используются частоты X , K_u и K_a диапазонов. Условная классификация радиочастотных локаторов приведена в табл. 1.

Первичные измеряемые параметры для всех РЛС по сути являются пространственно-временными, в то время как вторичные данные являются более сложными и комплексными характеристиками, получаемыми в результате аппаратной

и программно-алгоритмической обработки. Таким образом, верификация первичных параметров РЛС является минимально необходимой, но далеко не всегда достаточной.

В настоящее время все методы верификации первичных эксплуатационных параметров РЛС можно условно разделить на четыре группы:

- создание атмосферной трассы, обладающей некоторыми свойствами эталона,
- сравнение с эталонным измерительным устройством,
- применение так называемого имитатора цели;
- комбинированные методы.

В табл. 2 приведена классификация методов верификации в зависимости от вида РЛС.

Данная классификация носит условный характер, поскольку каждая методика, тип и состав средств верификации параметров РЛС определяется их видом, техническими характеристиками, условиями эксплуатации и т. д.

Таблица 1. Классификация радиочастотных локаторов по типу

Table 1. Classification of radiofrequency locators by type

	Тип локатора / Locator type			
	РЛС обнаружения объектов / Object detection radars		Метеорологические РЛС / Weather radars	
Вид радиолокатора / Type of radar	РЛС измерения расстояния до объекта / Radar measuring the distance to the object	ДРЛС измерения расстояния и скорости объекта / Doppler radar measuring the distance and speed of an object	Метеорологическая РЛС (профилометр обратного рассеяния) / Meteorological radar (backscatter profilometer)	Метеорологическая ДРЛС / Doppler meteorological radar
Первичные измеряемые параметры / Primary measured parameters	Расстояние до объекта / Distance to the object	Расстояние до объекта, радиальная скорость объекта / Distance to the object, radial speed of the object	Профиль обратного рассеяния атмосферы в радиодиапазоне / Radio backscatter profile in the radio range	Профиль обратного рассеяния, радиальная скорость движения воздушных масс / Backscatter profile, the radial velocity of air masses
Вторичные измеряемые параметры / Secondary measured parameters	Координаты объекта в пространстве, точность слежения / Coordinates of the object in space, tracking accuracy	Координаты объекта в пространстве, точность слежения, точность распознавания / Coordinates of the object in space, tracking accuracy, recognition accuracy	Количество и плотность облачных слоев, нижняя граница облачности и т. д. / The number and density of cloud layers, the lower limit of cloud cover, etc.	Количество и плотность облачных слоев, нижняя граница облачности, опасные метеоявления: сдвиг ветра, шторм и т. д. / The number and density of cloud layers, the lower limit of cloud cover, hazardous meteorological phenomena: wind shear, storm, etc.

Таблица 2. Классификация методов верификации первичных параметров радиочастотных локаторов

Table 2. Classification of verification methods for the primary parameters of radiofrequency locators

Метод верификации / Verification method	Виды радиолокаторов / Types of radars	Преимущества / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Трассовый метод / Track method	РЛС измерения расстояния до объекта, реже – ДРЛС измерения расстояния и скорости объекта / Radar measuring the distance to the object, less often – Doppler radar measuring the distance and speed of the object	Высокая достоверность метода и точность измерений расстояний / High reliability of the method and accuracy of distance measurements	Большая трудоемкость проведения испытания, необходимость организации атмосферной трассы, обладающей свойствами эталона длины, ограниченный диапазон расстояний, необходимость снятия с эксплуатации / The great complexity of the test, the need to organize an atmospheric route with the properties of a length standard, a limited range of distances, the need for decommissioning
Эталонное измерительное устройство / Reference measuring device	РЛС измерения расстояния до объекта, ДРЛС измерения расстояния и скорости объекта, метеорологическая РЛС, метеорологическая ДРЛС / Radar measuring the distance to the object, Doppler radar measuring the distance and speed of the object, meteorological radar, meteorological Doppler radar	Простота проведения испытаний / Simplicity of testing	Необходимость наличия эталонного измерителя, средняя или низкая достоверность метода (при использовании измерителей иного типа), геометрический фактор / The need for a reference meter, the average or low reliability of the method (when using meters of a different type), the geometric factor
Имитатор цели / Target simulator	ДРЛС измерения расстояния и скорости объекта, метеорологическая РЛС, метеорологическая ДРЛС / Doppler radar measuring the distance and speed of the object, meteorological radar, meteorological Doppler radar	Простота проведения испытаний, возможность имитации различных параметров цели и атмосферной трассы / The simplicity of testing, the ability to simulate various parameters of the target and the atmospheric path	Низкая достоверность метода (требуется верификация параметров самого имитатора цели), сложности создания, ограниченный набор имитируемых параметров / Low reliability of the method (verification of the parameters of the target simulator itself is required), the complexity of creation, a limited set of simulated parameters
Комбинированные методы / Combined methods	РЛС измерения расстояния до объекта, ДРЛС измерения расстояния и скорости объекта, метеорологическая РЛС, метеорологическая ДРЛС / Radar measuring the distance to the object, Doppler radar measuring the distance and speed of the object, meteorological radar, Doppler meteorological radar	Сочетание преимуществ различных методов / The combination of advantages of various methods	Большая трудоемкость проведения испытаний, высокая стоимость, ограниченная применимость конкретной реализации метода, обусловленная спецификой испытываемого радиолокатора / The high complexity of testing, high cost, limited applicability of a particular implementation of the method due to the specifics of the tested radar

Рассмотрение принципов функционирования активных радиочастотных локационных систем позволяет говорить, что комплексная верификация их первичных характеристик сводится к созданию такого радиочастотного сигнала на приемнике РЛС, который был бы эквивалентен сигналу, полученному из атмосферной линии, зондируемой контролируемым радаром и обладающей свойствами эталона. Распространение зондирующего импульса можно охарактеризовать временной задержкой между моментом излучения и отражения, его энергетикой, обусловленной расстоянием и свойствами цели, временным уширением (в случае отражения от распределенных объектов), а также частотным смещением вследствие эффекта Доплера. Для комплексной верификации параметров РЛС необходимо обеспечение всех этих условий.

Трассовые методы верификации параметров радиочастотных локационных систем

Для верификации характеристик РЛС, работающих в режиме измерения расстояний до объектов, обычно используются трассовые методы. К ним можно отнести те, в основе которых лежит использование реальной атмосферной трассы большой протяженности, в которой на известных расстояниях могут располагаться один или несколько отражающих объектов. Обычно для этих целей используются геодезические или радиолокационные полигоны, содержащие эталонные базисы [1]. Верификация заключается в сравнении результатов

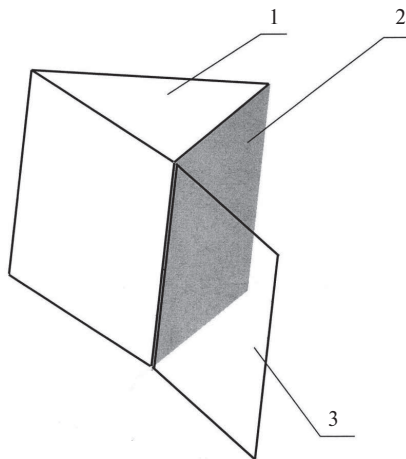


Рисунок 1. Устройство космического аппарата – радиомишени: 1 – прямая призма; 2 – грань с радиоотражающей поверхностью; 3 – прямоугольная пластина из радиоотражающего материала
Figure 1. Configuration of the spacecraft – radio target: 1 – direct prism; 2 – edge with a radio-reflecting surface; 3 – a rectangular plate of radio-reflective material

измерений, полученных радаром, с соответствующими эталонными базисами, которые содержит полигон. Для контроля слепой зоны и пространственного разрешения могут использоваться мишени в ближней зоне, устанавливаемые на заданные расстояния.

Методика с применением радиолокационных полигонов с радиомишенями используется для верификации и калибровки РЛС с синтезированной апертурой. Она позволяет обеспечить высокое пространственное разрешение и высокую радиометрическую разрешающую способность. Верификация разрешающей способности основывается на методе импульсного отклика: разрешающая способность определяется по ширине сечений радиолокационных изображений точечной цели. Для большей точности обычно производится интерполяция дискретного изображения. Результаты измерений привязывают к масштабу на местности.

При большой дальности зондирования или невозможности использования сертифицированных геодезических и радиолокационных полигонов зачастую в качестве таких полигонов используют подходящие открытые пространства, размещая радиомишени на требуемых удалениях в соответствии с показаниями систем GPS или ГЛОНАСС, однако такой подход зачастую не позволяет считать эти расстояния эталонными базисами.

К трассовым методам также можно отнести и те, где в качестве радиомишени используется подвижный объект с известной эффективной площадью рассеяния (ЭПР). Это может быть автомобиль, беспилотный летательный аппарат или даже космический аппарат. Так, например, в работе [2] в качестве радиомишени (рис. 1) предлагается использовать космический аппарат (КА), имеющий форму прямой призмы (1), одна сторона которой выполнена из радиоотражающего материала (2). Также корпус КА оснащен еще одной радиоотражающей поверхностью (3), закрепленной на шарнирах так, что ось поворота отражателя параллельна боковому ребру призмы. Ребро призмы и пластина образуют угловой отражатель с известной ЭПР.

Амплитуды отраженных от углового отражателя сигналов принимаются и пересчитываются в относительную мощность и с помощью формулы (1) сводятся к фиксированной дальности, а затем усредняются по формуле (2).

$$P_i = B_i + 40 \log \frac{R_i}{R_f}, \quad (1)$$

где B_i – единичное измеренное значение относительной мощности отраженного сигнала, R_i – единичное измеренное значение наклонной дальности до КА для данного B_i , R_f – величина фиксированной дальности.

$$P_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

где n – число результатов единичных измерений на интервале времени между входом КА в зону видимости РЛС и выходом из нее.

Полученную величину P_{cp} принимают в качестве относительной мощности отраженных сигналов, соответствующей эталонному значению ЭПР УО. За счет известной скорости и положения КА в пространстве, по мнению автора, достигается высокая точность метода при верификации характеристик РЛС.

Трассовые методы, в т.ч. применяемые с подвижными радиомишенями, могут быть использованы для верификации характеристик радиочастотных локационных систем измерения расстояния до объекта и ДРЛС измерения расстояния и скорости объекта, ограниченно и в крайне редких случаях – для метеорологических (Д)РЛС.

Несмотря на высокую достоверность и достаточную точность трассовых методов, они обладают существенными недостатками, ограничивающими их применение, например: сложности проведения испытаний и создания эталонной трассы, необходимость снятия радиочастотных локационных систем с эксплуатации для испытаний, ограниченный диапазон расстояний, крайне ограниченная применимость метеорологических (Д)РЛС.

Верификация параметров радиочастотных локационных систем с применением эталонного измерительного устройства

Методы верификации первичных эксплуатационных характеристик РЛС путем сравнения с эталонными измерителями можно считать самыми простыми с точки зрения реализации, однако, согласно метрологическим правилам, эталонный измеритель должен обладать как минимум в 3 раза (чаще – в 10 раз) более высокой точностью по сравнению с поверяемым устройством. Это условие зачастую не может быть выполнено по причине отсутствия подходящих эталонных измерителей. В отличие от трассовых, рассматриваемые методы в большей степени применимы для метеорологических радиочастотных локационных систем и ДРЛС: профилометров обратного рассеяния, доплеровских радиолокаторов профилей ветра (ДРПВ) и т.п., однако могут применяться и для РЛС и ДРЛС, работающих по твердым целям.

Авторами работы [3] описывается способ оценки точности метеорологического доплеровского радиолокатора профилей ветра, основывающийся на измерении скорости и направления ветра, который производится с помощью испытываемого ДРПВ и эталонного метеосредства, состоящего из пары

аналогичных радиозондовых радиолокационных метеокомплексов (РРМК) с радиозондами (РЗ). Полученная информация для каждой исследуемой высоты поступает на вычислитель, в котором оценивается, насколько точными являются измерения ДРПВ. На рис. 2 представлена схема проведения измерений.

Точность измерения параметров ветра определяют по зависимости

$$S_{Xd} = \sqrt{\frac{S_{Xdлв}^2 - S_{Xавр}^2}{4}}, \quad (3)$$

где S_{Xd} – средняя квадратичная погрешность доплеровского радиолокатора профилей ветра в измерении скорости и направления ветра, $S_{Xdлв}$ – среднее квадратичное значение разности результатов измерений параметров ветра ДРПВ и усредненных значений эталонного метеосредства, $S_{Xавр}$ – среднее квадратичное значение разности в измерении параметров ветра между двумя эталонными метеосредствами, через которое определяют систематическую погрешность в измерении скорости и направления ветра ДРПВ согласно зависимости

$$M(X_d - X_{авр}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{Di} - X_{аврi}), \quad (4)$$

где $M(X_d - X_{авр})$ – оценка математического ожидания разностей результатов синхронных измерений ДРПВ (X_{Di}) и усредненных значений результатов измерений параметров ветра пары метеокомплексов ($X_{аврi}$), для каждого стандартного уровня высоты

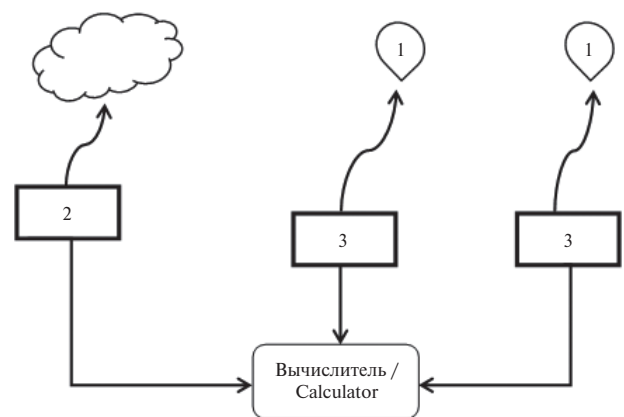


Рисунок 2. Схема реализации метода оценки точности доплеровского радиолокатора профилей ветра [3]: 1 – радиозонд; 2 – доплеровский радиолокатор профилей ветра; 3 – радиозондовый радиолокационный метеокомплекс

Figure 2. Scheme of the implementation of the method for assessing the accuracy of the wind profile Doppler radar [3]: 1 – radiosonde; 2 – Doppler radar the wind profiles; 3 – radiosonde weather complex

вводят соответствующие корректирующие поправки $M(X_d - X_{авр})$ с обратным знаком.

Использование в составе эталонного метеосредства двух РРМК обусловлено стремлением повысить точность метода. Данный способ позволяет провести оценку точности параметров ДРПВ, а также оценить его систематическую погрешность в измерении ветровых параметров для каждой исследуемой высоты, однако использование радиозондового метеоконкомплекса ограничивается метеоусловиями, что затрудняет проведение испытаний. Кроме того, доплеровские радиолокаторы профилей ветра и РРМК не являются аналогичными по принципу работы устройствами, что не позволяет говорить о полной достоверности метода. Также не исключен и геометрический фактор, поскольку фактические замеры скорости ветра доплеровскими радиолокаторами профилей ветра и РРМК происходят в разных точках пространства.

В качестве эталонных измерителей при верификации основных параметров метеорологических ДРЛС в настоящее время чаще всего используются различные метеовышки с установленными на них измерительными устройствами. Так, например, высотная метеорологическая мачта (ВММ) ВММ-310, ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Обнинск [4], имеющая высоту 310 метров, оснащенная множеством датчиков на 13 высотах, в т. ч. скорости и направления ветра, используется для верификации параметров метеорологических РЛС, ДРЛС, а также метеорологических лидаров [5] и др. Аналогичные комплексы существуют по всему миру.

Как и в случае с метеозондами, такой метод не может исключить геометрический фактор измерений. Более существенным недостатком является ограниченная высота высотной метеорологической мачты, что делает ее практически неприменимой для верификации характеристик РЛС.

Как альтернатива ВММ и радиозондам в качестве эталонного измерителя может быть использован доплеровский лидар, однако в настоящее время лишь единицы сертифицированы как средства измерения и обладают сравнимой, но не превосходящей точностью. Более того, существенное различие между оптическим и радиочастотным диапазонами ограничивает метеоусловия совместного применения лидара и метеорологического РЛС.

Верификация параметров радиочастотных локационных систем с применением имитатора цели

Данный тип методов является весьма обширным и характеризуется применением особого устройства или комплекса устройств, так называемых имитаторов цели, – устройств, производящих определенные манипуляции с зондирующим сигналом

и отражающих или переизлучающих его в сторону испытываемой РЛС. В некоторых случаях необязательным является даже наличие зондируемой трассы: имитатор цели обеспечивает соответствующие (и программируемые) временные задержки, временное уширение и амплитудное профилирование зондирующего импульса, его частотное смещение и т. д.

Методика контроля параметров ДРЛС с применением простейшего механического имитатора цели описывается в работе [6]. Имитатор представляет собой вал, на котором располагаются четыре угловых отражателя, расположенных симметрично относительно друг друга для обеспечения равномерности их вращения. На протяжении времени вращения, когда раскрыты отражатели ориентированы в направлении РЛС, происходит отражение сигналов. В отраженном сигнале за счет вращения отражателей образуется частота доплеровского сдвига, определяемая радиальной скоростью перемещения отражателя. Изменение вектора радиальной скорости вычисляется согласно формуле:

$$\Delta V_r = V_r \cos \frac{\theta^\circ}{2} = 0,866 V_r, \quad (5)$$

где V_r – радиальная составляющая скорости цели относительно РЛС, θ° – угол обратного рассеяния углового отражателя ($\theta^\circ = 60^\circ$).

Изменяя скорость вращения вала, можно регулировать величину имитируемой скорости движения цели, а изменяя величину удаления имитатора относительно РЛС – верифицировать точность измерения расстояний.

В работах [7–9] приведены методики контроля параметров РЛС с использованием имитаторов целей, обладающих линиями задержки и средствами амплитудной модуляции сигнала.

В работе [10] предлагается метод верификации метеорологического доплеровского радиолокатора профилей ветра, заключающийся в следующем: ДРПВ и устройство переизлучения сигнала (УПС) стационарно устанавливаются на некотором расстоянии L друг от друга. Радиолокатор излучает зондирующий СВЧ-сигнал, направленный параллельно земле, с частотой f_0 на устройство переизлучения. УПС производит смещение частоты исходного сигнала на величину доплеровского сдвига, который соответствует сигналу, отраженному от движущихся с некоторой скоростью метеорообразований, после чего смещенный сигнал переизлучается на ДРПВ (рис. 3). Радиолокатор регистрирует этот сигнал и определяет скорость ветра V_B , соответствующую данной величине сдвига:

$$V_B = \frac{F_{ДН} \lambda}{2 \cos \alpha_N \cos \beta}, \quad (6)$$

где $F_{дN}$ – доплеровская частота отраженного СВЧ сигнала, λ – длина волны зондирующего СВЧ сигнала, α_N – угол направления скорости ветра относительно направления на север, β – угол места, под которым производится зондирование атмосферы.

Путем изменения $F_{дN}$ на переизлучателе и остановки локатора на определенных углах α_N определяется точность измерения V_B , путем изменения дистанцию между метеолокатором и УПС проверяется точность измерения высоты, на которой измерялась V_B .

Имитация нескольких разнесенных в пространстве точек описана в работе [8]. Она производится следующим образом: испытываемая радиочастотная локационная система излучает сигнал с исходной частотой f_0 , он поступает на многоканальный СВЧ-модуль преобразования частоты, где формируется несколько когерентных сигналов. Они подвергаются амплитудно-частотной модуляции в соответствии с заданными параметрами и приобретают сдвиг частоты на величину Δf_0 (рис. 4). Несколько независимых каналов формирования сигналов и дополнительные технические устройства позволяют формировать несколько сигналов с различной спектральной структурой.

В работе [11] описывается методика верификации РЛС с использованием имитатора цели, где для имитации расстояний до объекта применяются оптоволоконные линии задержки различной длины, которые могут быть скоммутированы между собой в различных сочетаниях. Процессом их коммутации управляет компьютер. Устройство предусматривает электрооптические и оптоэлектронные преобразования сигнала. Принцип действия такого имитатора цели представлен на рис. 5.

Использование калиброванных твердотельных или оптоволоконных линий задержки является альтернативой геодезическим полигонам и имеет ряд существенных преимуществ: компактность, практичность применения, высокая стабильность характеристик.

Методы верификации параметров РЛС с применением имитаторов цели являются на сегодняшний день наиболее перспективными и универсальными, поскольку обладают практичностью, гибкостью в настройке параметров и достаточной их вариативностью. Тем не менее, они не лишены недостатков, главный из которых – их низкая достоверность с точки зрения метрологии. Имитатор цели является сложным программно-аппаратным комплексом, содержащим множество элементов; его характеристики должны соответствовать требованиям эталона. Более того, каждый применяемый для поверки РЛС имитатор цели должен быть аттестован как рабочий эталон. Это неизбежно приводит к необходимости разработок методик калибровки

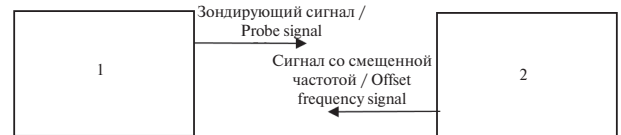


Рисунок 3. Принцип верификации параметров доплеровского радиолокатора профилей ветра с помощью устройства переизлучения сигнала: 1 – доплеровский радиолокатор профилей ветра; 2 – устройство переизлучения сигнала

Figure 3. The principle of verifying the parameters of the wind profile Doppler radar using a signal re-emission device: 1 – Doppler radar of wind; 2 – signal re-emission device

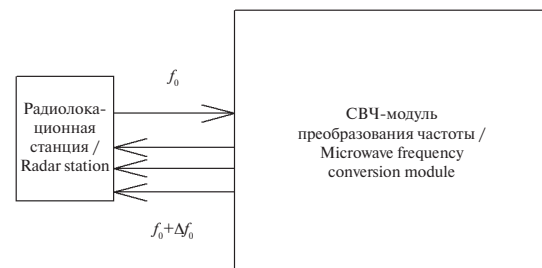


Рисунок 4. Верификация доплеровской радиочастотной локационной системы с применением многоканального имитатора цели

Figure 4. Verification of the Doppler radio frequency location system using a multi-channel target simulator

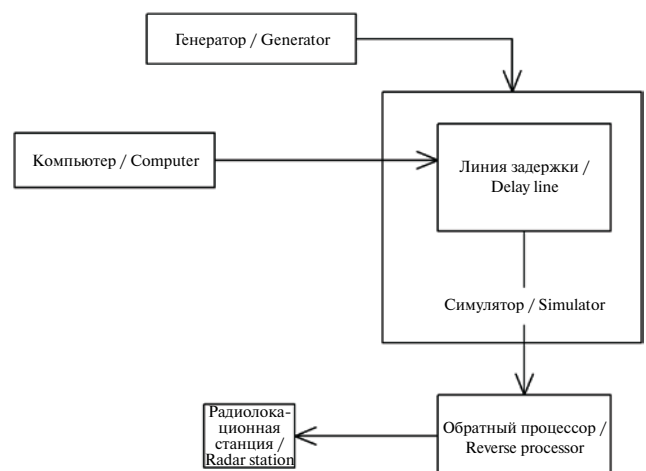


Рисунок 5. Принцип действия имитатора цели с использованием оптоволоконных линий задержки

Figure 5. Principle of a target simulator operation using fiber-optic delay lines

самих имитаторов цели, что также представляет существенные трудности. Также следует отметить, что имитаторы цели, как правило, могут быть применены лишь для однотипных РЛС, схожих по своим характеристикам.

Выводы

Была рассмотрена проблема верификации параметров активных радиочастотных локационных систем, описаны основные подходы и методы ее решения. Выделены четыре направления методов верификации параметров: трассовый метод, применение эталонного измерительного устройства, имитатора цели, а также комбинированные методы.

Анализ методов верификации параметров радиолокаторов позволил сделать следующие выводы. Для верификации РЛС, измеряющих расстояния до объекта, особенно на относительно малых дистанциях, наиболее применимы трассовые методы. Они обладают высокой достоверностью

и точностью. Для доплеровских радиочастотных локационных систем, а также метеорологических (Д)РЛС – профилометров обратного рассеяния и ветровых полей – наиболее перспективными становятся методы, связанные с непосредственным или комбинированным применением всевозможных имитаторов цели, которые производят определенные манипуляции с зондирующим сигналом и переизлучают его в направлении испытываемого устройства. Основной проблемой здесь становится калибровка и аттестация имитаторов цели в качестве рабочих эталонов. Можно заключить, что отсутствие единых нормативов верификации РЛС является актуальной проблемой, требующей комплексного решения. С другой стороны, предложенная в статье классификация типов РЛС и методов их верификации может быть использована для создания новых рабочих эталонов и методик поверки, равно как и для расширения нормативной базы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тревого И.С. Геодезический полигон для метрологической аттестации приборов и апробации технологий // *Геопрофи*. 2009. № 1. С. 6–11.
2. Патент 2596194 Российская Федерация, МПК В64F 1/22. Космический аппарат для калибровки радиолокационных станций / Полуян А.П.; заявитель и патентообладатель ОАО «Корпорация космических систем специального назначения «Комета». Заявл. 07.04.15, опубл. 27.08.16. 18 с.
3. Патент 2460091 Российская Федерация, МПК G01S13/95. Способ оценки точности доплеровского радиолокатора профилей ветра / Сагитов В.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель РФ, от имени которой выступает Минобороны России, АО ЦКБА. Заявл. 02.03.11, опубл. 27.08.12. 11 с.
4. *Высотная метеорологическая мачта*. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Научно-производственное объединение «Тайфун». [Электронный ресурс]. URL: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html> (дата обращения 21.04.2020).
5. *Когерентные доплеровские лидары* для мониторинга ветровой обстановки / М. Андреев, Д. Васильев, М. Пенкин, С. Смоленцев, А. Борейшо, Д. Клочков, М. Коняев, А. Орлов, А. Чугреев // *Фотоника*. 2014. № 6. – 20–29.
6. Патент 1840999 СССР, МПК G01S7/40. Имитатор движущейся цели / Каретников В.Г. [и др.]; заявитель и патентообладатель НИИ «Квант». Заявл. 02.01.84, опубл. 10.12.14. 7 с.
7. Патент 2498338 Российская Федерация, МПК G01S7/40. Устройство контроля дальномерного канала радиолокационных систем / Горшков С.Н.; заявитель и патентообладатель ОАО МНИИ «Агат». Заявл. 10.07.13, опубл. 10.11.13, 11 с.
8. Патент 2687071 Российская Федерация, МПК G01S7/40. Имитатор пространственного радиолокационного сигнала / Першин В.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ГосНИИАС». Заявл. 07.09.18, опубл. 07.05.19. 13 с.
9. Патент 186130 Российская Федерация, МПК G01S7/40. Многофункциональный имитатор радиолокационных целей / Боков А.С. и др.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «УРФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Заявл. 04.06.18, опубл. 10.01.19. 7 с.
10. Патент 2502083 Российская Федерация, МПК G01S7/40. Способ калибровки и поверки доплеровского радиолокатора профилей ветра / Хомяков А.В. и др.; заявитель и патентообладатель ОАО ЦКБА. Заявл. 28.04.11, опубл. 20.12.13. 11 с.
11. Patent 0565663 The United States of America, Int Cl. G01S7/40. Programmable fiber optic delay line, and radar target simulation system incorporating the same / Wang, Harry T. et al, proprietor Hughes Aircraft Company Los Angeles, California 90045–0066, filing: 25.09.92, publ. 20.10.93, 11 p.

REFERENCES

1. Trevogo I.S. Geodesic test site for metrological certification of devices and approbation of technologies. *Geoprofi*, 2009, no. 1, pp. 6–11. (in Russian).
2. Patent RF, no. 2596194 МПК В64F 1/22. *Kosmicheskii apparat dlya kalibrovki radiolokatsionnykh stantsii*. Poluyan A. P, applicant and patent holder OJSC Corporation of special-purpose space systems “Kometa”, declared 07.04.15, published 27.08.16, 18 p. (In Russian).

3. Patent RF, no. 2460091 МПК G01S13/95., V.V., et al. *Sposob otsenki tochnosti doplerovskogo radiolokatora profilei vetra*. Sagitov V.V. et al, applicant and patent holder the Russian Federation, on behalf of which the Ministry of Defense of Russia acts, JSC TsKBA, declared 02.03.11, published 27.08.12, 11 p. (In Russian).
4. *Vysotnaya meteorologicheskaya machta* [High-altitude meteorological mast]. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring Scientific and Production Association «Typhoon». Available at: <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/index.html> (accessed 21.04.2020). (In Russian).
5. Andreev M., Vasiliev D., Penkin M., Smolentsev S., Boreisho A., Klotchkov D., Konyaev M., Orlov A., Chugreev A. Coherent Doppler lidars for monitoring wind conditions. *Photonics*, 2014, no. 6, pp. 20–29. (in Russian).
6. Patent USSR, no. 1840999 МПК G01S7/40. *Imitator dvizhushcheysya tseli* [Moving target simulator]. Karetnikov, V. G. et al, applicant and patent holder Research Institute “Kvant”, declared 02.01.84, published 10.12.14, 7 p. (In Russian).
7. Patent RF no. 2498338 МПК G01S7/40. *Ustroystvo kontrolya dalnomernogo kanala radiolokatsionnykh system* [The control device of the ranging channel of radar systems]. Gorshkov S. N., applicant and patent holder OJSC Research Institute “Agat”, declared 10.07.13, published 10.11.13, 11 p. (In Russian).
8. Patent RF no. 2687071 МПК G01S7/40. *Imitator prostranstvennogo radiolokatsionnogo signala* [Spatial Radar Simulator]. Pershin V. A., applicant and patent holder FSUE “GosNIAS”, declared 07.09.18, published 07.05.19, 13 p. (In Russian).
9. Patent RF no. 186130 МПК G01S7/40. *Mnogofunktsionalnyi imitator radiolokatsionnykh tselei* [Multifunctional radar target simulator]. Bokov A. S. et al, applicant and patent holder FSAEI HE “Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin”, declared 04.06.18, published 10.01.19, 17 p. (In Russian).
10. Patent RF no. 2502083 МПК G01S7/40. *Sposob kalibrovki i poverki doplerovskogo radiolokatora profilei vetra* [Calibration and calibration of Doppler radar wind profiles]. Homyakov A.V. et al, applicant and patent holder OJSC TsKBA, declared 28.04.11, published 20.12.13, 11 p. (In Russian).
11. Patent 0565663 The United States of America, Int Cl. G01S7/40. *Programmable fiber optic delay line, and radar target simulation system incorporating the same* / Wang, Harry T. et al, proprietor Hughes Aircraft Company Los Angeles, California 90045–0066, filing: 25.09.92, publ. 20.10.93, 11 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ибрагимова Яна Григорьевна, студент, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1, тел.: +7 (950) 028-96-92, e-mail: yaanaibragimova@gmail.com.

Терешенкова Ольга Алексеевна, студент, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1, тел.: +7 (921) 876-29-08, e-mail: tereshenkova_oa@mail.ru.

Ким Алексей Андреевич, старший преподаватель, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1, тел.: +7 (961) 804-65-24, e-mail: alexeykim90@gmail.com.

Лугиня Виктория Сергеевна, старший преподаватель, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, 190005, Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1, тел.: +7 (961) 804-65-24, e-mail: v-luginya@yandex.ru.

AUTHORS

Yana G. Ibragimova, student, State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, 1, ulitsa 1-ya Krasnoarmeiskaya, Saint Petersburg, 190005, Russia, tel.: +7 (950) 028-96-92, e-mail: yaanaibragimova@gmail.com.

Olga A. Tereshenkova, student, State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, 1, ulitsa 1-ya Krasnoarmeiskaya, Saint Petersburg, 190005, Russia, tel.: +7 (921) 876-29-08, e-mail: tereshenkova_oa@mail.ru.

Alexey A. Kim, senior lecturer, State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov, 1, ulitsa 1-ya Krasnoarmeiskaya, Saint Petersburg, 190005, Russia, tel.: +7 (961) 804-65-24, e-mail: alexeykim90@gmail.com.

Viktoriya S. Luginya, senior lecturer, State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, 1, ulitsa 1-ya Krasnoarmeiskaya, Saint Petersburg, 190005, Russia, tel.: +7 (961) 804-65-24, e-mail: v-luginya@yandex.ru.

Поступила 02.03.2020; принята к публикации 19.03.2020; опубликована онлайн 03.06.2020.
Submitted 02.03.2020; revised 19.03.2020; published online 03.06.2020.