

УДК (621.371.332.3:623.746):51.001.57

МАСШТАБНОЕ ФИЗИЧЕСКОЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЛС С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЛЯ БПЛА

В. Н. Трофимов

**Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»,
125319, г. Москва, ул. Викторенко, д.7**

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2019 г.

Аннотация. Описывается технология масштабного физического гидроакустического моделирования (МФГМ) радиолокационных (РЛ) систем, заключающаяся в физическом моделировании РЛ эхо-сигналов в гидроакустическом бассейне и их применении для математического или полунатурного моделирования РЛС. Предлагается использование МФГМ при разработке РЛС с синтезированной апертурой (СА) малой дальности, устанавливаемых на легких БПЛА. Для РЛС данного типа МФГМ позволяет физически моделировать в масштабе не только длину волны РЛС и линейное разрешение, но также дальность и высоту относительно картографируемого участка земной поверхности, траекторию движения антенны РЛС на интервале формирования СА. МФГМ возможно применять как на начальных, так и на заключительных этапах разработки РЛС. Масштабный коэффициент, равный отношению длины волны моделирующего ультразвукового сигнала к длине волны моделируемого РЛ сигнала, может иметь значения приблизительно от 1:100 для Х-диапазона до 1:1000 для L-диапазона РЛ длин волн. Приведены характеристики стенда МФГМ РЛС с СА, разработанного в ФГУП «ГосНИИАС» и обеспечивающего моделирование в масштабе 1:100 для Х-диапазона РЛ длин волн. Обосновывается выбор для стенда зондирующих ультразвуковых сигналов типа дискретных частотных последовательностей (ДЧП). Представлены смоделированные на этом стенде РЛ изображения объектов с линейным разрешением 10 см (1мм на ультразвуке). Приводятся

размеры гидроакустических бассейнов и требования к ультразвуковым сигналам стендов МФГМ, предназначенных для моделирования РЛС с СА малой дальности. Описываются основные технические проблемы и задачи, которые необходимо решать при разработке РЛС с СА малой дальности для легких БПЛА. Приводятся преимущества использования в РЛС данного типа зондирующих сигналов типа ДЧП.

Ключевые слова: масштабное физическое гидроакустическое моделирование, радиолокационные изображения, РЛС с синтезированной апертурой, легкие БПЛА, ультразвуковые волны.

Abstract. This article describes the technology of scale physical hydroacoustic modeling (SPHM) radar systems. SPHM includes the physical simulation of radar echo signals in hydroacoustic basin and their use in mathematical or hardware-in-the-loop simulation of the radar. It is proposed to use SPHM in the development of synthetic aperture radar (SAR) of short-range, mounted on light UAVs. For radar of this type SPHM allows physical simulation at the scale of not only the wavelength of the radar and linear resolution, but also the distance and height relative to the mapped surface area of the earth, the trajectory of the radar antenna at the time of formation the synthesis of the aperture. SPHM can be used both in the initial and final stages of radar development. The scale factor equal to the ratio of the wavelength of the modeling ultrasonic signal to the wavelength of the simulated radar signal can have values approximately from 1:100 for the X-range to 1:1000 for the L-range of radar wavelengths. The characteristics of the stand SPHM, developed "State Research Institute of Aviation Systems", for modeling SAR on a scale of 1:100 for the X - range radar are provided. This paper proves the choice of probing ultrasonic signals of the type of discrete frequency sequences (DFS). Radar images of objects with a linear resolution of 10 cm (1 mm on ultrasound) simulated on the stand are presented. The size of the hydroacoustic basins and the requirements to ultrasonic signals for SHPM short range SAR are given. The main technical problems and tasks that should be solved under development of short-range SAR for light UAVs are described. Also,

this article shows the advantages of radar probing signals such as DFS for use on radar this type.

Key words: scale physical hydroacoustic modeling, radar images, synthetic aperture radar, light UAVs, ultrasonic waves .

Введение

В настоящее время все большее применение получают системы поиска и наблюдения за земной поверхностью на основе легких БПЛА, оснащенных оптическими датчиками различных типов. Для повышения возможностей таких систем ведутся разработки специальных РЛС с СА для БПЛА, позволяющих проводить работы в любое время суток и в любую погоду.

Основными требованиями к таким РЛС являются: малый вес и энергопотребление (бортовой части РЛС), высокое и сверхвысокое линейное разрешение. Максимальная дальность действия РЛС может составлять всего несколько километров. Не существует особых ограничений на наземную часть РЛС, в которой проводится обработка РЛ эхо-сигналов для получения РЛ изображений (РЛИ) и их вторичная обработка. Например, в США разработан БПЛА “ScanEagle 1” со взлетной массой до 20 кг, имеющий на борту многодиапазонную РЛС “NanoSAR” обзора земной поверхности. РЛС имеет максимальную дальность картографирования 3300 м и линейное разрешение около 30 см.

1. Назначение и принципы МФГМ

На начальных этапах разработки РЛС с СА используется математическое моделирование. Математическая модель должна включать в себя модель формирования РЛ эхо-сигналов, отраженных от земной поверхности и протяженных объектов РЛ наблюдения (самолеты, корабли и т.п.), что является достаточно сложной задачей при удовлетворении требованиям по линейному разрешению и точности получаемых РЛИ высокого и сверхвысокого разрешения.

На этапах отработки РЛС используется полунатурное моделирование с применением специальных имитаторов РЛ эхо-сигналов, которые также имеют ограниченные возможности при формировании сигналов, отраженных от протяженных объектов сложной формы. Натурные эксперименты имеют ограничения из-за своей высокой стоимости и ряда других причин.

Эффективность работ по разработки указанных РЛС может быть повышена за счет использования МФГМ РЛ эхо-сигналов, отраженных от протяженных объектов, в гидроакустическом бассейне. МФГМ основано на аналогии законов распространения и переотражения для акустических и электромагнитных волн. Основные принципы, характеристики и некоторые результаты МФГМ представлены в работе [1]. В гидролокации и радиолокации в режимах СА используются в основном одинаковые типы зондирующих сигналов и методы обработки эхо-сигналов. Отсутствие у акустических волн поляризации не имеет значения при моделировании РЛС, в которых не используются непосредственно поляризационные характеристики эхо-сигналов.

Масштабный (волновой) коэффициент МФГМ равен отношению длины волны моделирующего ультразвукового сигнала к длине волны зондирующего сигнала моделируемой РЛС. Этот коэффициент может иметь значения приблизительно от 1:100 при моделировании РЛС сантиметрового диапазона длин волн до 1:1000 для дециметрового диапазона. В таком масштабе изготавливаются модели объектов, а при моделировании РЛС малой дальности, устанавливаемых на легких БПЛА, строится вся радиолокационная сцена (основное ограничение - размеры гидроакустического бассейна).

При проведении МФГМ масштабная модель протяженного объекта или участка земной поверхности облучается ультразвуковыми зондирующими сигналами, распространяющимися в воде. Принимаемые эхо-сигналы регистрируются в цифровой форме с помощью специальной аппаратуры. Для получения эффекта СА необходимо вращать модель в горизонтальной плоскости вокруг своего центра или линейно перемещать акустические

антенны с помощью электромеханических приводов. При МФГМ инверсного СА по кораблям модель погружается в воду не полностью, а только ее верхняя ее часть, соответствующая надводной части корабля, как показано в [2].

2. Технология и стенд МФГМ

Записанные цифровые массивы эхо-сигналов могут использоваться как для математического, так и для полунатурного моделирования РЛС с применением специальных цифровых имитаторов РЛ сигналов (см. рис.1).

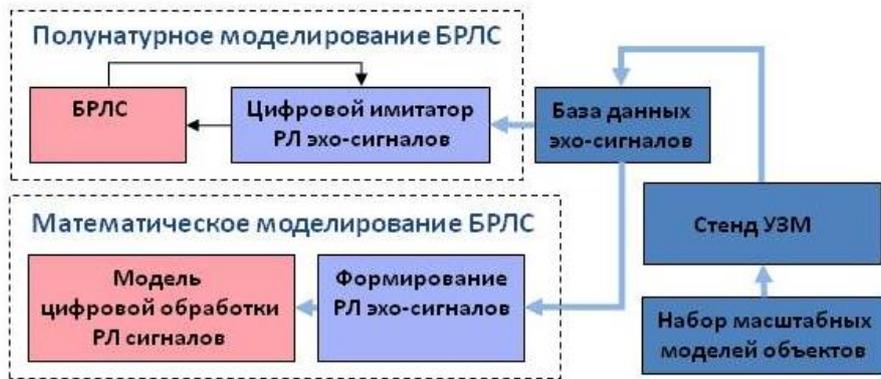


Рис.1. Технология моделирования РЛС с использованием стенда МФГМ.

Обобщенная структурная схема стенда МФГМ для моделирования РЛС с СА, эксплуатирующегося в настоящее время в ФГУП «ГосНИИАС» представлена на рис.2.

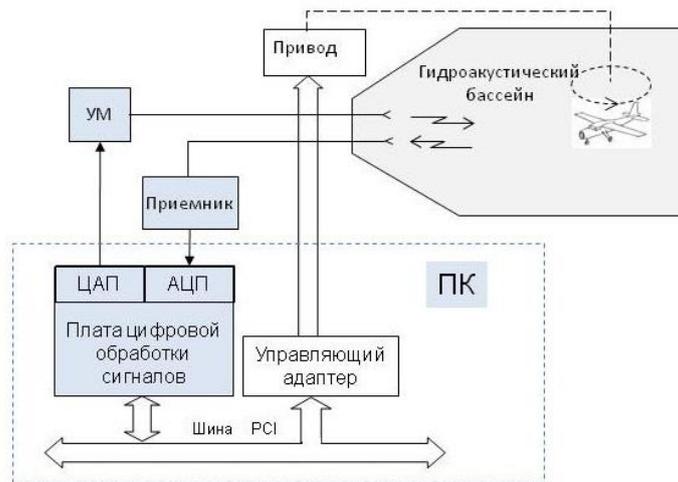


Рис.2. Структурная схема стенда МФГМ.

На стенде используется прямой цифровой синтез зондирующих широкополосных ультразвуковых сигналов, а принимаемые эхо-сигналы

преобразуются в цифровую форму непосредственно на несущей частоте. Обработка эхо-сигналов проводится программно на персональном компьютере со встроенным модулем цифровой обработки сигналов. Гидроакустический бассейн стенда имеет небольшую емкость (около 100 л).

В качестве зондирующих сигналов для МФГМ необходимо использовать широкополосные сигналы, обеспечивающие высокое разрешение по дальности и имеющие большую энергию. Величина масштабного коэффициента МФГМ в основном ограничивается ослаблением акустических сигналов в воде. Ослабление амплитуды плоской гармонической волны происходит в результате ее взаимодействия со средой по закону $e^{-\delta x}$, где x - путь в среде, а δ – коэффициент затухания (см. [3]).

Коэффициент затухания равен сумме коэффициентов поглощения и рассеяния. В воде без инородных частиц коэффициент рассеяния можно не учитывать. Величина поглощения имеет квадратичную зависимость от частоты. В справочной литературе поглощение характеризуют коэффициентом δ/f^2 .

В [3] приведены значения соответствующего коэффициента - $\delta/f^2 \cdot 10^{15}$ для расчета затухания ультразвуковых сигналов в жидкостях. Для воды и частоты ультразвука в диапазоне от 1 МГц до 250 МГц полученное экспериментально значение этого коэффициента равно $23 \text{ с}^2/\text{м}$. Например, для частоты 2 МГц поглощение составляет величину, равную 0,9дБ/м, а для частоты 6 МГц – 8 дБ/м. На рассматриваемом стенде используется средняя несущая частота 4,5 МГц (длина волны 0,33 мм), для которой величина поглощения ультразвука составляет 4,5 дБ/м.

В качестве зондирующих сигналов на стенде используются сигналы типа дискретных частотных последовательностей (ДЧП), которые описаны, например, в [4]. Каждый зондирующий сигнал типа ДЧП состоит из N_F импульсов длительностью τ , следующих с периодом T_n и перестраиваемых по частоте с дискретом, равным $1/\tau$. Прием сигналов, отраженных от объекта, производится в промежутках между импульсами. Такие сигналы имеют

большую общую длительность ($T = \tau N_F$) и, соответственно, энергию, при этом позволяют располагать облучаемый объект на небольшом расстоянии от ультразвуковых антенн. Это поясняется рис.3, на котором изображены сигналы типа ДЧП и сигналы других типов, например, с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

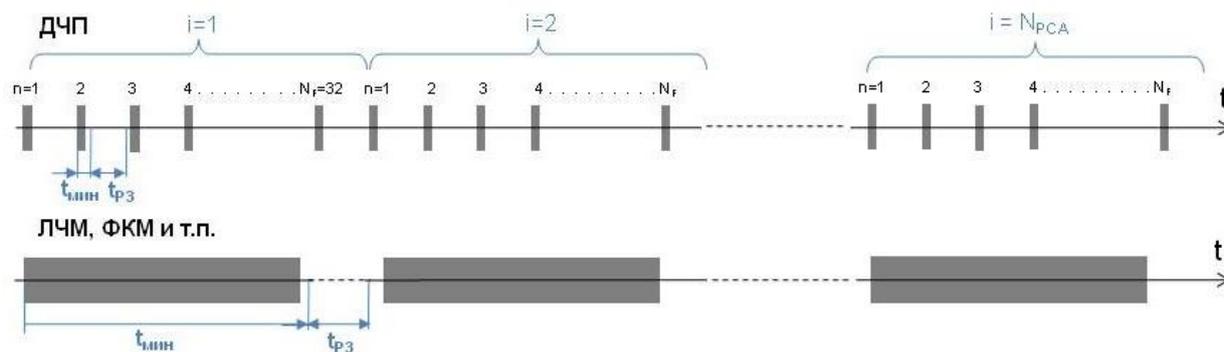


Рис.3 Зондирующие сигналы типа ДЧП и ЛЧМ.

Оба типа сигналов имеют одинаковую энергию. Минимальное расстояние между акустическими антеннами и моделью пропорционально времени $t_{мин}$. При использовании ДЧП должно выполняться условие:

$$t_{мин} \geq 2\tau / c,$$

где c – скорость звука в воде.

При использовании обычных сигналов, например ЛЧМ, время $t_{мин}$ и минимальное расстояние от акустических антенн до объекта увеличится в N_F раз.

Для сжатия по дальности сигналов типа ДЧП применяется алгоритм БПФ, обеспечивающий малые вычислительные затраты и низкий уровень боковых лепестков. На стенде значения τ и N_F могут устанавливаться программно.

3. Примеры РЛИ, полученных на стенде МФГМ

На рис.4 представлены РЛИ самолета А-7 Corsair II, смоделированные на стенде МФГМ.

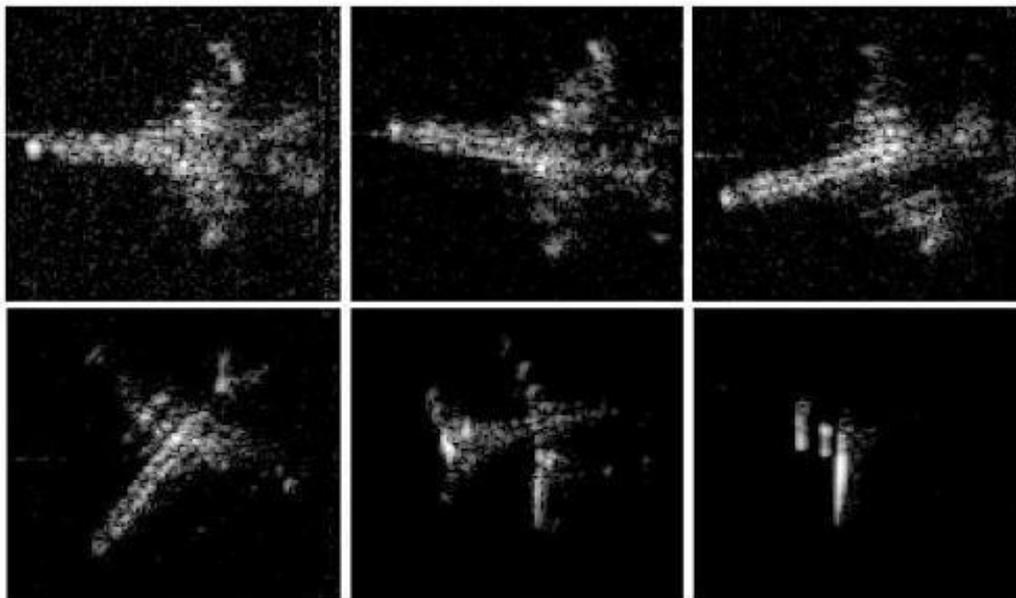


Рис.4. РЛИ самолета А-7 Corsair II.

При моделировании использовались значения $N_F = 32$ и $\tau = 40$ мкс.

Линейное разрешение на ультразвуке (по дальности и по азимуту) составляет примерно 1 мм, что соответствует линейному разрешению 10 см для РЛС с СА трехсантиметрового диапазона длин волн. Облучение производилось с левой стороны.

На рис.5 представлены фотографии гидроакустических моделей (масштаб 1:100) - самолета А-7 Corsair II и океанской яхты.



Рис.5. Гидроакустические модели объектов.

Модель самолета сделана из эбонита с последующей металлизацией поверхности. Модель яхты изготовлена на фрезерном станке Roland MDX-20 из дерева. Для повышения отражающих характеристик и защиты от воды модель покрыта специальным лаком.

Модель яхты использовалась для моделирования режима инверсного СА при работе по кораблям. Результаты моделирования представлены на рис.6.

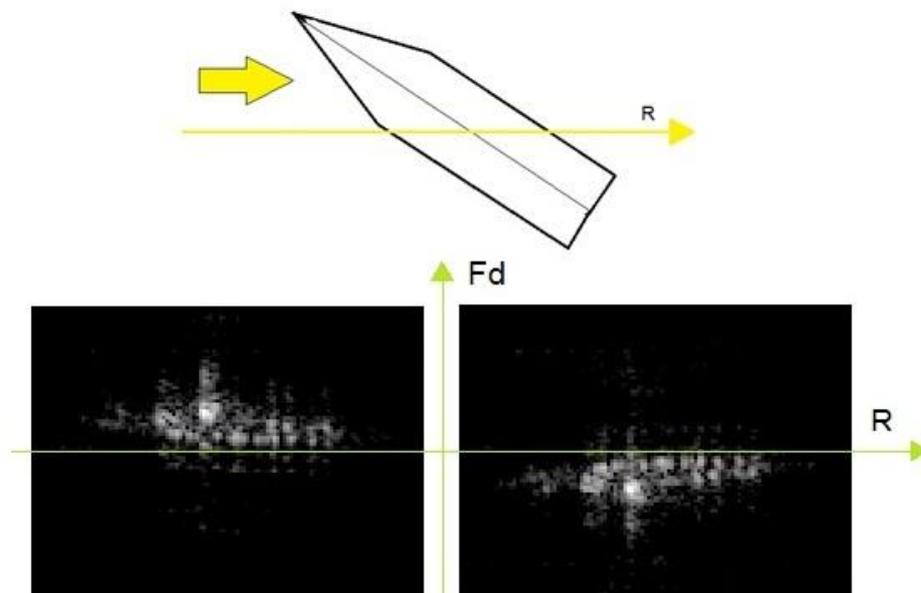


Рис.6. Моделирование режима инверсного СА по морским объектам.

Формирование РЛИ производилось за счет моделирования бортовой качки с помощью электромеханического привода, на котором жестко закреплялась модель. Облучение производилось под ракурсом около 45 градусов, как показано на рис.6. Два РЛИ на рис.6 были получены для одних и тех же параметров моделирования (скорость вращения модели, разрешение), но разных знаков бортовой качки. Видно, что РЛИ содержат боковой силуэт корабля и имеют одинаковый вид, но зеркально отражены относительно линии нулевой доплеровской частоты (F_d).

Гидроакустические модели должны иметь хорошую отражающую способность своей поверхности и иметь большой коэффициент затухания ультразвуковых сигналов, проникающих внутрь модели. Модели нельзя изготавливать, например, из металлов. На рис.7 показаны изображения бруска из алюминиевого сплава.

Облучение проводилось с левой стороны. На изображениях видны сигналы, отраженные от передних стенок бруска, а также паразитные сигналы,

возникающие в результате многократных внутренних переотражений сигналов от стенок бруска.

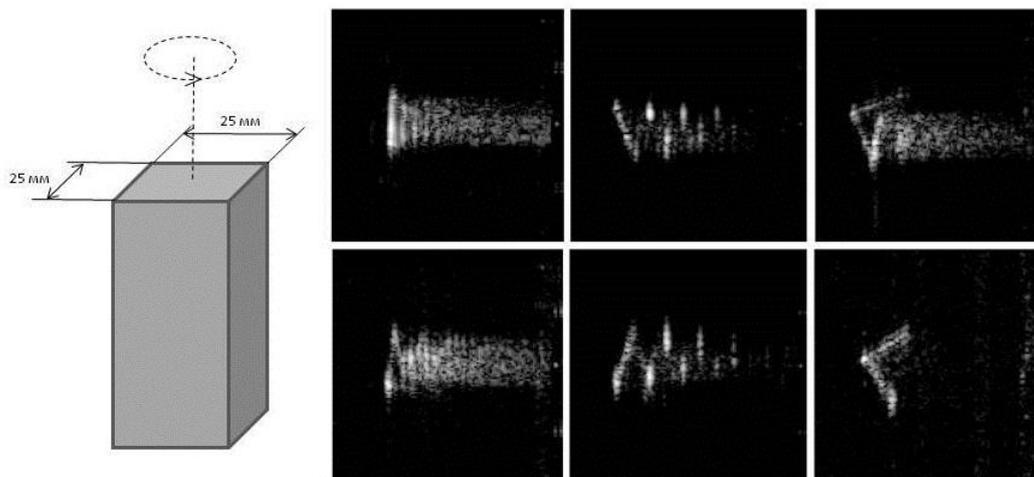


Рис.7. Изображения бруска из алюминиевого сплава.

На стенде проводились исследования свойств моделей, изготовленных с помощью 3-D плоттера. Результаты показали, что такие модели имеют достаточно хорошие характеристики по отражению ультразвука и его поглощению внутри модели.

4. Применение МФГМ для разработки РЛС с СА малой дальности для БПЛА

МФГМ может применяться для решения следующих задач:

- разработка алгоритмов обработки РЛ сигналов в РЛС с СА картографирования высокого и сверхвысокого разрешения;
- разработка РЛС с инверсным СА при работе по воздушным и морским объектам;
- исследование отражательной способности объектов для снижения их заметности;
- разработка алгоритмов обработки РЛИ для автоматического распознавания объектов и создание баз данных с эталонными РЛИ;
- исследование сверхширокополосных РЛС и других перспективных РЛ систем.

Моделирование может проводиться как для однопозиционного, так и многопозиционного режимов работы РЛС. В основном при МФГМ РЛ систем в заданном масштабе выдерживаются длина волны зондирующих сигналов, линейное разрешение и размеры моделей, например, как при получении РЛИ, показанных на рис.4. Дальность до объекта не моделируется, так как в большинстве РЛ систем она имеет такие значения, которые не позволяют ее масштабировать из-за ограниченных размеров гидроакустических бассейнов.

В то же время существуют РЛ системы, при моделировании которых можно полностью масштабировать всю радиолокационную сцену, включая дальность и высоту. К таким системам относятся РЛС с СА малой дальности, устанавливаемые на легких БПЛА. В данном случае МФГМ позволяет в масштабе физически моделировать не только эхо-сигналы с помощью масштабных моделей объектов, но и всю геометрию системы РЛС – земная поверхность, включая дальность, высоту и траекторию полета на интервале формирования СА.

Сложность разработки РЛС с СА для легких БПЛА объясняется необходимостью получения высокого линейного разрешения (менее 1 м) в сантиметровом и дециметровых диапазонах длин РЛ волн при малой массе и скорости носителя и, соответственно, больших траекторных нестабильностях, существующих на интервале СА. Также существуют значительные ограничения по весу и энергопотреблению бортовой части РЛС.

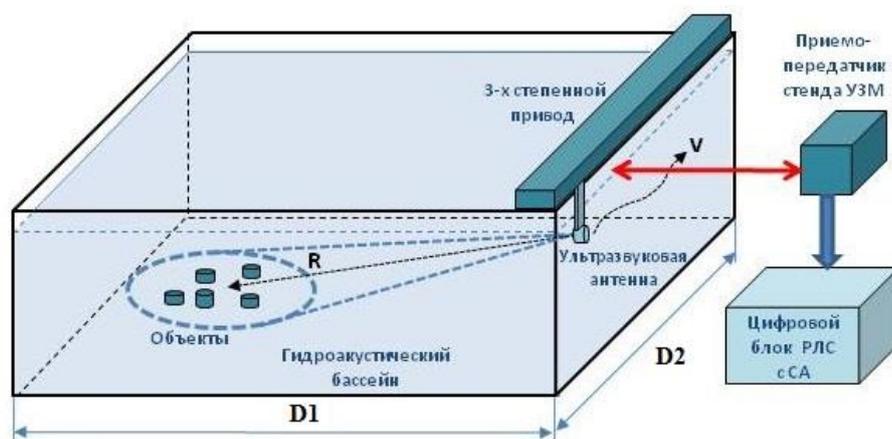


Рис.8. Моделирование РЛС с СА малой дальности на стенде МФГМ.

При разработке таких РЛС основные трудозатраты приходится на создание алгоритмического и программного обеспечения (приблизительно до 80 % от всей работы) для наземной части РЛС, в которой проводится основная часть обработки информации. При моделировании такой РЛС с применением МФГМ можно использовать как математические модели обработки РЛ данных, так и реальную вычислительную систему РЛС. На рис.8 показана в общем виде схема моделирования РЛС с СА малой дальности на стенде МФГМ.

Бортовая аналоговая часть РЛС на стенде МФГМ заменяется масштабным эквивалентом в виде ультразвуковой приемо-передающей аппаратуры. С помощью такого стенда при разработке РЛС с СА можно решать следующие задачи:

- выбор параметров приемо-передающей аппаратуры РЛС (тип зондирующих сигналов, мощность передатчика и т.п.);
- разработка алгоритмов обработки РЛ сигналов для формирования изображений высокого и сверхвысокого разрешения;
- разработка способа и системы компенсации траекторных нестабильностей с использованием данных навигационных датчиков или алгоритмов автофокусировки;
- разработка систем вторичной обработки изображений для автоматического обнаружения и распознавания объектов.

Одной из основных проблем, которую необходимо решать при разработке алгоритмов обработки РЛ сигналов в РЛС с СА является компенсация перемещения (миграции) элементов поверхности по каналам дальности на интервале накопления сигнала. Эту проблему поясняет рис.9, на котором в упрощенном виде показано, как меняется положение полосы дальности на земной поверхности, соответствующей некоторому каналу дальности РЛС, за время, необходимое для получения СА (T_C) в режиме бокового обзора при равномерном перемещении РЛС.

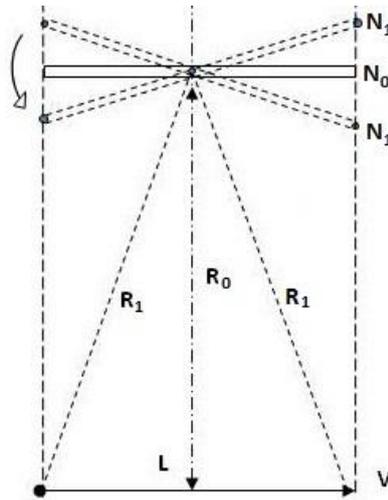


Рис.9. Изменение расположения полоски дальности на земной поверхности.

На рис.9 представлены следующие параметры: V - скорость носителя РЛС; L - путь, проходимый носителем за время T_c ; R_0 – горизонтальная дальность до разрешаемого элемента в середине интервала СА; R_1 - дальность до разрешаемого элемента в начале и в конце интервала СА; N_0 – номер канала дальности, в который попадает сигнал от разрешаемого элемента в середине интервала СА; N_1 – номер канала дальности, в который попадает сигнал от элемента в начале и в конце интервала СА.

Значение L можно оценить с помощью упрощенной формулы (без учета высоты полета):

$$L = \frac{\lambda R_0}{2\Delta r},$$

где λ –длина волны зондирующих сигналов РЛС; Δr – линейное разрешение РЛС.

Время синтезирования определяется заданным линейным разрешением и скоростью носителя и при строго боковом обзоре равно:

$$T_c = \frac{L}{V}.$$

За время T_c происходит перемещение каждого элемента поверхности по каналам дальности РЛС. Как показано на рис.9 в начале и в конце интервала СА, элемент попадает в канал дальности с номером N_1 , а в середине в канал с

номером N_0 . Таким образом, происходит его перемещение через некоторое число каналов дальности, равное:

$$\Delta N = N_1 - N_0.$$

Величину ΔN можно определить по формуле:

$$\Delta N = \frac{\Delta x}{\Delta r},$$

$$\text{где } \Delta x = \sqrt{R_0^2 + \frac{L^2}{4}} - R_0.$$

Для компенсации перемещения элементов необходимо применять специальные схемы построения приемной аппаратуры РЛС и алгоритмы обработки сигналов, которые определяются типом зондирующих сигналов. Одновременно должны компенсироваться неустойчивости траектории носителя РЛС на основе данных, поступающих от навигационных датчиков. Кроме описанной выше существует еще ряд задач, которые должны быть решены для реализации режима СА в РЛС малой дальности.

В РЛС данного типа обычно используются сантиметровый и дециметровый диапазоны длин РЛ волн. Возможно также применение сверхширокополосных сигналов. Дециметровый диапазон, позволяет обнаруживать скрытые объекты, в том числе подповерхностные. Но его применение ведет к усложнению алгоритмов обработки сигналов из-за увеличения времени T_C и использования антенн с более широкой диаграммой направленности по сравнению с сантиметровым диапазоном. В то же время при МФГМ РЛС дециметрового диапазона достигаются меньшие значения масштабного коэффициента, что обеспечивает более благоприятные условия для проведения МФГМ.

Линейное разрешение РЛС по дальности и по азимуту обычно выбирают приблизительно одинаковым для центра РЛИ. Скорость легких БПЛА, на которых устанавливаются РЛС, имеет небольшое значение – порядка 100 км/ч.

В представленных ниже таблицах приведены параметры РЛ обзора (R_0 , L , T_C , Δx , ΔN), а также масштабные значения дальности R_M и пути L_M , которые должны использоваться при МФГМ с длиной волны ультразвуковых сигналов, равной 0,33 мм. При расчетах была использована скорость носителя, равная 25 м/с.

В таблицах 1 и 2 приведены данные, полученные для РЛС дециметрового диапазона с длиной волны зондирующих сигналов 13 см и значений линейного разрешения по азимуту Δr , равного 50 см (таблица 1) и 25 см (таблица 2).

Таблица 1

$R_0 [м]$	$L [м]$	$T_C [с]$	$\Delta x [м]$	ΔN	$R_M [м]$	$L_M [м]$
5000	650	26,0	10,5	21	12,5	1,62
3000	390	15,6	6,3	13	7,5	0,98
1000	130	5,2	2,1	4	2,5	0,32
500	65	2,6	1,0	2	1,25	0,16

Таблица 2

$R_0 [м]$	$L [м]$	$T_C [с]$	$\Delta x [м]$	ΔN	$R_M [м]$	$L_M [м]$
3000	780	31,2	25,2	101	7,5	1,95
2000	520	20,8	16,8	67	5,0	1,30
1000	260	10,4	8,4	34	2,5	0,65
500	130	5,2	4,2	17	1,25	0,33

Масштабный коэффициент в данном случае приблизительно равен 1:400. При линейном разрешении 50 см ширина диаграммы направленности антенны РЛС должна составлять величину не менее 15 градусов, а при разрешении 25 см – не менее 30 градусов. Таковую же ширину диаграммы направленности должны

иметь акустические антенны стенда МФГМ. Из таблиц видно, что при использовании гидроакустического бассейна длиной порядка 10 м (D1 на рис.8) и шириной 3 м (D2 на рис.8) возможно проведение МФГМ для РЛС малой дальности дециметрового диапазона практически для всех значений дальности.

В таблице 3 представлены аналогичные параметры, полученные для РЛС с длиной несущей волны 3,3 см, длиной волны ультразвуковых сигналов 0,33 мм и линейным разрешением, по азимуту равным 25 см.

Таблица 3

$R_0 [м]$	$L [м]$	$T_c [с]$	$\Delta x [м]$	ΔN	$R_M [м]$	$L_M [м]$
3000	198	7,9	1,63	6	30	1,98
1000	66	2,6	0,54	2	10	0,66
500	33	1,3	0,27	1	5	0,33

Из-за большего масштабного коэффициента МФГМ для РЛС сантиметрового диапазона, который в данном случае равен 1:100, существует ограничение на моделируемую дальность. Как показано в табл.3 максимальная моделируемая дальность будет равна приблизительно 1000 м при использовании бассейна длиной не менее 10 м.

Обычно в РЛС данного типа применяют широкополосные зондирующие сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) как импульсные, так и непрерывные. Перспективным представляется применение в РЛС малой дальности зондирующих сигналов типа ДЧП с приемом РЛ эхо-сигналов между импульсами. Они могут обеспечить ряд преимуществ по сравнению с ЛЧМ сигналами: пониженная частота АЦП и более простая приемо-передающая аппаратура, использование для сжатия по дальности алгоритмов БПФ.

Заключение

МФГМ обеспечивает большую точность и достоверность формирования РЛ эхо-сигналов, отраженных от протяженных объектов, и является

эффективным инструментом для разработки новых РЛ систем и режимов. В ряде случаев результаты МФГМ РЛ систем могут быть сравнимы с результатами натуральных экспериментов. Получаемые на стенде МФГМ с помощью масштабных моделей объектов РЛИ имеют большое сходство с реальными РЛИ и могут использоваться также при разработке систем автоматического распознавания объектов.

МФГМ может применяться как на начальных этапах проектирования РЛС, так и на заключительных этапах - для отладки алгоритмов и программ обработки данных с использованием реальной вычислительной системы РЛС.

Аппаратура стенда МФГМ отличается низкой стоимостью и большой гибкостью за счет использования прямого цифрового синтеза зондирующих сигналов, приема и преобразования эхо-сигналов в цифровую форму на несущей частоте с последующей их обработкой с помощью сигнальных процессоров.

При разработке и исследовании РЛС с СА малой дальности, устанавливаемых на легких БПЛА, МФГМ обеспечивает не только получение эхо-сигналов с помощью масштабных моделей протяженных объектов, и масштабное моделирование всех параметров системы РЛС – земная поверхность, включая дальность до объекта, высоту и траекторию полета на интервале формирования СА.

Литература

1. Семин А.И., Трофимов В.Н. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование радиолокационных систем получения и обработки радиолокационных изображений высокого разрешения // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 4. С. 143-157.
2. Андреев А.Ю., Засухин С.О., Милаев А.В., Яковлева Е.С. Использование ИСАР-метода на стенде гидроакустического моделирования для получения радиолокационных портретов морских объектов с высоким разрешением // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2012. Вып. 68. С. 99-106.

3. Физическая энциклопедия / Под ред. А.М.Прохорова. Том 3. М: Советское радио, 1988. 657 с.
4. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы (теория и применение). М.: Советское радио, 1971. 289 с.

Для цитирования:

В.Н.Трофимов. Масштабное физическое гидроакустическое моделирование РЛС с синтезированной апертурой малой дальности для БПЛА. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep19/7/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.9.7