

С. И. Ивашов, канд. техн. наук, В. В. Разевиг, И. А. Васильев, канд. техн. наук
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва),
В. С. Шитиков (ФГУП «НПО «Техномаш», Москва)
E-mail: sivashov@rslab.ru

ДИАГНОСТИКА ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ С ПОМОЩЬЮ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО РАДИОЛОКАТОРА «РАСКАН-5»

Проведен анализ критических ситуаций на космических аппаратах (КА) типа Space Shuttle (США) и «Буран» (СССР), возникших в результате дефектов теплозащитного и теплоизоляционных покрытий этих летательных аппаратов. Показано, что существующие методы неразрушающего контроля, включая ультразвуковые, не удовлетворяют предъявляемым требованиям и не смогли предотвратить катастрофы с КА Space Shuttle Columbia и серьезного происшествия с КА «Буран» во время его единственного полета. Предложен новый метод диагностики с использованием голографического подповерхностного радиолокатора «Раскан-5/15000», который позволяет выявить внутренние дефекты теплоизоляционного покрытия. Проведены эксперименты с макетами теплоизоляционных покрытий. В результате экспериментов получены радиоизображения, на которых дефекты теплоизоляции имеют достаточный для их идентификации контраст.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, теплозащита, теплоизоляция, ракетно-космическая техника, голографический подповерхностный радиолокатор.

S. I. Ivashov, V. V. Razevig, I. A. Vasiliev (Bauman Moscow State Technical University, Moscow)
V. S. Shitikov (State Enterprise "NPO "Tekhnomash", Moscow)

DIAGNOSTICS OF THERMAL INSULATION AND HEAT PROTECTION COATING OF SPACE SHIPS AND ROCKETS BY HOLOGRAPHIC SUBSURFACE RADAR RASCAN-5

The analysis of critical situations on the spacecrafts Space Shuttle, the U.S.A., and the Buran, the USSR as a result of defects in insulation and heat-protection coatings was performed. It is shown that the existing methods of non-destructive testing including ultrasonic inspection do not meet the requirements and failed to prevent the disaster of the spacecraft Space Shuttle Columbia and serious incidents involving spacecraft Buran during its only flight. A new method for using the holographic subsurface radar RASCAN-5/15000 which reveals the internal defects of coating was proposed. Experiments with models of thermal insulation coatings were executed. The experimental results were displayed in the form of radar images at which defects of heat insulation had enough for their identification contrast.

Keywords: non-destructive testing, heat protection, heat insulation, space and rocket technique, holographic subsurface radar.

Катастрофа космического челнока *Space Shuttle Columbia* несколько лет назад (рис. 1 и 2), а также еще несколько инцидентов, которые, к счастью, не привели к столь же печальным последствиям, вызвали повышенный интерес к разработке новых ме-

тодов и устройств для неразрушающего контроля криогенной теплоизоляции и теплозащиты различных элементов конструкций изделий ракетно-космической техники [1 – 3].

По мнению специалистов NASA, одной из при-



Рис. 1. Взлет *Space Shuttle Columbia* 16 января 2003 г.



Рис. 2. Результат катастрофы *Columbia* 1 февраля 2003 г. (собранные на земле остатки корабля были выложены в ангаре)

чин, способных вызвать цепь последующих событий, были дефекты, включая пустоты, в теплоизоляции внешнего топливного бака космического аппарата (КА) (рис. 3 и 4) [4, 5]. Эта теплоизоляция представляла собой слой пенополиуретановой пены (external tank insulation foam [6]) толщиной 2,5...5,0 см [7], нанесенной на внешнюю поверхность бака для уменьшения выкипания криогенных компонентов топлива (жидких водорода и кислорода) на стартовом столе. По одной из гипотез при подготовке к старту, которая продолжалась несколько суток, влага из воздуха проникала в эти пустоты и из-за разницы температур конденсировалась в них. При взлете челнока с увеличением высоты полета происходило быстрое понижение внешнего давления, в результате чего вода, накопленная в полостях, взрывообразно вскипала, создавая повышенное давление в полости, что привело к отрыву слоя теплоизоляционной пены, которая набегающим потоком была отброшена вниз и вызвала повреждение ведущей кромки крыла спускаемого аппарата [4, 6].

Это явление неоднократно наблюдалось до и после катастрофы *Space Shuttle Columbia* 16 января 2003 г. Новый аналогичный инцидент произошел 1 августа 2005 г. со *Space Shuttle Discovery* (обложка **Aviation Week & Space Technology**. 2005. August 1) (рис. 5). К счастью, это происшествие не вызвало каких-либо последствий, так как оторвавшийся кусок теплоизоляции не задел при падении спускаемый аппарат.



Рис. 3. *Space Shuttle Columbia* на стартовом столе (элементы конструкции желтого цвета – теплоизоляционное покрытие внешнего криогенного бака [6])

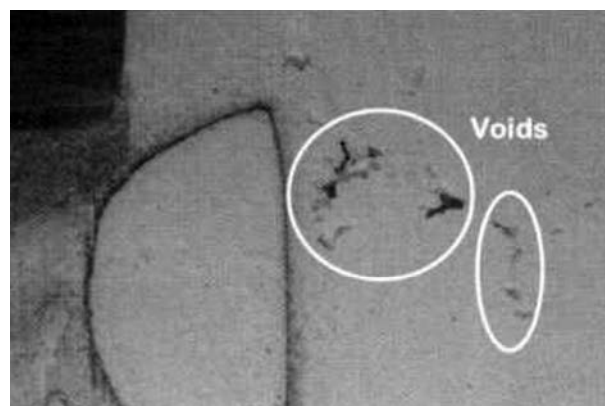


Рис. 4. Поперечный разрез теплоизоляционного покрытия (видны пустоты, которые образовались при нанесении покрытия [4])

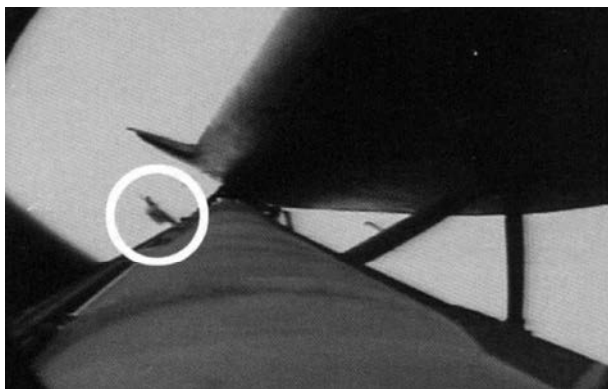


Рис. 5. Оторвавшийся кусок теплоизоляционной пены, падающий вдоль поверхности внешнего топливного бака

Плиточное теплозащитное покрытие возвращаемых аппаратов *Space Shuttle* и отечественного «Бурана», которое подвергается высоким механическим и особенно тепловым нагрузкам при спуске с орбиты, также является фактором риска при использовании КА многоразового действия. Известно, что после первого полета *Space Shuttle* 12 апреля 1981 г., который выполняла погибшая в катастрофе 2003 г. *Columbia*, было потеряно 16 теплозащитных плиток и 148 плиток были повреждены.

Аналогичные проблемы с более серьезными последствиями возникли после первого и единственного полета КА «Буран» 15 ноября 1988 г. Послеполетный осмотр показал наличие как полностью разрушенных, так и частично разрушенных плиток теплозащиты. В большинстве случаев это не приводило к заметным последствиям для конструкции КА. Однако серьезные последствия вызвало разрушение трех теплозащитных плиток непосредственно за 21-й секцией носка крыла (рис. 6) [2].



Рис. 6. Разрушение трех теплозащитных плиток непосредственно за 21-й секцией носка крыла КА «Буран» [2]

Здесь из-за более высоких тепловых нагрузок произошло разрушение несущей конструкции, и через образовавшийся проем были видны нервюры крыла. Потенциально такого рода разрушения могли бы привести к повторению катастрофы, которая случилась со *Space Shuttle Columbia*.

Отрыв плиток теплозащиты связан с нарушениями и недостаточным контролем при их приклеивании к несущей поверхности КА. Наклеивание плиток осуществляется вручную, и в этих условиях трудно осуществить необходимый технологический контроль. Разнообразные методы контроля достаточно подробно описаны в [2], в основном применялись механические методы испытания на отрыв.

Методы ультразвуковой диагностики, которые широко применяются при неразрушающем контроле относительно однородных конструкций, например металлических или бетонных, оказываются недостаточно эффективными при обследовании пенополиуретановой теплоизоляции, применяемой на внешнем топливном баке *Space Shuttle*. Это связано с высокой пористостью пенополиуретана, которая приводит к высокому уровню затухания в нем звуковых волн [8]. Аналогичные соображения касаются плиток из спеченного кварцевого волокна на внешней поверхности спускаемого аппарата на *Space Shuttle* и КА «Буран». Их высокая пористость также препятствует распространению звуковых волн.

Альтернативой ультразвуковому контролю является СВЧ-диагностика с использованием голографических подповерхностных радиолокаторов [1, 3]. Основным преимуществом СВЧ-диагностики по сравнению с ультразвуковой является качественное отличие свойств распространения электромагнитных и звуковых волн в неоднородной среде. Электромагнитная волна взаимодействует с неоднородностью только в том случае, если диэлектрический контраст неоднородности достаточно велик. Таким образом, электромагнитные волны СВЧ-диапазона практически без потерь распространяются в пористых материалах, какими являются пенополиуретан или плитки теплозащиты на основе спеченного кварцевого волокна.

Плитки теплозащиты подвергают гидрофобизации для предотвращения проникновения в них влаги. Только что изготовленные плитки проверяют методом погружения их в воду на 24 ч и последующим взвешиванием [2]. Однако этот метод не годится для проверки влагоизоляции плиток, уже установленных на КА. Особенно это актуально при послеполетном осмотре. В этом случае можно так-

же предложить методы СВЧ-контроля, в частности, рассматриваемый в данной работе подповерхностный радиолокатор «Раскан-5», обладающий повышенной чувствительностью к присутствию влаги из-за высокой диэлектрической проницаемости воды [9].

Разработка голографических подповерхностных радиолокаторов типа «Раскан». Конструкция подповерхностных радиолокаторов базируется на классических принципах радиолокации. Сигнал, излучаемый в среду, отражается от локальной неоднородности, если ее диэлектрическая постоянная отличается от диэлектрической постоянной среды. Отраженный сигнал принимается приемной антенной локатора и усиливается. После соответствующей обработки результат отображается на дисплее компьютера.

Наиболее распространенным типом подповерхностных радиолокаторов, нашедших широкое практическое применение, являются импульсные локаторы [10]. Этот тип локаторов излучает, как правило, один период близкого по форме к синусоиде сигнала. Главным преимуществом импульсных локаторов является большая глубина зондирования за счет применения переменного коэффициента усиления сигнала в приемнике по мере увеличения времени запаздывания, а также возможность непосредственного измерения глубины подповерхностного объекта по измерению времени запаздывания отраженного сигнала при условии, что хотя бы приблизительно известна скорость распространения электромагнитной волны в среде. К существенным недостаткам импульсных локаторов следует отнести возникновение эффекта реверберации, т.е. переотражения импульса между антеннами ло-

катора и металлической несущей конструкции, на которой крепится теплоизоляционное или теплоизолирующее покрытие. Этот эффект существенно искажает истинную картину расположения объектов в обследуемой среде [11].

От этого недостатка свободны голографические подповерхностные радиолокаторы, которые рассматриваются в настоящей статье. Голографический подповерхностный радиолокатор относится к классу локаторов с непрерывным излучением и получил свое название по методу, используемому в нем, – регистрации интерференционной картины (радиоголограммы) опорной и отраженной от объекта волн на некотором участке зондируемой поверхности. Отметим, что в течение длительного времени считалось, что из-за ограничений, связанных с сильным поглощением в зондируемых средах, данный тип радиолокаторов вряд ли найдет сколько-нибудь заметное применение на практике [10, 12]. Однако разработка голографических подповерхностных радиолокаторов серии «Раскан», их серийное производство и достаточно широкое практическое применение показали, что при обследовании приповерхностных слоев зондируемой среды данный тип приборов обладает целым рядом преимуществ, в частности высоким разрешением в плоскости зондирования. Описание конструктивных особенностей радиолокаторов «Раскан» различных модификаций и областей их применения приведено в [9, 13].

Для пояснения принципа получения изображения в голографическом радиолокаторе проведем оптическую аналогию (рис. 7). Пусть плоская монохроматическая волна с постоянной фазой, называемая опорной, падает на точечный объект и рассеивается на нем. В результате интерференции опорной и рассеянной волн на плоском экране, расположенном на некотором расстоянии за объектом, образуется интерференционная картина. Если поверхность экрана расположена по нормали к направлению распространения опорной волны, интерференционная картина представляет собой зонную пластинку Френеля. После проявления полученной картины и повторного облучения экрана опорной волной за экраном возникает мнимое изображение объекта за экраном. Аналогичная картина возникает при регистрации радиолокатором «Раскан» голограмм точечного объекта в среде [9].

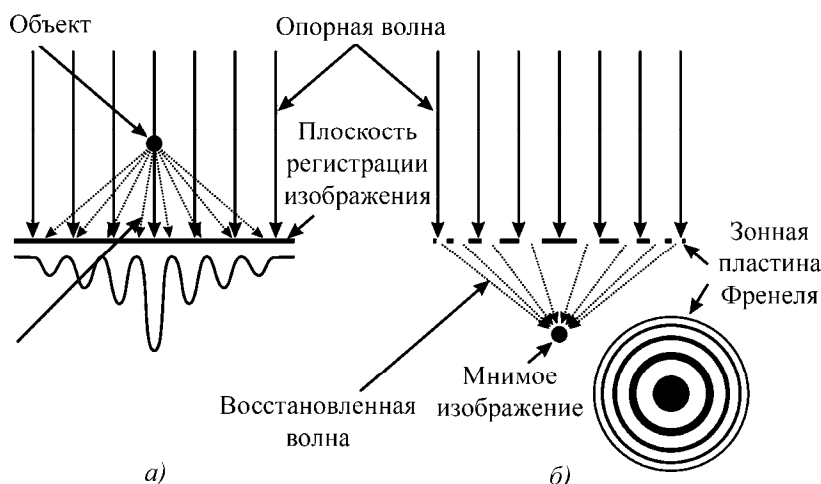


Рис. 7. Регистрация простейшей оптической голограммы (а) и ее восстановление (б)



Рис. 8. Изображение подповерхностного радиолокатора «Раскан-5/15000» в комплекте поставки

В некоторых случаях регистрируемые «Расканом» радиоголограммы удивительно похожи на оптические голограммы, приведенные в классической работе Д. Габора [14]. Существенным отличием является значительно меньшее количество интерференционных линий на радиоголограмме, так как при тех же приблизительно характерных размерах системы длина волны в радиодиапазоне на несколько порядков превосходит оптический диапазон [15].

Этот принцип и был реализован в голографических подповерхностных радиолокаторах типа «Раскан», за разработку которых и запуск их в серийное производство группе сотрудников Лаборатории дистанционного зондирования была присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники. На рис. 8 приведено изображение подповерхностного радиолокатора «Раскан-5/15000», который использовался в описываемых ниже экспериментах. Радиолокаторы серии «Раскан-5» оснащены квадратурным приемником сигналов, что позволяет регистрировать комплексные радиоголограммы исследуемых объектов. Антенна радиолокатора с установленными на ней передатчиком и приемником подключается к компьютеру через микроконтроллерный блок, который управляет передатчиком, принимает оцифрованные данные и осуществляет их передачу в компьютер.

Описание образца пакета теплоизоляции с искусственно заложенными дефектами. Образец с искусственно заложенными дефектами представляет собой пакет теплоизоляции, полученный приклеиванием слоя пенополиуретана толщиной 40 мм на лист алюминивно-магниевого сплава толщиной 5 мм с нанесенным подслоем грунтовки и клея 200 мкм, с последующей механической обработкой поверхности до заданной толщины. Чертеж образца с расположением дефектов приведен на рис. 9.

Площадь образца составляет 500×400 мм. В пенополиуретановом слое был вырезан цилиндр диамет-

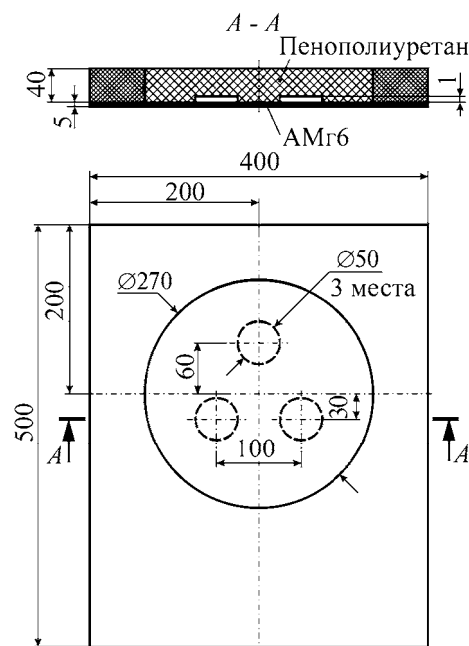


Рис. 9. Чертеж образца

ром 270 мм, а затем приклеен на то же самое место. На внутренней поверхности слоя были выполнены три выборки диаметром 50 мм для имитации непрочлея. В местах выборок на металлической поверхности отсутствовал клеевой подслоя. Грунтовка и клей были нанесены на внутреннюю поверхность выборок. Данный образец имитирует непрочлея пакета теплоизоляции на границе грунтовка–металлическая поверхность.

Результаты экспериментов с образцами пакетов теплоизоляции с искусственно заложенными дефектами. Как указывалось ранее, для экспериментов использовали одну из модификаций голографических подповерхностных радиолокаторов серии «Раскан-5» с рабочим диапазоном частот 13,8...14,6 ГГц, обладающую наивысшей разрешающей способностью и чувствительностью к неоднородностям исследуемых объектов. Выбор диапазона частот прибора обуславливался тем, что пенополиуретан обладает низким коэффициентом поглощения электромагнитных волн и диэлектрической проницаемостью, мало отличающейся от единицы. По данным [1], комплексная диэлектрическая проницаемость пенополиуретановой теплоизоляции, напыляемой на внешний криогенный топливный бак КА *Space Shuttle*, составляет $\varepsilon = 1,05...i0,003$, а ее плотность – около 4 % плотности воды. Это связано с тем, что пенополиуретан, используемый в качестве тепло- и звукоизоляции, обладает низкой плотностью, и в основном состоит из пор, заполненных воздухом.

Вместе с тем необходимо отметить, что свойства полиуретана зависят от технологии производства и могут изменяться в широких пределах. Так, плотность его промышленных образцов может находиться в диапазоне $48...287 \text{ кг/м}^3$ [8]. Пенополиуретан имеет закрытую ячеистую структуру. Его отличительными особенностями являются легкость, прочность, низкий коэффициент теплопроводности и влагопоглощения, устойчивость к влиянию микроорганизмов, гниению, плесени, перепадам температур, что позволяет считать пенополиуретан универсальным теплоизоляционным материалом [8]. Пенополиуретан является разновидностью пенопластов. Он обладает самой низкой из современных теплоизоляторов теплопроводностью, составляющей в зависимости от плотности $0,019...0,033 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, что обуславливает минимальную толщину изоляции (5 см пенополиуретана по теплопроводности равнозначны примерно 10 см минеральной ваты). Благодаря этим характеристикам пенополиуретан как теплоизоляционный материал нашел широкое применение в различных областях народного хозяйства, а также военной и ракетно-космической технике.

Следует отметить, что использовать диапазон частот в районе 15 ГГц и выше для обследования других диэлектрических конструкционных материалов (например, бетон, кирпич и т.д.) не представляется возможным из-за резкого роста коэффициента затухания электромагнитных волн на частотах выше 7...10 ГГц. Так, для обследования строительных конструкций следует ограничиться диапазоном частот от 1,5 до 7,0 ГГц, что во многих случаях дает положительные результаты [9].

При проведении экспериментов по обследованию образцов полиуретановых теплозащитных покрытий использовали стандартный метод ручного построчного сканирования поверхности (рис. 10).



Рис. 10. Эксперименты с образцами теплозащитных покрытий:
а – процесс сканирования образца; б – обработка результатов экспериментов

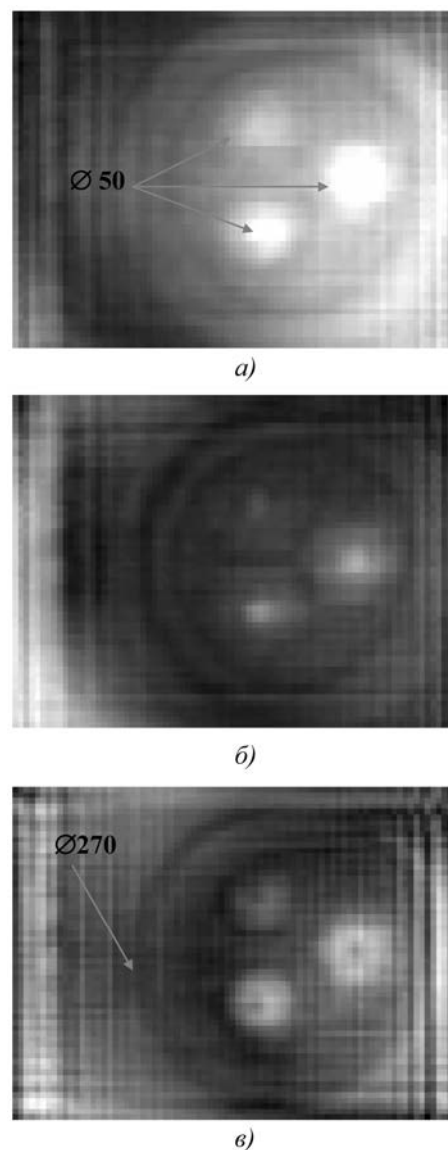


Рис. 11. Результат обследования образца

На рис. 11 приведен результат сканирования образца на частоте 13,8 ГГц. I - и Q -кватратуры (рис. 11, а, б) представляют собой действительную и мнимую части регистрируемой радиоголограммы исследуемого объекта соответственно. На рис. 11, в приведен результат восстановления голограммы.

Для восстановления зарегистрированных с помощью радиолокатора «Раскан» комплексных радиоголограмм применяли метод, изначально разработанный для акустической голографии и в дальнейшем усовершенствованный в [16, 17].

Достоинством данного метода является то, что в нем не используются приближения дальней зоны. Поперечное разрешение δ_x определяется только дифракционными соотношениями и для среды без потерь приблизительно выражается как

$$\delta_x \approx \frac{\lambda z_0}{2d}, \quad (1)$$

где λ – длина волны излучения; z_0 – расстояние от объекта до поверхности регистрации; d – характерный размер обследуемой поверхности. Необходимо отметить, что не имеет смысла значительно увеличивать размеры области сканирования, так как антенна имеет определенную ширину диаграммы направленности (ДН), соответственно, при некотором поперечном удалении антенны от объекта радиолокатор перестает на него реагировать. Поэтому в соотношении (1) d – это некий эффективный размер апертуры, определяемый шириной ДН антенны и глубиной залегания объекта.

Как указывалось ранее, одно из основных отличий между оптической голографией и подповерхностной радиоголографией заключается в относительных размерах регистрирующих систем. Для оптической голографии отношение характерного размера системы L к длине волны составляет порядка $L/\lambda \cong 10^6$.

Тот же параметр для радиолокатора «Раскан» составляет всего несколько единиц, и законы геометрической оптики в этом случае неприменимы из-за дифракционных эффектов. При формировании изображений основную роль играют эффекты дифракции, и в результате восстановления получается не форма объекта, как в оптике, а функция, описывающая его отражательную способность. В большинстве случаев по виду этой функции можно достаточно точно определить форму объекта [13].

Рассмотрим метод восстановления радиоголограмм более подробно. Пусть плоский объект, параллельный плоскости сканирования, располагается на расстоянии z_0 от нее (рис. 12).

Продетектированный сигнал $E(x, y)$, зарегистрированный приемником антенны в каждой точке плоскости сканирования, можно выразить как сумму произведений сигналов, отраженных от каждой точки объекта и множителя, описывающего задержку отраженной волны по сравнению с опорной:

$$E(x, y) = \iint r(x', y') e^{-i2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+z_0^2}} dx' dy', \quad (2)$$

где $r(x', y')$ – функция, описывающая отражательную способность объекта (отношение отраженной и падающей волн); $k = 2\pi f/c$ – волновое число;

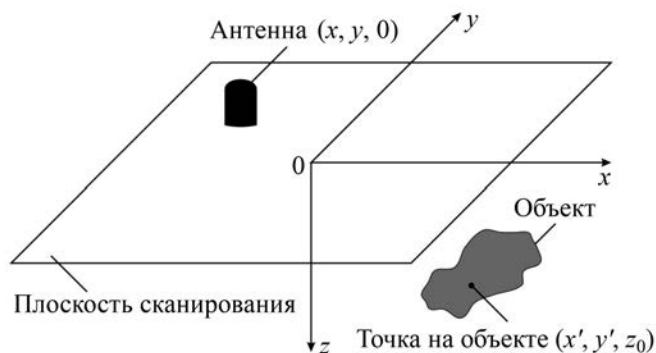


Рис. 12. Геометрия голографической системы

f – частота зондирующего сигнала; двойка в показателе экспоненты возникает из-за двойного хода волны – от антенны до объекта и обратно. В этом выражении не учитывается влияние ДН антенны и затухание сигнала в среде, так как по сравнению с фазой эти амплитудные зависимости слабо зависят от координат и мало влияют на восстановление голограмм [18]. Экспоненциальное выражение в формуле (2) представляет собой сферическую волну, исходящую из точки (x, y) , которая может быть представлена суперпозицией плоских волн [13]:

$$e^{-i2k\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+z_0^2}} = \iint e^{i(k_x(x-x')+k_y(y-y')+k_z z_0)} dk_x dk_y, \quad (3)$$

где k_x, k_y и k_z – проекции волнового числа на соответствующие оси.

Подставляя выражение (3) в (2), получим

$$E(x, y) = \iint \iint r(x', y') e^{-i(k_x x' + k_y y')} dx' dy' \times \times e^{i(k_x x + k_y y + k_z z_0)} dk_x dk_y. \quad (4)$$

Легко увидеть, что подчеркнутое выражение в соотношении (4) является двумерным Фурье-преобразованием от функции $r(x, y)$:

$$F(k_x, k_y) = \iint r(x, y) e^{-i(k_x x + k_y y)} dx dy = \Phi_{2D} \{r(x, y)\}. \quad (5)$$

Перепишав соотношение (4) в виде

$$E(x, y) = \iint F(k_x, k_y) e^{ik_z z_0} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y = \Phi_{2D}^{-1} \{F(k_x, k_y)\} e^{ik_z z_0} \quad (6)$$

и используя свойства Фурье-преобразований:

$$F(k_x, k_y) = \Phi_{2D} \{E(x, y)\} e^{-ik_z z_0}, \quad (7)$$

$$r(x, y) = \Phi_{2D}^{-1} \{ F(k_x, k_y) \}, \quad (8)$$

получим выражение для функции отражения объекта

$$r(x, y) = \Phi_{2D}^{-1} \{ \Phi_{2D} \{ E(x, y) \} e^{-ik_z z_0} \}. \quad (9)$$

Учитывая соотношение между волновым вектором и его проекциями

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2; \quad k_z = \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2}, \quad (10)$$

получаем окончательное выражение, используемое для восстановления голограмм,

$$r(x, y) = \Phi_{2D}^{-1} \left\{ \Phi_{2D} \{ E(x, y) \} e^{i\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0} \right\}, \quad (11)$$

которое, в частности, было применено и для восстановления радиоголограмм на рис. 11.

Необходимо отметить, что для использования данного метода необходимо знать глубину залегания объекта. В случае если глубина неизвестна, можно провести послойное восстановление голограммы с некоторым шагом по глубине и выбрать слой, где объект сфокусирован наилучшим образом. В некоторых сложных случаях, например для неоднородных сред с высоким уровнем затухания сигнала, этот метод может дать наилучшую фокусировку на артефакте. Впрочем, подобного рода затруднения характерны для всей подповерхностной радиолокации, так как задача определения положения подповерхностного объекта по измерениям, выполненным на ограничивающей полупространство поверхности, является обратной и некорректной по своей сути.

На рис. 11 вертикальные и горизонтальные полосы являются следствием отражения электромагнитной волны, излучаемой радиолокатором в среду, от торцовых поверхностей образца теплоизоляции, в первую очередь от границы алюминиевого листа, подстилающего слой полиуретана, т.е. возникают в результате краевого эффекта.

Обследование теплозащитных и теплоизоляционных покрытий, наклеенных на металлическую поверхность несущей конструкции, представляет собой достаточно специфическую задачу, так как поверхность металла представляет собой идеальное зеркало для волн СВЧ-диапазона и полностью их отражает, что вносит опреде-

ленную специфику в процесс восстановления радиоголограмм и требует учета при интерпретации полученных результатов.

Для лучшего понимания процессов, происходящих в относительно прозрачных средах, расположенных на металлической поверхности, были проведены эксперименты со спицами, которые втыкали в боковую поверхность образца (рис. 13). В образец были воткнуты две металлические спицы. Спица 1 была погружена параллельно поверхности металла на глубину 13 см на расстоянии от поверхности в 20 мм. Спица 2 была погружена в пенополиуретан на глубину 13,5 см под небольшим углом к поверхности. При этом на наклонной спице при регистрации голограмм должен наблюдаться так называемый эффект зебры, когда контраст объекта меняется по мере изменения расстояния между антенной и объектом, что отчасти и наблюдается на изображениях правой спицы. Более ярко этот эффект представлен в работе [18]. Эффект зебры объясняется зависимостью амплитуды регистрируемого сигнала от соотношения между фазой опорного сигнала, которая постоянна, и фазой отраженного сигнала, которая зависит от расстояния до объекта [9]. Аналогичным образом объясняется и возникновение волнистой структуры при отражении электромагнитной среды от торцов образца на голограммах на рис. 11.

При определении истинной глубины залегания объектов необходимо учитывать еще толщину листа оргстекла – 3 мм, так как сканирование поверхности для улучшения скольжения выполняли через лист такой толщины. Из-за наличия зеркала при восстановлении голограммы, так же как и в оптике, должно наблюдаться зеркальное отражение спицы относительно поверхности металлического листа. При восстановлении радиоголограмм «фокусиров-



Рис. 13. Металлические спицы, воткнутые в пенополиуретановое покрытие образца:

1 – спица 1; 2 – спица 2; 3 – лист алюминиево-магниевого сплава толщиной 5 мм; 4 – слой полиуретана толщиной 40 мм

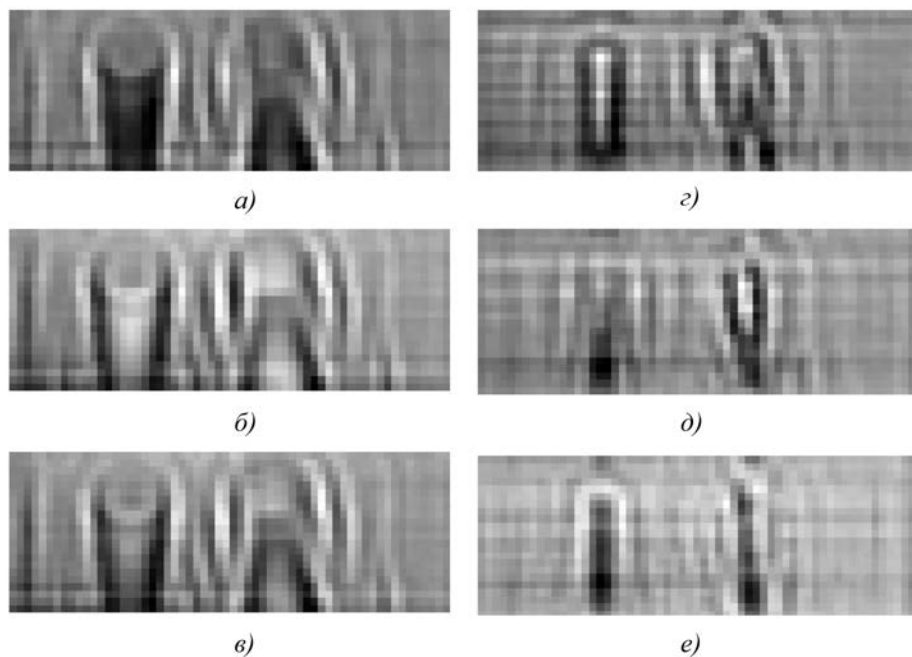


Рис. 14. Результат экспериментов со спицами

ку» изображения проводят на некотором задаваемом оператором расстоянии z . Расстояние, на котором происходит наилучшая фокусировка, принимают за глубину его залегания. Результат восстановления радиоголограмм на разных глубинах в экспериментах со спицами приведен на рис. 14.

На рис. 14, а, б представлены изображения, соответствующие зарегистрированным квадратурам исходной голограммы. Изображения на рис. 14, в – е соответствуют последовательно глубинам восстановления голограмм $z = 0; 2,7; 4,7$ и $6,7$ см. Глубина $2,7$ см приблизительно соответствует глубине залегания объекта, $4,7$ см – положению металлической поверхности, а $6,7$ см – мнимому изображению, которое соответствует зеркальному отражению спицы.

Отметим, что контраст мнимого изображения по отношению к фону поменял знак на противоположный по сравнению с реальным изображением объекта на глубине $2,7$ см. Этот эффект связан с поворотом фазы электромагнитной волны на 180° при ее отражении от поверхности металла, что и приводит к изменению знака контраста мнимого изображения. Необходимы дальнейшие исследования свойств радиоголограмм, регистрируемых в средах, расположенных над металлической поверхностью.

Заключение

Эксперименты показали, что предлагаемый метод обследования полиуретановых теплозащитных покрытий, наклеенных на металлическую поверх-

ность, с помощью голографических подповерхностных радиолокаторов «Раскан-5/1500» позволяет обнаруживать неоднородности и дефекты в их толще. Однако контраст обнаруживаемых дефектов относительно невелик, так как мало различие диэлектрических проницаемостей дефекта и пенополиуретана. Для повышения чувствительности аппаратуры представляется целесообразным повышение рабочей частоты радиолокатора до $24...25$ ГГц. Это предложение оправдано еще и тем обстоятельством, что эксперименты, выполненные с подповерхностным радиолокатором «Раскан-5/7000» с рабочим диапазоном частот $6,4...6,8$ ГГц, показали его непригодность для

обнаружения дефектов в представленных образцах из-за недостатка чувствительности. Таким образом, повышение рабочей частоты прибора должно улучшить его пространственную разрешающую способность и чувствительность. Последнее особенно важно, учитывая характер решаемой задачи [19].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-07-00557-а) и Министерства образования и науки Российской Федерации (грант 7.340.2011).

Библиографический список

1. Shrestha S., Kharkovsky S., Zoughi R., Hepburn F. Microwave and Millimeter Wave Nondestructive Evaluation of the Space Shuttle External Tank Insulating Foam // *Materials Eval.*, 2005. V. 63. N 3. P. 339 – 344.
2. Гофин М. Я. Жаропрочные и теплозащитные конструкции многоэтажных аэрокосмических аппаратов. М., 2003. 672 с.
3. Ivashov S. I., Vasiliev I. A., Bechtel T. D., Snapp C. Comparison between Impulse and Holographic Subsurface Radar for NDT of Space Vehicle Structural Materials // *Progress in Electromagnetics Research Symposium 2007*, Beijing, China, March 26 – 30, 2007. Beijing, 207. P. 1816 – 1819.
4. Moring F. Jr. Putting it in Context // *Aviation Week & Space Technology*. 2003. April 7. P. 31.
5. Babish C. A. et. al. Columbia Accident Investigation Board Report / 2003. August V. 1. P. 248. http://s3.amazonaws.com/akamai.netstorage/anon.nasa-global/CAIB/CAIB_lowres_full.pdf.

6. Donheim M. A. Numbers, Words Tell Different Foam Stories // *Aviation Week & Space Technology*. 2003. February 17. P. 27, 28.
7. Donheim M. A. External Tank Makeover // *Aviation Week & Space Technology*. 2004. October 4. P. 57 – 61.
8. Dombrow B. A. *Polyurethanes*. New York: Reinhold Publishing Corporation, 1957.
9. Ivashov S. I., Razevig V. V., Vasiliev I. A. et al. Holographic Subsurface Radar of RASCAN Type: Development and Applications // *IEEE Journal of Selected Topics in Earth Observations and Remote Sensing*, 2011. V. 4. N 4. P. 763 – 778.
10. Daniels D. J. *Surface Penetrating Radar*. London: Pub. By IEE. 1996.
11. Chapursky V. V., Ivashov S. I., Razevig V. V. et al. Subsurface Radar Examination of an Airstrip // *Proc. of the 2002 IEEE Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies, UWBST'2002*, May 20 – 23, 2002, Baltimore, Maryland USA. Baltimore, 2002, P. 181 – 186.
12. Junkin G., Anderson A. P. Limitations in Microwave Holographic Synthetic Aperture Imaging over a Lossy Half-Space // *Radar and Signal Processing. IEE Proc. F.* 1988. V. 135. N 4. P. 321 – 329.
13. Zhuravlev A. V., Ivashov S. I., Razevig V. V. et al. Holographic Microwave Imaging Radar for Applications in Civil Engineering // *Proc. of the IET Intern. Radar Conf.*, 14 – 16 April 2013, Xian, China. Xian, 2013.
14. Gabor D. A New Microscopic Principle // *Nature*, 1948. V. 161. P. 777–778.
15. Razevig V. V., Ivashov S. I., Vasiliev I. A. et al. Advantages and Restrictions of Holographic Subsurface Radars. Experimental Evaluation // *Proc. of the XIII Intern. Conf. on Ground Penetrating Radar. Lecce, Italy*, 21 – 25 June 2010. Lecce, 2010. P. 657 – 662.
16. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2001. V. 49. N 9.
17. Разевиг В. В., Бугаев А. С., Ивашов С. И. и др. Восстановление микроволновых голограмм, полученных подповерхностным радиолокатором РАСКАН // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2010. № 9. С. 51 – 58.
18. Inagaki M., Windsor C. G., Bechtel T. et al. Three-dimensional Views of Buried Objects from Holographic Radar Imaging // *PIERS Proc. Moscow, Russia*, August 18 – 21, 2009. M., 2009. P. 284 – 287.
19. Матвеев В. И., Артемьев И. Б. Научно-техническая конференция «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности» // *Территория NDT*. 2014. № 2. С. 34 – 36.
3. Ivashov S. I., Vasiliev I. A., Bechtel T. D., Snapp C. (2007). *Comparison between Impulse and Holographic Subsurface Radar for NDT of Space Vehicle Structural Materials*. Progress in Electromagnetics Research Symposium, Beijing, China, March 26 – 30, 2007. 207, pp. 1816 – 1819.
4. Morring F. Jr. (2003). Putting it in Context. *Aviation Week & Space Technology*. April 7, p. 31.
5. Babish C. A. et al. (2003). *Columbia Accident Investigation Board Report*. August Vol. 1, pp. 248. Available at: http://s3.amazonaws.com/akamai.netstorage/anon.nasa-global/CAIB/CAIB_lowres_full.pdf.
6. Donheim M. A. (2003). Numbers, Words Tell Different Foam Stories. *Aviation Week & Space Technology*. February 17, pp. 27, 28.
7. Donheim M. A. (2004). External Tank Makeover. *Aviation Week & Space Technology*. October 4, pp. 57 – 61.
8. Dombrow B. A. (1957). *Polyurethanes*. New York: Reinhold Publishing Corporation.
9. Ivashov S. I., Razevig V. V., Vasiliev I. A. et al. (2011). Holographic subsurface radar of RASCAN type: Development and applications. *IEEE Journal of Selected Topics in Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4), pp. 763-778. doi: 10.1109/JSTARS.2011.2161755
10. Daniels D. J. (1996). *Surface penetrating radar*. London: Pub. By IEE.
11. Chapursky V. V., Ivashov S. I., Razevig V. V. et al. (2002). *Subsurface Radar Examination of an Airstrip*. Proc. of the 2002 IEEE Conf. on Ultra Wideband Systems and Technologies, UWBST'2002, May 20 – 23, 2002, Baltimore, Maryland USA. Baltimore, pp. 181 – 186.
12. Junkin G.; Anderson A. P. (1988). Limitations in microwave holographic synthetic aperture imaging over a lossy half-space. *Radar and Signal Processing. IEE Proc. F.*, 135(4), pp. 321-329.
13. Zhuravlev A. V., Ivashov S. I., Razevig V. V. et al. (2013). *Holographic Microwave Imaging Radar for Applications in Civil Engineering*. Proc. of the IET Intern. Radar Conf., 14 – 16 April 2013, Xian, China. Xian.
14. Gabor D. (1948). A new microscopic principle. *Nature*, 161, 777-778.
15. Razevig V. V., Ivashov S. I., Vasiliev I. A. et al. (2010). *Advantages and Restrictions of Holographic Subsurface Radars. Experimental Evaluation*. Proc. of the XIII Intern. Conf. on Ground Penetrating Radar. Lecce, Italy, 21 – 25 June 2010. Lecce, pp. 657 – 662.
16. Sheen D. M., McMakin D. L., Hall T. E. (2001). Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 49(9).
17. Razevig V. V., Bugaev A. S., Ivashov S. I. et al. (2010). Restore of microwave holograms obtained with subsurface radar, RASCAN. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, (9), pp. 51-58.
18. Inagaki M., Windsor C. G., Bechtel T. et al. (2009). *Three-dimensional Views of Buried Objects from Holographic Radar Imaging*. PIERS Proc. Moscow, Russia, August 18 – 21, 2009. Moscow, pp. 284 – 287.
19. Matveev V. I., Artem'ev I. B. (2014). Scientific and technical conference «Radar systems of low and ultra-low range». *Territoria NDT*, (2), pp. 34-36.

References

- 1 Shrestha S., Kharkovsky S., Zoughi R., Hepburn F. (2005). Microwave and millimeter wave nondestructive evaluation of the space shuttle external tank insulating foam. *Materials Eval.*, 63(3), pp. 339-344.
2. Gofin M. Ia. (2003). *Heat-resistant and heat-shielding structures of reusable aerospace vehicles*. Moscow.