

РАДИОТЕХНИКА

XXI век

9 2010

www.radiotec.ru

**Академик РАН
Юрий Васильевич
Гуляев**



Тел./факс: (495) 625-9241 • E-mail: info@radiotec.ru • [Http://www.radiotec.ru](http://www.radiotec.ru)

Радиолокационные системы

УДК 621.396.967

Экспериментальная оценка параметров голографических подповерхностных радиолокаторов в сравнении с оптической голографией

© Авторы, 2010

В.В. Разевиг – с. н. с., МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: vrzevig@rslab.ru

А.С. Бугаев – академик РАН, Московский физико-технический институт (государственный университет)
E-mail: bugaev@cplire.ru

С.И. Ивашов – к. т. н., МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: sivashov@rslab.ru

И.А. Васильев – к. т. н., МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: ivasiliev@rslab.ru

А.В. Журавлев – к. ф.-м. н., МГТУ им. Н.Э. Баумана. E-mail: azhuravlev@rslab.ru

Т. Биктел – PhD, Franklin and Marshall College, факультет геофизики и окружающей среды
E-mail: tbechtel@fandm.edu

Л. Капинери – Лаборатория ультразвуковых исследований и неразрушающего контроля, факультет электроники и телекоммуникаций, Университет Флоренции, Италия. E-mail: lorenzo.capinieri@unifi.it

Проведены эксперименты по оценке достижимых параметров и качества получаемых изображений голографического подповерхностного радиолокатора типа «Раскан». Выполнено сравнение с оптической голографией. Дан анализ отличий обоих методов.

Ключевые слова: голографические подповерхностные радиолокаторы, импульсные подповерхностные радиолокаторы, затухание электромагнитных волн, среды с потерями, оптическая аналогия.

Experiments for evaluation of the parameters and qualities of images recorded by the holographic subsurface radar of RASCAN type have been performed. Comparison with optical holography is given. The analysis of differences of both methods is carried out.

Keywords: holographic subsurface radar, impulse subsurface radar, attenuation of electromagnetic waves, lossy medium, optical analogy.

Введение

На начальных этапах развития (70 и 80-е годы) подповерхностные радиолокаторы рассматривались как устройства для обнаружения подповерхностных объектов на глубинах несколько метров. Это было результатом использования частотного диапазона 100...500 МГц, доступного в те годы. Разрешение по глубине на этих частотах было ограничено значениями 0,5...1 м, и в основном обследовались земля, многолетние льды и вечная мерзлота [1]. Такая область применения дала название радиолокаторам, как подповерхностные радиолокаторы (в англоязычной литературе Ground Penetrating Radar – GPR). Эта аббревиатура до сих пор широко используется, несмотря на то, что современные подповерхностные радиолокаторы имеют значительно более широкую область применения и применяются не только при работе по земле, но и при обследовании строительных конструкций и других объектов.

Все подповерхностные радиолокаторы по типу излучаемого сигнала можно разделить на три группы [2]:

импульсные радиолокаторы;
радиолокаторы с непрерывным излучением и различными типами частотной модуляции;
голографические радиолокаторы.

В данной статье рассматриваются радиолокаторы последнего типа. Голографические ПРЛ отличаются от двух других типов радиолокаторов необходимостью сканирования обследуемой поверхности (плоской или криволинейной) для регистрации подповерхностной радиоголограммы. В этом смысле можно провести аналогию между ГПРЛ и техникой получения оптических голограмм, впервые предложенной Д. Габором в 1948 г. [3]. В простейшем случае предложенный Габором метод может быть рассмотрен на примере регистрации голограммы точечного объекта. Осесимметричная голограмма такого объекта регистрируется на плоской пластине как интерференция между когерентной плоской волной, падающей на пластину перпендикулярно ей, и волной, рассеянной точечным объектом. Схема получения оптической голограммы Габора приведена на рис. 1 [3, 4].

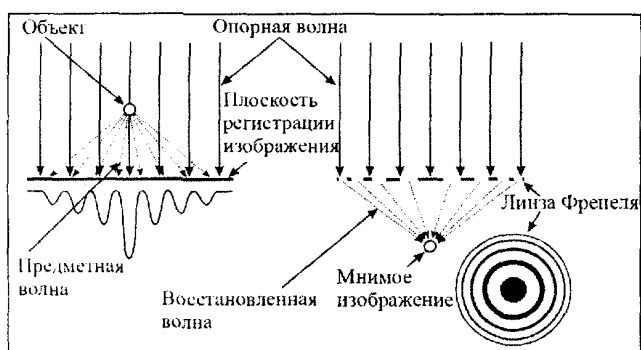


Рис. 1

Пластина с записанной на ней интерференционной картиной называется голограммой. В отличие от оптической фотографии, голограмма содержит информацию не только об интенсивности рассеянной объектом волны, но и о ее фазе. Если облучить голограмму когерентным светом с той же длиной волны, которая использовалась при записи, с другой стороны пластины формируется виртуальное трехмерное изображение. В случае точечного объекта голограмма представляет собой линзу Френеля, а восстановленное изображение – просто точку (рис. 1).

В голографическом методе, в том числе и в подповерхностной радиолокации, существенным является необходимость регистрации изображения на некоторой поверхности, так как разрешение регистрируемого изображения δ в среде без потерь приблизительно определяется соотношением [5]

$$\delta \approx \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{R}{d}, \quad (1)$$

где λ – для волны излучения; R – дальность от объекта до поверхности регистрации; d – характерный размер поверхности регистрации.

Метод Габора имеет много недостатков в плане качества получаемой голограммы и удобства использования [6]. Новый шаг в развитии голографии был сделан Э. Лейтом и Ю. Упатниексом после изобретения лазера. В их работе был предложен метод с использованием когерентного пучка света, падающего под углом на регистрирующую пластину. Схема такого вида голографии приведена на рис. 2. В последующих усовершенствованиях метода использовались зеркала и светоделители.

В подповерхностной радиолокации, как будет показано далее, едва ли можно применить схему Лейта-Упатниекса с наклонным пучком из-за высокого уровня затухания электромагнитных волн в большинстве обследуемых сред.

Тем не менее технология голографии нашла широкое применение в радиолокации. Например, были разработаны голографические радиолокаторы для поиска спрятанного под одеждой оружия при досмотре пассажиров в аэропортах [5]. Радиоголография

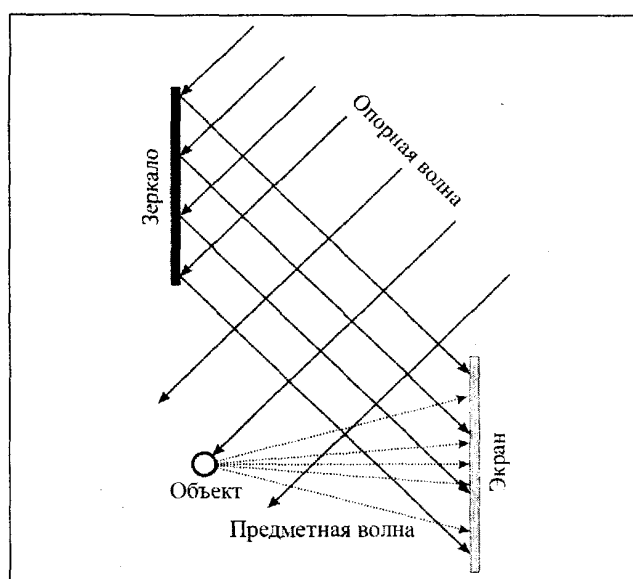


Рис. 2

в воздухе или в безвоздушном пространстве имеет много общего с оптической голографией, так как в этих средах затухание и рассеяние электромагнитных волн отсутствуют или настолько малы, что ими можно пренебречь.

Одно из основных отличий между оптической голографией и подповерхностной радиоголографией заключается в относительных размерах регистрирующих систем. Для оптической голографии отношение размера системы к длине волны составляет порядка $d/\lambda \approx 10^6$ (d – характерный размер системы). Тот же параметр для ГПРЛ составляет всего несколько единиц. Законы распространения световых лучей (рис. 1 и 2), справедливые для геометрической оптики, не могут быть непосредственно применены для систем ГПРЛ, где значительную роль при формировании изображений играют эффекты дифракции. Поэтому можно провести только грубую аналогию между оптической голографией и ГПРЛ, но такая аналогия крайне важна для понимания физических принципов построения голографических подповерхностных радиолокаторов и для интерпретации получаемых радиоголограмм.

Голографические подповерхностные радиолокаторы используются для обследования неоднородных сред с относительно высоким уровнем поглощения и иногда также с высоким уровнем дисперсии. Последнее свойство может иметь большое влияние при обработке многочастотных голограмм. Как показали эксперименты, все эти факторы ухудшают качество получаемых радиоголограмм, и во многих случаях из-за высокого уровня затухания регистрируемые изображения носят характер теневого изображения, на которых интерференционная картина вообще отсутствует [7]. Теоретические исследования влияния свойств среды на качество подповерхностных голограмм недавно были проведены Н. Чубинским (2009) [6]. Затухание в

среде и неоднородности на поверхности и в толще среды ограничивают максимальную глубину зондирования ГПРЛ. Необходимо подчеркнуть, что импульсные радиолокаторы имеют большую глубину зондирования, чем ГПРЛ, что обеспечивается применением стробоскопического приемника с переменным коэффициентом усиления, позволяющим увеличить усиление сигналов, отраженных от глубоко лежащих объектов, так как они имеют большую задержку по времени. Напротив, в ГПРЛ коэффициент усиления в приемнике является постоянной величиной, поэтому основные применения таких приборов ограничены сравнительно небольшими глубинами [8].

На этих глубинах основное преимущество ГПРЛ состоит в способности получать изображения, имеющие более высокое разрешение в плане зондирования, чем у импульсных радиолокаторов. Существует ряд приложений, при которых обследуемые объекты расположены на небольших глубинах или у самой поверхности. К ним относятся:

- поиск противопехотных и противотанковых мин [9,10];
- поиск средств технической разведки в помещениях [4];
- обследование строительных конструкций [11, 12];
- диагностика композитных материалов [13, 14].

В простейшем варианте построения ГПРЛ в качестве опорного используется сигнал прямого прохождения из передающей антенны в приемную [6]. Однако в этом случае на фазу опорного сигнала будут влиять неоднородности поверхности и зондируемой среды. Основная сложность заключается в разработке такой конструкции антенны, которая гарантировала бы независимость фазы опорного сигнала от такого рода неоднородностей. Для достижения этой цели приемная и передающая антенны совмещены и имеют общий центр.

Описание радиолокатора

В экспериментах использовался серийный голографический подповерхностный радиолокатор РАСКАН-4/4000. Радиолокаторы типа РАСКАН производятся уже в течение длительного времени и имеют три модификации, отличающиеся рабочим диапазоном частот. Основные характеристики приборов приведены в таблице.

По сравнению с простейшим вариантом построения ГПРЛ, в радиолокаторах РАСКАН-4 используется многочастотный режим с последовательным переключением фиксированных частот. Такой режим необходим, потому что в одночастотном варианте существует опасность пропуска объектов, расположенных на определенных глубинах. Это объясняется синусоидальной зависимостью чувствительности прибора от глубины расположения объекта, и на «неудачных» глубинах фаза отраженного сигнала будет такой же, как в случае

Параметры	Раскан-4/2000	Раскан-4/4000	Раскан-4/7000
Частотный диапазон, ГГц	1,6...2,0	3,6...4,0	6,4...6,8
Количество рабочих частот	5		
Число каналов	2		
Выходная мощность, Вт	6·10 ⁻³ (*)		
Чувствительность приемника, Вт	10 ⁻⁹		
Разрешение в плоскости зондирования на малых глубинах, см	4	2	1,5
Максимальная глубина зондирования (зависит от свойств среды), см	35	20	15

отсутствия объекта [15]. Однако при правильном выборе диапазона частот объект на любой глубине будет виден на изображении хотя бы на одной из частот.

Радиолокатор РАСКАН-4/4000 состоит из антенны и блока управления, который подключается к компьютеру через USB порт (рис. 3). Компьютер не требует доработок, необходимо только установить специальное программное обеспечение для управления прибором и регистрации голограмм.

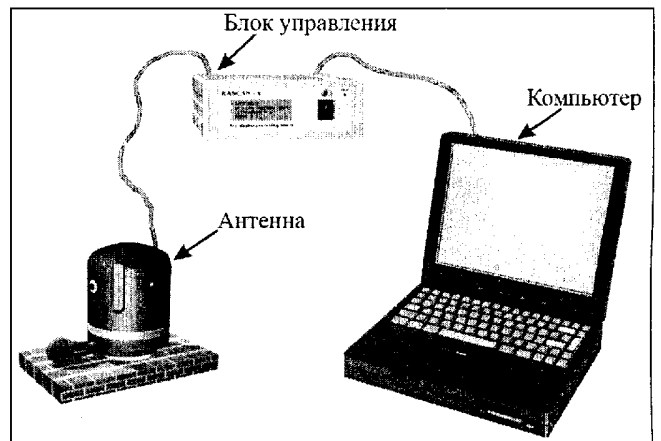


Рис. 3

Результаты экспериментов

Были проведены эксперименты по записи радиоголограмм объектов, заложенных в различные конструкционные материалы: листы гипсокартона и пенобетонные блоки. Размер листа гипсокартона составлял 60×125 см при толщине 1,2 см, а размер пенобетонного блока – 60×25×5 см. На рис. 4 приведена фотография двух пенобетонных блоков и стопки листов гипсокартона.

(*) Уровень излучаемой мощности гарантирует полную безопасность для персонала при использовании радиолокаторов типа «РАСКАН», получено санитарно-эпидемиологическое заключение № 77.01.09.650.П.041358.10.05 от 19.10.2005.

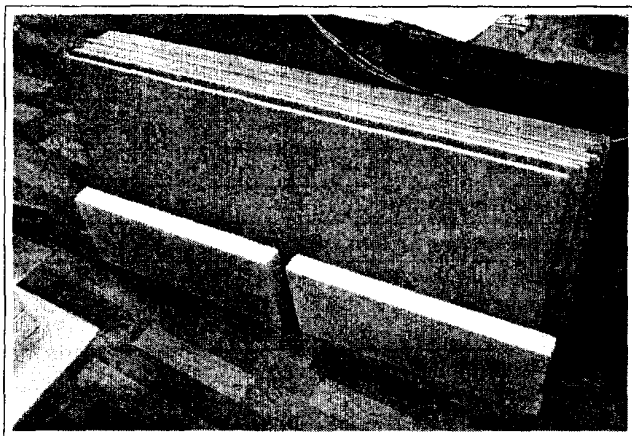


Рис. 4

В первой серии экспериментов проводилось зондирование букв из алюминиевой фольги, из которых было сформировано слово «RASCAN». Буквы были вклеены между двумя листами обычной бумаги, размер слова составлял $44 \times 11,5$ см (рис. 5). Обследуемый объект был положен на нижний лист гипсокартона и сверху накрывался последовательно другими такими же листами. После добавления каждого нового листа проводилось сканирование полученной стопки радиолокатором РАСКАН-4/4000. В результате каждого сканирования одновременно регистрировались десять радиоголограмм: на каждой из 2-х поляризаций и на каждой из 5 частот. Сканируемая поверхность в каждом случае представляла собой прямоугольную область размерами 65×28 см.



Рис. 5

Для получения качественных голограмм необходима предварительная тренировка оператора, так как процесс регистрации заключается в построчном сканировании поверхности, при котором антенна прибора перемещается вручную. Для предотвращения искажений получаемых изображений линии должны быть параллельны. Время, требуемое для обследования, зависит от размера зондируемой области и от шага по оси Y (расстояния между строками сканирования). Обычно для радиолокатора РАСКАН-4/4000 шаг по оси Y составляет 1 см, а шаг по оси X (расстояние между измерениями

вдоль линии сканирования) – 0,5 см. Таким образом, размер единичного пикселя в приведенных экспериментах составляет $0,5 \times 1$ см. Очевидно, что уменьшение шага по оси Y увеличивает время сканирования, но увеличение шага приводит к снижению качества получаемого изображения. Выбор оптимального размера пикселя определяется разрешением радиолокатора на малых глубинах, которое, в свою очередь, зависит от частоты сигнала и размеров антенны и составляет, как показывают эксперименты, порядка 2 см для прибора РАСКАН-4/4000 [16].

На рис. 6 представлены восемь радиоголограмм, зарегистрированных на параллельной поляризации и при частоте зондирующего сигнала 4 ГГц. Толщина каждого листа 1,2 см, справа указано количество листов над объектом. На первых трех изображениях, полученных при зондировании через 1, 2 и 3 листа соответственно, слово RASCAN вполне разборчиво. При увеличении числа листов контуры слова становятся все более размытыми, и изображения приобретают волновую природу.

Это явление легко объясняется тем, что на самых малых глубинах зондирования сигнал, отраженный по нормали от поверхности букв, имеет очень высокий уровень – выше, чем опорный сигнал и чем отражения под наклонными углами.

С увеличением глубины, отражения от букв под наклонными углами становятся сравнимы по уровню с опорным сигналом. В этом случае проявляется волновая природа радиоизображений. Радиоголограмма, зарегистрированная через 8 листов гипсокартона (глубина порядка 10 см), напоминает оптическую голограмму, приведенную Д. Габором в его классической работе [3] (рис. 7, где a – микроснимок оригинального объекта; b – микроснимок, сделанный через ту же оптическую систему, которая была использована для восстановления; c – интерференционная картина; d – восстановления оригинала: буквы снова стали читаемыми). Если качественно сравнить два типа голограмм, полученных в оптическом (рис. 7, b) и СВЧ-диапазонах (рис. 6, z), видно, что они имеют схожую природу.

Основное отличие этих двух типов голограмм заключается в количестве видимых зон Френеля. Типичная оптическая голограмма имеет $10^4 \dots 10^5$ дифракционных линий [6], в то время как на радиоголограмме подповерхностного радиолокатора видно только несколько таких линий. Как говорилось выше, это объясняется тем, что в оптике отношение характерных размеров регистрирующей системы к длине волны (d/λ) намного больше, чем в радиоголографии.

В данной статье сознательно опущена задача восстановления голограмм, полученных ГПРЛ, так как ее решение связано со специальным рассмотрением вопросов затухания электромагнитных волн в среде и влияния на процедуру восстановления длины волны, сравнимой с размерами регистрирующей системы.

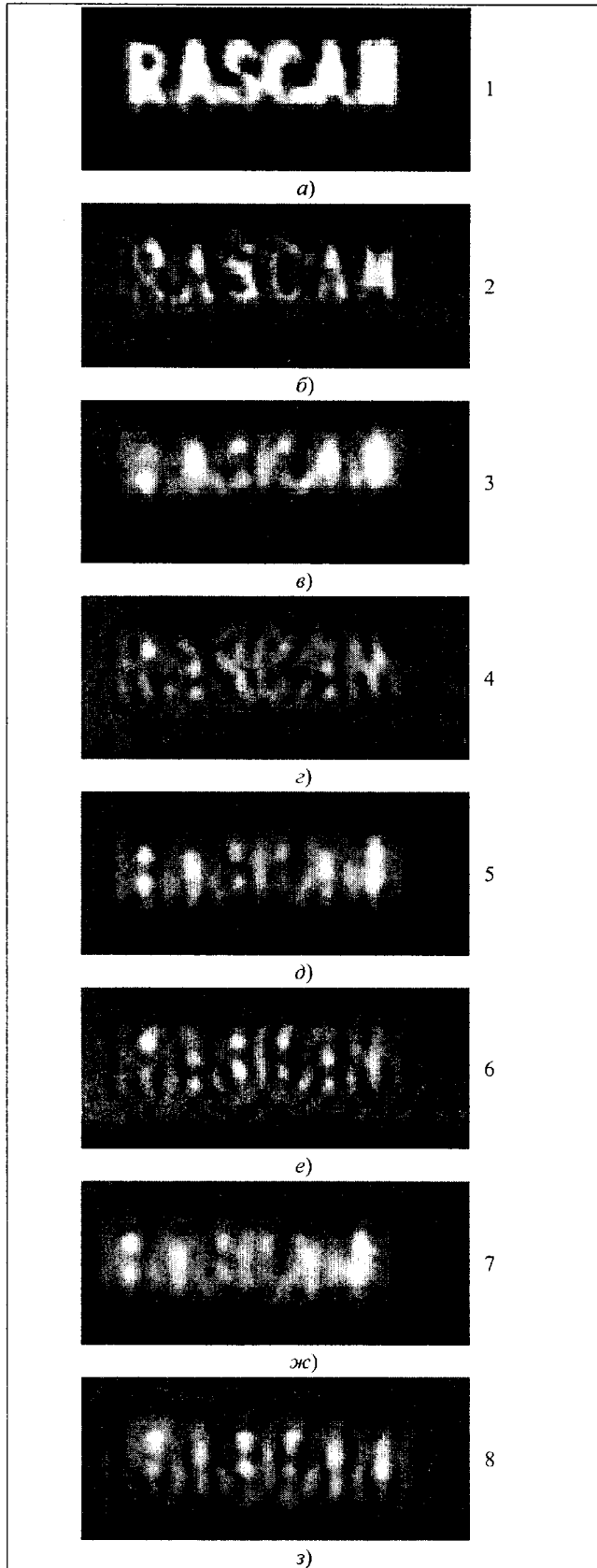


Рис. 6

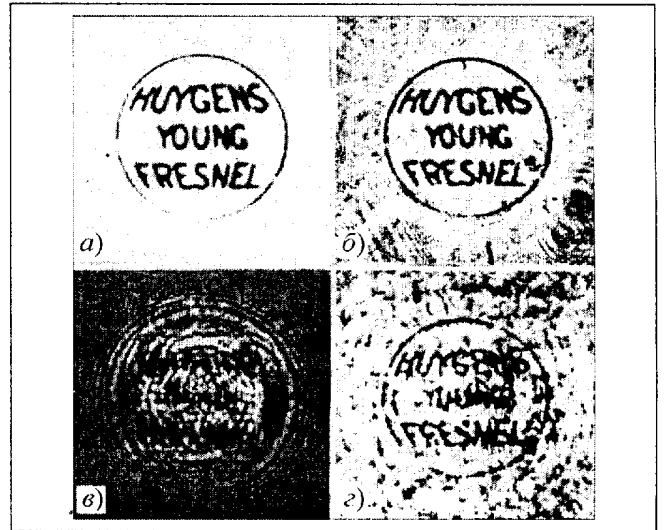


Рис. 7

Не существует прямой аналогии между математическими моделями восстановления голограмм в оптическом и радио диапазонах. Простейшая модель восстановления точечного объекта по его радиоголограмме была предложена в [16]. При записи и восстановлении оптических голограмм предполагается, что среда распространения волн прозрачна и однородна для данной длины волны, что представляется вполне оправданным. В случае радиоголографии подповерхностных объектов это совсем не так, что значительно изменяет процесс восстановления и делает его сложным (или даже нереализуемым) для всех объектов, кроме имеющих самую простую форму.

Эксперименты с радиолокатором РАСКАН-4/4000 показали, что основная причина ухудшения качества радиоголограмм связана с затуханием и неоднородностями в среде, в которой распространяются электромагнитные волны при регистрации голограммы. Очень часто наибольшее влияние на оба фактора оказывает уровень влажности среды. В отличие от почти полной прозрачности воды в видимом диапазоне (не принимая во внимание туман и дождь), влажность грунта или конструкционных материалов коренным образом меняет их комплексную диэлектрическую проницаемость $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ [2]. Сама по себе вода имеет аномально высокую действительную часть диэлектрической проницаемости на низких частотах $\epsilon'_w = 81$, которая в СВЧ-диапазоне обладает значительной дисперсией, т.е. зависит от частоты. Основное влияние ϵ' оказывает на скорость распространения электромагнитных волн в среде, которая обратно пропорциональна $\sqrt{\epsilon'}$. Мнимая часть диэлектрической проницаемости ϵ'' пропорциональна проводимости среды. Обычно вода в грунте и строительных материалах содержит растворенные соли, что увеличивает электропроводность и, следовательно, затухание. Типичные представители обследуемых

сред – бетон и глина – имеют высокий уровень электропроводности и затухания в большинстве ситуаций, которые наблюдаются на практике.

На рис. 8 приведен пример влияния неравномерного увлажнения среды на качество регистрируемых изображений и возможность обнаружения подповерхностных объектов. Изображения на рис. 8, *a* и *б* получены при сканировании стопки из двух пенобетонных блоков. Размер области сканирования – 40×18 см. Шаг сканирования по обеим осям составлял 0,5 см. Верхний блок был сильно и неравномерно увлажнен, что дало рисунок из темных и светлых пятен на рис. 8, *a*. Для следующего эксперимента между блоками был заложен медный провод, результат представлен на рис. 8, *б*. Несмотря на наличие провода, регистрируемое изображение практически не изменилось по сравнению с предыдущим случаем – уровень вариаций отраженного сигнала, связанный с вариациями влажности, маскировал сигнал от провода, который был практически незаметен на глаз. На рис. 8, *в* приведен результат вычитания изображений на рис. 8, *a* и *б*. Здесь, когда за счет процедуры вычитания удалены вариации влажности, можно увидеть место заложения провода. К сожалению, этот простой метод нельзя использовать в реальных условиях, так как в каждом случае, как правило, имеется только одно изображение – либо с искомым или предполагаемым в зондируемой среде объектом, либо без него.

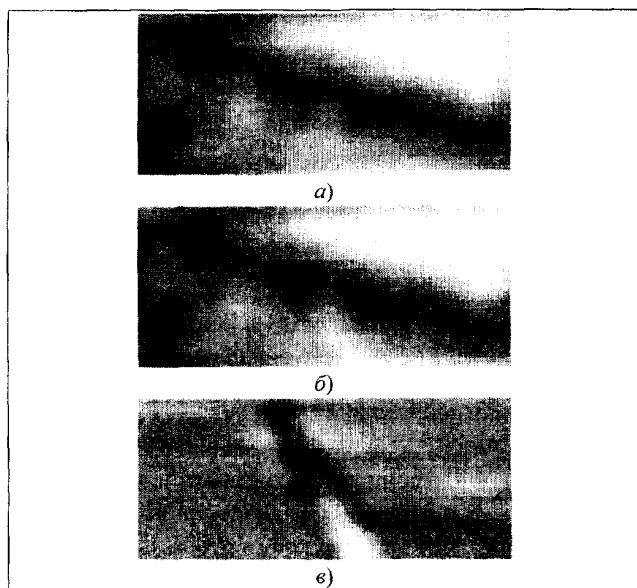


Рис. 8

Если соблюдать математическую корректность, процедуры вычитания или сложения неприменимы к голографическим изображениям в силу их нелинейной природы. Но вследствие высокого уровня затухания получаемые радиоизображения слабо соответствуют понятию «голограмма». Поэтому операция вычитания допустима, хотя и с некоторыми оговорками.

Наиболее существенной проблемой при использовании ГПРЛ является высокий уровень затухания электромагнитных волн в обследуемых средах (например, в бетоне), что часто встречается при практическом применении радиолокаторов. Представляет интерес сравнение голограмм объектов, полученных в средах с разным уровнем затухания. На рис. 9, *a* приведена радиоголограмма 51 мм итальянской ракеты ARF/8-M3 SNIA, заложенной в сухой песок с относительно низким уровнем затухания [5]. Здесь явно видна волновая природа изображения, и можно наблюдать несколько concentric дифракционных линий. На рис. 9, *б* приведено радиоизображение фрагмента железобетонной стены. Железобетон имеет значительно более высокий уровень затухания по сравнению с песком [2], и на этом рисунке волновая структура вообще не просматривается, а изображение напоминает скорее рентгеновское, чем голограмму.

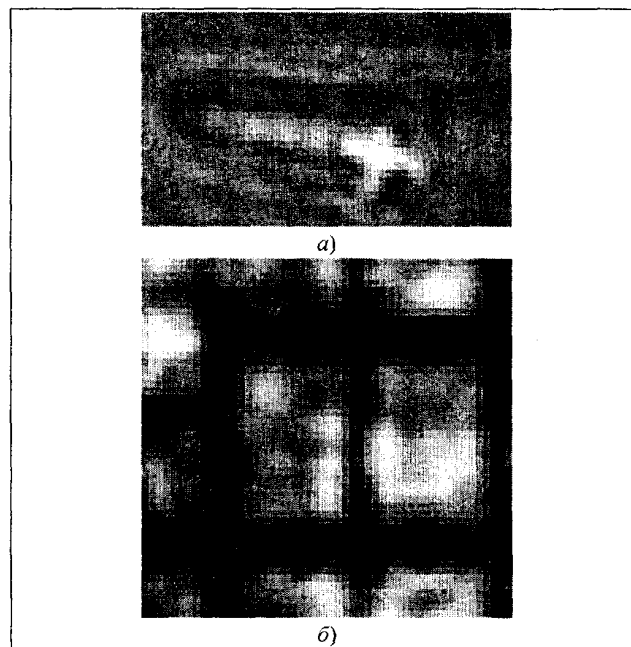


Рис. 9

Влияние затухания на качество радиоизображений, регистрируемых голографическим подповерхностным радиолокатором, было теоретически исследовано в [6]. Основной вывод этой работы заключается в том, что количество дифракционных линий уменьшается с возрастанием затухания среды, и при определенном уровне затухания в голограмме остается только первая зона Френеля или ее часть.

Этот эффект имеет простое физическое объяснение. Для формирования дифракционных линий ГПРЛ должен регистрировать сигнал, отраженный от объекта под наклонными углами. Так как под такими углами расстояние от объекта до антенны больше, чем в надири, общее затухание будет больше, и объект может быть невидимым. Кроме того, чувствительность антенны па-

дает с отклонением линии визирования от надира. Если уровень отраженного сигнала достаточен только при наблюдении объекта в надир, то изображение будет «геневым», как на рис. 9, б. В этом случае голографическая природа изображения не проявляется, в отличие от рис. 9, а.

Для иллюстрации этого эффекта были проведены эксперименты по поперечному сканированию медного провода в различных условиях. Уровень регистрируемого сигнала A вдоль линии сканирования приведен на рис. 10 для трех случаев: 1 – провод заложен в стопку из 8 листов гипсокартона под четвертый слой; общая толщина четырех листов над проводом – 5 см; 2 – провод заложен между двумя сухими пенобетонными блоками толщиной 5 см каждый; 3 – провод заложен между двумя влажными блоками из пенобетона.

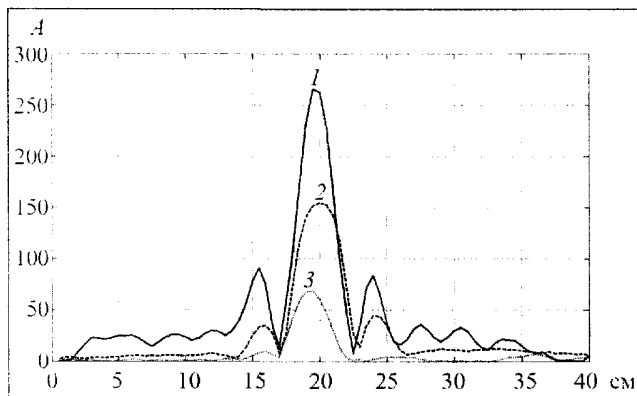


Рис. 10

На рисунке ясно видно уменьшение уровня боковых лепестков с увеличением затухания в среде, что и ведет к исчезновению интерференционной картины. Для описанных выше трех случаев отношение главного максимума к первому боковому лепестку составляет 2,9; 3,4 и 6,3 соответственно.

● Голографические подповерхностные радиолокаторы серии РАСКАН – уникальный и специфический тип подповерхностных радиолокаторов со своей областью применения. Голографические ПРЛ не могут сравниться с импульсными локаторами по эффективной глубине зондирования даже при сравнимом диапазоне рабочих частот. Однако во многих случаях ГПРЛ могут существенно дополнить импульсные приборы, особенно если есть необходимость получения высококачественных изображений с высоким разрешением на малых глубинах.

Запись и восстановление радиоголограмм возможно только в средах с невысоким уровнем затухания электромагнитных волн. В средах же с высоким затуханием, таких как бетон, РАСКАН получает изображения, которые могут легко быть интерпретированы визуально, но по своим свойст-

вам эти изображения имеют мало общего с истинными голограммами, регистрируемыми, например, в оптическом диапазоне.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ №МК-694.2009.9 и Российского фонда фундаментальных исследований.

Литература

1. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / под ред. М.И. Финкельштейн. М.: Недра. 1986. С. 128.
2. Daniels D.J. Surface-penetrating radar // Pub. by IEE. London. 1996.
3. Gabor D. A new microscopic principle. Nature. 161. 1948. P. 777–778. <http://www.nature.com/physics/looking-back/gabor/index.html#f2>.
4. Ivashov S., Razevig V., Vasilyev I., Zhuravlev A., Bechtel T. and Capineri L. The holographic principle in subsurface radar technology // International Symposium to Commemorate the 60th anniversary of the Invention of Holography, Springfield, Massachusetts, USA, October 27–29. 2008. P. 183–197, http://www.rslab.ru/downloads/ivashov_sem_2008.pdf.
5. McMakin D.L., Sheen D.M., Griffin J.W. and Lechelt W.M. Extremely high-frequency holographic radar imaging of personnel and mail. Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C31) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense V, edited by Edward M. Carapezza, Proc. of SPIE. 2006. V. 6201, 62011W.
6. Чубинский Н.П. Возможности голографических методов при зондировании сред с потерями // Труды IV Всероссийской конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром. 30.06–3.07.2009. С. 47–60. <http://www.mivlgu.ru/conf/murom2009/img/doclad/lecture/3.pdf>.
7. Razevig V.V., Ivashov S.I., Sheyko A.P., Vasilyev I.A., Zhuravlev A.V. An Example of Holographic Radar Using at Restoration Works of Historical Building, Progress // In Electromagnetics Research Letters. 2008. V. 1. P. 173–179. <http://ceta.mit.edu/PIERL/pierl01/21.07120603.pdf>.
8. Junkin G. and Anderson A.P. Limitations in microwave holographic synthetic aperture imaging over a lossy half-space, Communications, Radar and Signal Processing // IEE Proceedings F. 1988. V. 135. Issue 4. August. P. 321–329.
9. Ivashov S.I., Razevig V.V., Sheyko A.P., Vasilyev I.A. A review of the remote sensing laboratory's techniques for humanitarian demining // Proceedings of International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, 15–18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium. 2003. V. 1. P. 3–8. http://www.rslab.ru/downloads/paper_id106.pdf.
10. Capineri L., Ivashov S., Inagaki M., Windsor C., Bechtel T. Holographic subsurface radar intended for searching of mines in the soil. Final report on the NATO collaborative linkage grant CBNPR.N. RCLG9 82520. 2009.
11. Ivashov S.I., Makarenkov V.I., Razevig V.V., Sublin V.N., Sheyko A.P., Vasiliev I.A. Concrete floor inspection with help of subsurface radar // Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'2000, May 23–26, 2000, University of

- Queensland, Gold Coast, Queensland, Australia. P. 552–555. http://www.rslab.ru/downloads/floor_gpr_2000.pdf.
12. Capineri L., Falorni P., Borgioli G., Bulletti A., Valentini S., Ivashov S., Zhuravlev A., Razevig V., Vasiliev I., Paradiso M., Inagaki M., Windsor C., Bechtel T. Application of the RASCAN holographic radar to cultural heritage inspections, *Archaeological Prospection* 16. 2009. P. 218–230. <http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/fulltext/122520547/PDFSTART>.
 13. 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*. P. 1816–1819. <http://www.rslab.ru/downloads/piers07.pdf>.
 14. Lu T., Snapp C., Chao T.-H., Thakoor A., Bechtel T., Ivashov S., Vasiliev I. Evaluation of holographic subsurface radar for NDE of space shuttle thermal protection tiles, *Sensors and Systems for Space Applications. Proceedings of SPIE*. 2007. V. 6555. <http://www.rslab.ru/downloads/psi65550s.pdf>.
 15. Иваиов С.И., Васильев И.А., Журавлев А.В., Разевиг В.В. Разработка технологии голографических подповерхностных радиолокаторов и ее применение // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009. № 1–2. С. 5–18. <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr4&art=5860>.
 16. Chapursky V.V., Ivashov S.I., Razevig V.V., Sheyko A.P., Vasiliev I.A. Microwave hologram reconstruction for the RASCAN type subsurface radar // *Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR'2002, April 29 – 2 May 2002, Santa Barbara, California USA*. P. 520–526. <http://www.rslab.ru/downloads/psi000520.pdf>.

Поступила 21 апреля 2010 г.

Comparison of Holographic Subsurface Radars Technology with Optical Holography

© Authors, 2010

V.V. Razevig, A.S. Bugaev, S.I. Ivashov, I.A. Vasiliev, A.V. Zhuravlev, T. Bechtel, L. Capineri

Holographic subsurface radars (HSR) are not in common usage now; possibly because of the historical view amongst radar practitioners that high attenuation of electromagnetic waves in most media of interest will not allow sufficient depth of penetration. It is true that the fundamental physics of HSR prevent the possibility to change receiver amplification with time (i.e. depth) to adapt to lossy media (as is possible with impulse subsurface radar or ISR). However, use of HSR for surveying of shallow subsurface objects, defects, or inhomogeneities is an increasingly proven area of application. In this case HSR can record images with higher resolution than is possible for ISR images. This paper presents experiments with HSR imaging in media with different degrees of attenuation, and illustrates the principle of HSR through an optical analogy.