

УДК 621.396.969

**Обнаружение и дистанционная диагностика людей
за препятствиями с помощью радиолокационных средств**

**Detection and Remote Diagnostics by Radar
of Humans behind Obstacles**

А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов, В.В. Разевиг, А.П. Шейко
A.S. Bugaev, I.A. Vasiliev, S.I. Ivashov, V.V. Razevig, A.P. Sheyko

Радиолокационные средства, способные обнаруживать и осуществлять диагностику состояния живых людей за препятствиями и в условиях плохой видимости, могут найти самое широкое применение. Их потенциальными потребителями являются: службы спасения, антитеррористические подразделения и правоохранительные органы. Возможно их применение и в медицине. Проведённые эксперименты с использованием модернизированного подповерхностного радиолокатора с непрерывным излучением и цифровой обработкой сигнала показали перспективность предлагаемого метода. Были записаны осциллограммы сигналов и их спектры Фурье для сердцебиения, дыхания и органов речи человека, находящегося за препятствием (стеной).

The radar capable to detect and perform diagnostics of a state of the human being behind obstacles and in conditions of bad visibility could be used for the manifold applications. The potential consumers of the radar are: rescue services, antiterrorist detachments and law-enforcement bodies. It is possible also to use this method in medicine. In this paper, the experiments with using of modernized continues wave subsurface radar are described. The recorded oscillograms and their frequency spectrums for heartbeat, respiration and articulation of the man, which is taking place behind an obstacle (wall), are presented.

Введение. Для зондирования непрозрачных твердых сред – грунтов, строительных материалов и конструкции зданий традиционно используются ультразвуковые и рентгеновские датчики. Они уже нашли широкий ряд применений: от систем безопасности до медицинских диагностических приборов. Однако, область применения ультразвуковых приборов ограничена зондированием сплошных сред с минимальным количеством включений и разрывов: вода, человеческое тело, а также некоторые типы конструкционных материалов (крупногабаритные металлические заготовки, монолитный бетон и т.д.) Недостатком же рентгеновских аппаратов является необходимость двухстороннего подхода к зондируемому объекту, что не всегда возможно. Рентгеновские приборы широко применяются в медицине, в системах безопасности аэропортов для обследования багажа и неразрушающем контроле в промышленности в случаях, когда двухсторонний доступ к обследуемым деталям технологически возможен.

Основным преимуществом радиолокационного зондирования является способность электромагнитных волн распространяться в разнообразных диэлектрических средах с высокой степенью неоднородности и, кроме того, возможно зондирование «на отражение», т.е. когда приёмник и передатчик расположены с одной стороны исследуемого объекта. Исследование сложных сред при одностороннем подходе и является основной областью применения радиолокационного зондирования. Радиолокаторы, применяемые в этих случаях, принято называть в литературе подповерхностными [1].

В течение длительного времени подповерхностные радиолокаторы разрабатывались с целью обнаружения только неподвижных объектов, как правило, в грунтах. Основными областями применения традиционных подповерхностных радиолокаторов являются:

- зондирование грунтов для обнаружения подземных коммуникаций (труб, кабелей и т.д.) [1, 2];
- обследование участков местности с целью обнаружения взрывоопасных предметов [3, 4];
- зондирование строительных конструкций для обнаружения закладных деталей, дефектов и скрытых объектов (например, подслушивающих устройств) [5, 6]
- обнаружение вещественных доказательств в криминалистике [7].

Классическая подповерхностная радиолокация является сложившейся научной дисциплиной, а сами локаторы производятся серийно как в России, так и за рубежом.

В настоящее время обострился интерес к использованию методов и средств подповерхностной радиолокации для обнаружения и диагностики людей, находящихся в завалах или за стенами строительных конструкций. Эта задача может быть, по-видимому, решена с помощью радиолокационных средств, работающих на длинах волн в диапазоне 3 – 30 см (1 – 10 ГГц). В этом случае за счёт вычитания сигналов, отражённых от неподвижных объектов, можно добиться высокой чувствительности при обнаружении объектов, границы которых подвержены механическим колебаниям. При отражении зондирующего сигнала от подвижной границы будет происходить изменение фазы сигнала, которое может быть зафиксировано тем или иным способом. По имеющимся в литературе данным, чувствительность данного метода при регистрации в радиодиапазоне механических колебаний может достигать 10^{-9} м [8]. Будем называть зондирование в радиодиапазоне объектов с подвижной границей – радиовибролокацией. Причины, вызывающие механические колебания зондируемых объектов, могут иметь различную природу. Эти колебания могут быть вынужденными, т.е. они могут вызываться внешним источником, например, механическим вибратором [8], или быть спонтанными, как в случае сокращений сердечной мышцы или дыхательных движений грудной клетки [9].

У человека объектами, подверженными более или менее периодическим колебаниям, являются сокращения сердечной мышцы (частоты в диапазоне 0,8 – 2,5 Гц) и колебания грудной клетки в процессе дыхания (частоты в диапазоне 0,2 – 0,5 Гц). При этом конкретное значение частот определяется физической нагрузкой и состоянием организма испытуемого. При зондировании человеческого тела электромагнитные волны отражаются от границ раздела сред, имеющих различную диэлектрическую проницаемость, значение которой в первую очередь зависит от процентного содержания крови в том или ином органе тела. Наиболее сильные отражения возможны от границ раздела воздух – грудная клетка, грудная клетка – лёгкие, а также от границы ткань тела – кровь. Последнее будет особенно контрастно для сердца и крупных сосудов.

Дистанционное определение параметров пульса и дыхания человека, находящегося за препятствием или в открытом пространстве, является основной задачей настоящего исследования. Эта задача может быть решена при условии создания достаточно чувствительного радиолокационного датчика и разработке алгоритмов фильтрации фоновых

отражений, которые могут маскировать полезный сигнал. Последнее обстоятельство является основным фактором, сдерживающим практическое применение методов радиовибролокации. Наличие фоновых отражений может быть связано с регистрацией сигналов, отраженных оператором, выполняющим исследования, или другими людьми, находящимися в зоне проведения измерений. Кроме того, помехи могут создавать работающие машины и механизмы, движение листвы и веток деревьев, бродячие животные и другие подвижные объекты. Все это требует создание антенны с минимальными боковыми и задними лепестками диаграммы направленности и разработки методов их экранировки.

Можно предположить, что основными биологическими приложениями радиовибролокации будут являться:

- обнаружение живых людей, погребённых под завалами строительных конструкций в результате природных или техногенных катастроф. Актуальность задачи определяется необходимостью для спасателей приступить к разборке завалов в первую очередь в тех местах, где есть надежда обнаружить живых людей;
- обнаружение раненых на поле боя;
- обнаружение людей и параметров их перемещения за строительными конструкциями в ходе проведения антитеррористических операций [9, 10];
- дистанционная диагностика лиц в ходе скрытых или открытых проверок, например, в аэропортах (бесконтактный детектор лжи);
- бесконтактное определение параметров пульса и дыхания у больных, для которых контактные датчики по тем или иным причинам не могут быть использованы [11, 12];
- регистрация речевых сигналов в тех случаях, когда использование акустических микрофонов нежелательно или невозможно.

Описание экспериментов. В основе технологии, применяемой в ходе экспериментальных работ, лежит метод, разработанный при создании локаторов подповерхностного зондирования с непрерывным излучением. В качестве датчика в экспериментах использовался доработанный датчик типа «Раскан» [4, 5], работающий по принципу радиоинтерферометра, со следующими параметрами:

рабочая частота радиолокатора	1,6 ГГц ($\lambda=19$ см)
коэффициент усиления	40 дБ
полоса регистрируемых сигналов	0,03 – 3 Гц
динамический диапазон принимаемых сигналов	60 дБ
частота снятия отсчётов	20 Гц
габариты антенного устройства:	
диаметр	120 мм
высота	200 мм

Выбор рабочей частоты радиолокатора определялся в первую очередь требованиями зондирования через препятствие. Хотя на более высоких частотах, как показано в [9] при использовании частоты 24,1 ГГц, возможности распознавания и диагностики ритмов сокращения сердечной мышцы более широкие, этот частотный диапазон практически неприменим из-за его высокого затухания в строительных конструкциях, особенно при достаточно высокой их влажности. При попытке использования частотного диапазона < 1 ГГц, длина волны становится больше размеров зондируемого объекта и, соответственно, падает величина полезного сигнала.

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Радиолокатор состоит из: передатчика - 1, приемно-передающей рупорной антенны - 2, детектора - 3, полосового фильтра - 4, усилителя - 5, интерфейсного блока (ИБ) - 6 и электронно-вычислительной

машины (ЭВМ) - 7. Устройство функционирует следующим образом. Управляющий сигнал ЭВМ устанавливает на выходе цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) ИБ заданную величину управляющего напряжения. Нагрузкой генератора является приемно-передающая рупорная антенна. Принимаемый антенной сигнал детектируется и после прохождения через полосовой фильтр усиливается усилителем постоянного тока и поступает на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ИБ. Данные от АЦП передаются в ЭВМ. После обработки результаты измерений отображаются на экране в реальном масштабе времени.

Для ввода и обработки сигнала радиолокатора в качестве интерфейсного блока использовался разработанный прототип универсального блока цифровой регистрации аналоговых сигналов. Питание ИБ осуществляется от сети постоянного тока 12 В, что позволяет использовать его в полевых условиях при питании от аккумулятора. Блок позволяет оцифровывать низкочастотные сигналы по четырем каналам одновременно с максимальной частотой 25 кГц и имеет разрядность АЦП 10 бит. Дополнительно, для управления, в блоке предусмотрено два канала ЦАП со временем установления 70 мкс и 6 линий цифрового ввода/вывода. Для удобства управления и диагностики предусмотрен вывод на встроенный жидкокристаллический индикатор. Для управления ИБ используется специально разработанное математическое обеспечение.

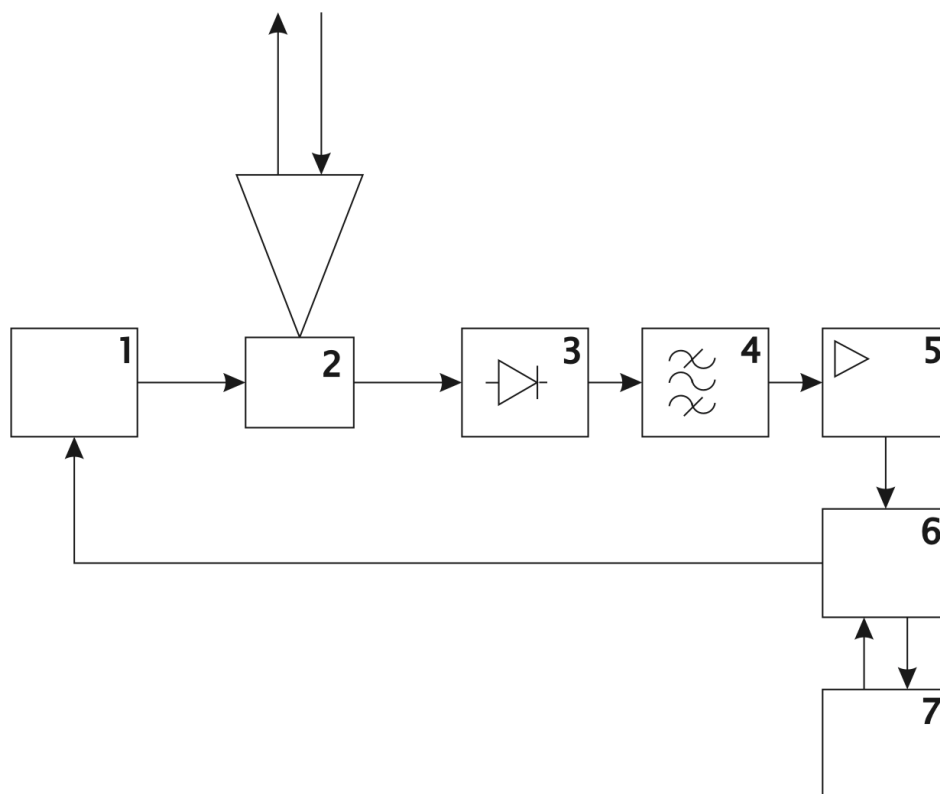


Рис.1. Блок-схема радиолокатора-интерферометра.

Передатчик представляет собой генератор (1), управляемый напряжением (ГУН). Диапазон возможной перестройки частоты ГУН составляет от 1,5 до 2 ГГц при мощности генератора - 10 мВт. Детектор (3) выполнен на основе СВЧ диода Шотки с нулевым смещением. Полосовой фильтр (4) выполнен по схеме Баттерворта второго порядка с полосой пропускания от 0,05 до 3 Гц. Полоса фильтра выбиралась с учётом возможного диапазона измеряемых колебаний биологических объектов. Усилитель постоянного тока (5) состоит из двух каскадов с регулируемым коэффициентом усиления от 20 до 50 дБ.

Для оценки собственных шумов аппаратуры и фоновых отражений производилась регистрация сигналов в различных условиях. При отсутствии в зоне видимости антенны перемещающихся объектов при максимальном усилении величина регистрируемого сигнала не превосходит трех разрядов АЦП, а при перекрытии апертуры антенны радиопоглощающим покрытием ворсового типа величина регистрируемого сигнала не превышает первого разряда.

Схема эксперимента приведена ниже на рис. 2. Толщина стены, за которой находился испытуемый, составляла около 10 см. Сам испытуемый располагался на расстоянии порядка 1 м от стены. Антенна радиолокатора крепилась непосредственно на стене. Для снижения помех из задней полусферы антенна радиолокатора и часть поверхности стены завешивалась радиопоглощающим покрытием размером 2×2 м.

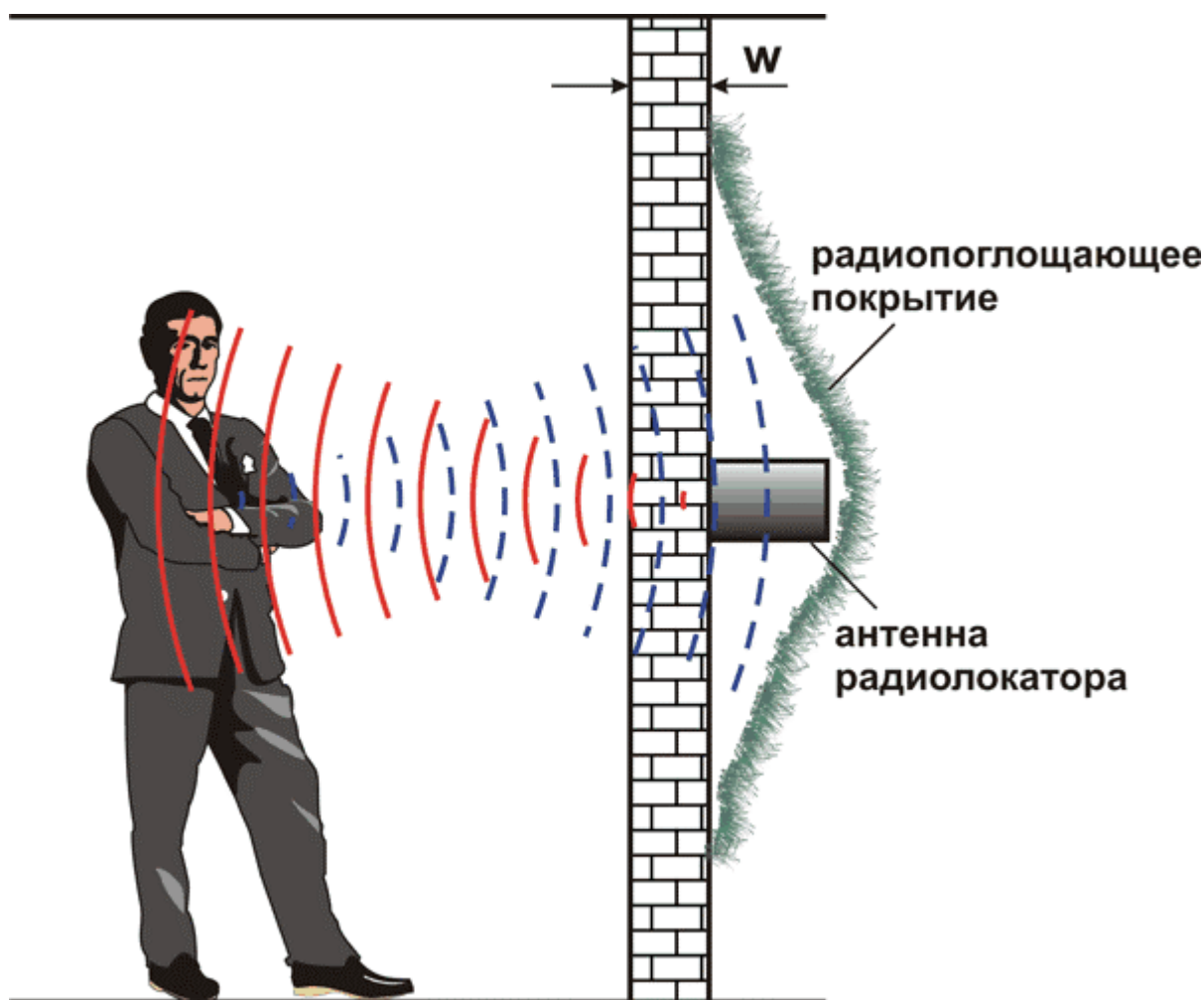


Рис. 2. Схема эксперимента.

Экспериментальные результаты. На рис. 3 приведена полученная в ходе лабораторных экспериментов осциллограмма дыхания и сердцебиения неподвижного человека, а на рис. 4 - осциллограмма сердцебиения человека, который задерживал дыхание в течение 60 сек. Для сравнения на рис. 5 изображена осциллограмма фона, т.е. при отсутствии людей в зоне регистрации сигналов радиолокатора.

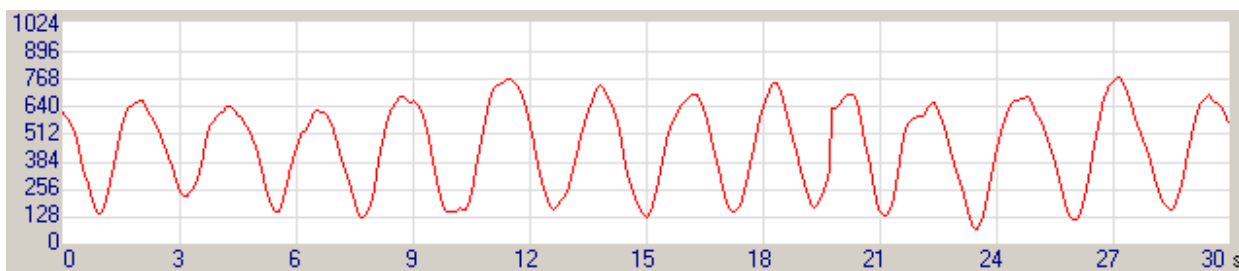


Рис. 3. Осциллограмма сигналов, отраженных от спокойно дышащего человека.



Рис. 4. Осциллограмма сигналов человека при задержке дыхания.

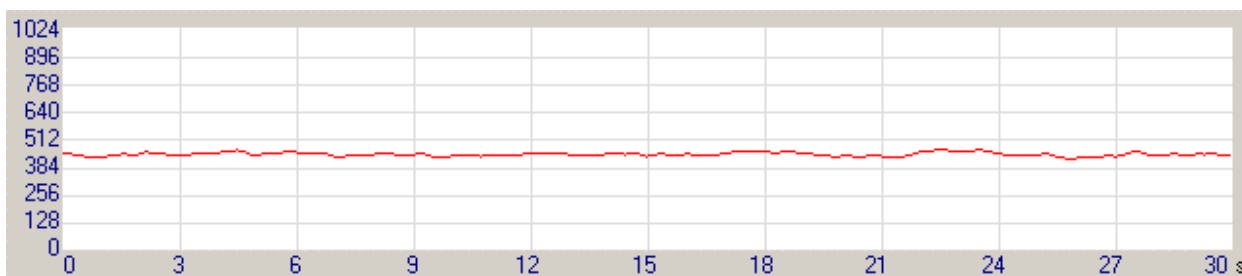


Рис. 5. Осциллограмма фона при отсутствии людей в зоне наблюдения.

В спокойном состоянии частота пульса испытуемого составляла около 65 ударов в минуту. Поскольку амплитуда колебаний и объём легких значительно превосходят аналогичные параметры сердца, то сокращения сердечной мышцы наблюдаются в виде высокочастотной модуляции на фоне сокращений грудной клетки, что видно из представленных осциллограмм.

Для выделения компонент сердцебиения использовался цифровой нерекурсивный фильтр порядка $M = 256$, настроенный на центральную частоту $f_o = 1,2$ Гц при полосе пропускания $\Delta f = 0,6$ Гц, рис. 6. Аналогичный фильтр с параметрами $f_o = 0,4$ Гц и $\Delta f = 0,4$ Гц применялся для выделения ритмов дыхания, рис. 7. Коэффициенты фильтров отвечали окну Поттера $w(m)$ [13]:

$$w(m) = \frac{d_0 + 2 \sum_{i=1}^3 d_i \cos \left[\pi i \frac{(m-M)}{M} \right]}{s}; \quad m = 0, 1, \dots, M - 1,$$

где M – порядок фильтра, а $d_0 = 1$; $d_1 = 0,684988$; $d_2 = 0,202701$; $d_3 = 0,017712$ и

$$s = d_0 + 2 \sum_{i=1}^3 d_i.$$

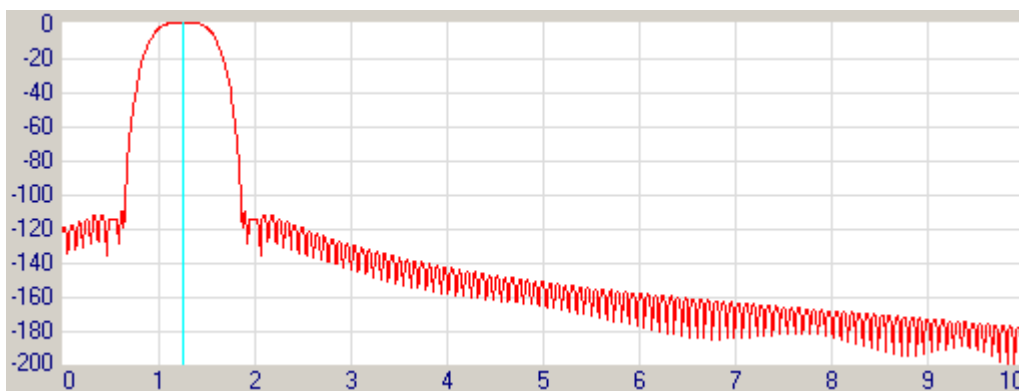


Рис. 6. Частотная характеристика фильтра при $f_0 = 1,2$ Гц.

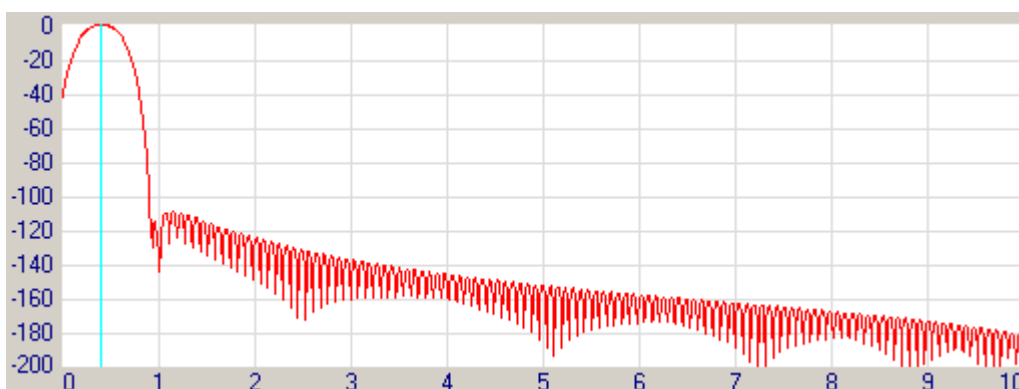


Рис. 7. Частотная характеристика фильтра при $f_0 = 0,4$ Гц.

После цифровой фильтрации сигнал подавался на блок 256-точечного БПФ с предварительной весовым взвешиванием по Хэммингу.

На рис. 8-10 приведены спектры сигналов на выходе соответствующих цифровых фильтров, при действии на входе этих фильтров сигналов дыхания и сердцебиения, представленных на рис. 3-5. На каждом рисунке слева приведен спектр сигнала на выходе фильтра, настроенного на частоту дыхания, а справа – спектр сигнала на выходе фильтра, настроенного на частоту сердцебиения.

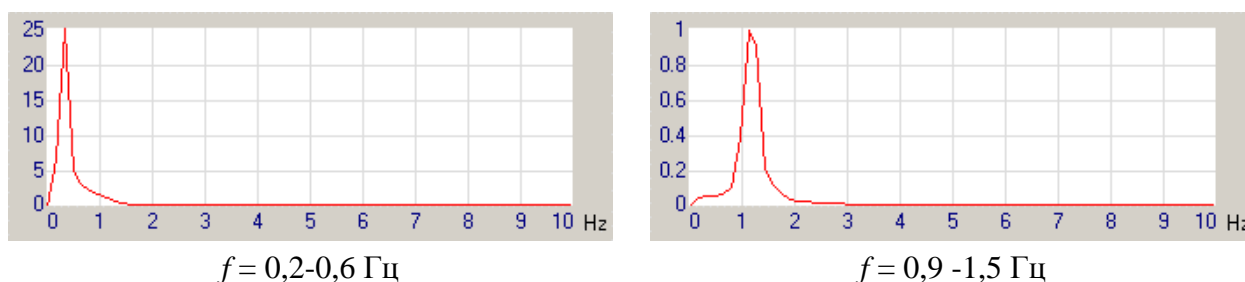


Рис. 8. Спектры сигналов у спокойно дышащего человека после фильтрации.

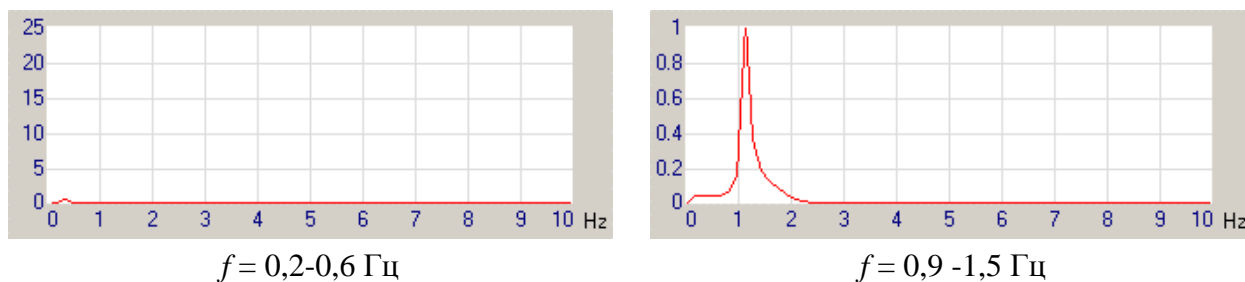


Рис. 9. Спектры сигналов у человека, задержавшего дыхание, после фильтрации.

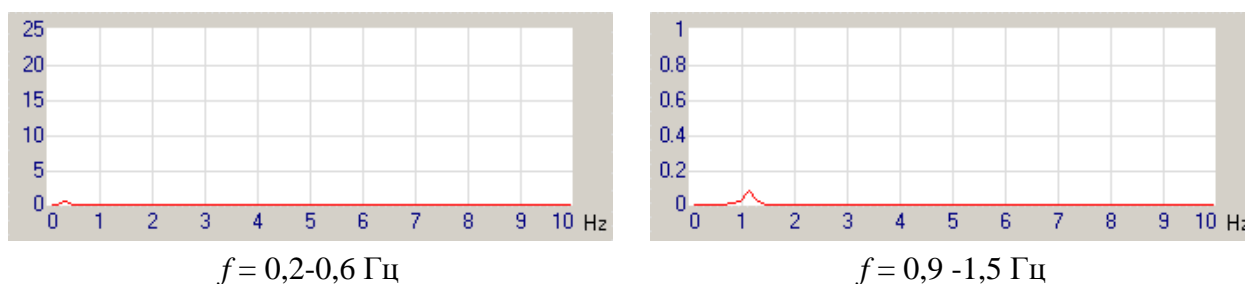


Рис. 10. Результаты фильтрации сигналов фона.

На рис. 8-10 хорошо видно, что амплитуда спектральных компонент дыхания существенно выше амплитуд компонент сердцебиения. В наших условиях измерений это отличие составляет приблизительно 25 раз. Учитывая это, спектры для лучшего восприятия приведены в различных масштабах. В тоже время, фильтрация позволяет уверенно выделять сигнал сердцебиения на фоне дыхания, рис. 8. При задержке дыхания спектр получается более узкий, рис. 9, и, как показали эксперименты, его максимум постепенно смещается к частотам 1,2-1,5 Гц с увеличением времени задержки дыхания. Последний эффект связан с учащением сердцебиения при кислородном голодании, а его конкретное значение зависит от индивидуальных особенностей испытуемого. При отсутствии людей в зоне наблюдения радиолокатора в спектре сигналов фона практически отсутствуют как составляющая дыхания, так и составляющая сердцебиения, см. рис. 10.

В другой серии экспериментов были записаны осциллограммы сигналов при речи человека, произносящего последовательно слова: один, два, три,... один, два, три... В этом эксперименте происходит наложение трёх процессов: сердцебиения, дыхания и артикуляции человека. Учитывая, что полоса пропускания сигналов ограничена только 3 Гц, пока нет оснований утверждать, что данные измерений в столь узкой полосе могут быть основой для распознавания речи человека.



Рис. 11. Осциллограмма записи сигналов при артикуляции в процессе речи человека.

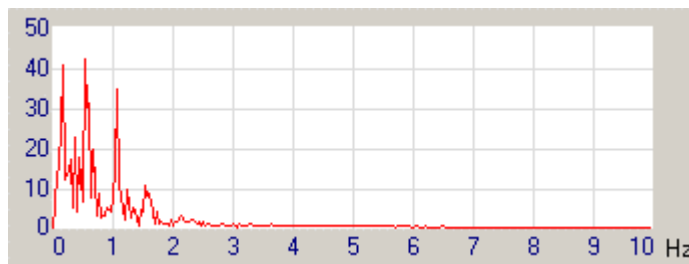


Рис. 12. Спектр сигналов человека при артикуляции органов речи.

Полученные в экспериментах результаты во многом аналогичны сигналам, регистрируемым в экспериментах со сверхширокополосными импульсными радиолокаторами выполненными, в свободном пространстве [11, 12]. Однако использование радиолокатора с монохроматическим сигналом упрощает схему экспериментальной установки и последующую обработку результатов. Основным недостатком данного подхода является невозможность стробирования принимаемого сигнала по дальности, что снижает помехоустойчивость, т.к. в облучаемой области могут находиться дополнительные источники колебаний (например, персонал лаборатории).

Заключение. Проведённые эксперименты по радиолокационному зондированию параметров дыхания, сокращений сердечной мышцы и артикуляции человека, выполненные через преграду (стена, отделяющая две смежные комнаты) с помощью датчика типа «Раскан» позволяют считать задачу дистанционной диагностики состояния человека, в том числе за преградой, технически разрешимой. В ходе дальнейших работ необходимо усовершенствовать аппаратуру с целью определения расстояния до объекта, улучшить параметры фильтрации при обработке сигналов и их автоматизированном распознавании.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 03-07-90387), и программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» (проект № 09.01.030).

Литература

1. Финкельштейн М.И., Карпучин В.И., Кутев В.А. Метелкин В.Н.; Под ред. Финкельштейн М.И., Подповерхностная радиолокация. - М.: Радио и связь, 1994. - 216 с.
2. Daniels D.J. Surface-penetrating radar. - RA 006, ISBN 0 85296 862 0, 1996, 300 p.
3. Ivashov S.I., Sablin V.N., Vasilyev I.A. Wide-Span Systems of Mine Detection. - IEEE Aerospace & Electronic *Systems* Magazine. May 1999, Vol. 14, No. 5, pp. 6-8.
4. Ivashov S.I., Makarenkov V.I., Razevig V.V., Sablin V.N., Sheyko A.P., Vasiliev I.A. Remote Control Mine Detection System with GPR and Metal Detector. - Proceedings of the Eight International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR'2000, May 23-26, 2000, University of Queensland, Gold Coast, Queensland, Australia, pp. 36-39.
5. Васильев И.А., Ивашов С.И., Макаренков В.И., Саблин В.Н., Шейко А.П. Зондирование строительных конструкций зданий в радиодиапазоне с высоким разрешением. - Радиотехника. №8, вып. 55, Радиолокационные системы и системы радиоуправления, 2001, стр. 65-68.
6. Russians Launch Anti-Bugging Radar. - Microwave Journal, February 1998, Vol. 41, No. 2, pp. 47, 48.
7. Ivashov, S.I., Isaenko V.N., Konstantinov V.F., Sablin, V.N., Sheyko, A.P., Vasiliev, I.A. GPR for Detection and Measurement of Filled up Excavations for Forensic Applications. - Proceedings of the Seventh International Conference on Ground-

- Penetrating Radar, GPR'98, May 27-30, 1998, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA, V. 1, pp. 87-89.
8. Scott W.R., Schroeder C., Martin J.S. An Acousto-electromagnetic Sensor for Locating Land Mines. - Part of the SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets III. Orlando, Florida, April 1998, SPIE Vol. 3392, 0277-786X, 98, pp. 176-186.
 9. Greneker E. F. Radar Sensing of Heartbeat and Respiration at a Distance with Security Applications. - Proceedings of SPIE, Radar Sensor Technology II. Volume 3066, Orlando, Florida, April 1997, pp. 22-27.
 10. Barnes M.A., Nag S., Payment T. Covert situational awareness with handheld ultra-wideband short pulse radar. - SPIE Conference on "Radar Sensor Technology VI". Orlando, Fla. 19 Apr., 2001, Proc. SPIE. 2001. 4374, pp. 66-77.
 11. Immoreev I.J., Samkov S.V., Ultra Wideband (UWB) Radar for the Remote Measuring of Main Parameters of Patient's Vital Activity. - Radio Physics and Radio Astronomy (Ukraine), 2002, v.7, No. 4, pp. 404-407.
 12. Staderini E.M., UWB Radars in Medicine. - IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, January 2002, pp. 13-18.
 13. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. – М.: Мир, 1982. – 428 с.