

# Биорадиолокация

Под редакцией А.С. Бугаева, С.И. Ивашова

*2-е издание*



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО

МГТУ им. Н. Э. Баумана

2018

УДК 621.396.969

ББК 28.071

Б63

Авторы:

*А.В. Абрамов, А.И. Амосова, Л.Н. Анищенко, А. С. Боголюбов,  
А. С. Бугаев, И.А. Васильев, И.А. Вязьмитинов, А.В. Дудник,  
А.И. Дьяченко, А.В. Журавлев, А.В. Зайцев, Э.Г. Зиганшин,  
С.И. Ивашов, И.Я. Иммореев, С.А. Исайчев, Ю.А. Копылов,  
В.И. Миняев, А.В. Миняева, Е.И. Мирошниченко, Г.И. Морозов,  
К.К. Осадчий, С.Н. Павлов, В.Л. Пазынин, В.Б. Парашин,  
М.Н. Петушков, В.В. Помозов, А.Э. Постельга, В.В. Разевиг,  
С.В. Самков, К.Ю. Сиренко, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль,  
Е.В. Солодов, О.В. Сытник, Д.А. Усанов, М.В. Фесенко,  
А.В. Чапурский, А.И. Черненко, В.С. Черняк, А.П. Шейко*

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. Балтийского государственного технического  
университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова *Л.Ю. Астанин*;  
заведующий кафедрой «Медико-технические информационные  
технологии» д-р техн. наук, проф. *С.И. Щукин*

Б63 **Биорадиолокация** / [А. В. Абрамов и др.] ; под ред. А. С. Бугаева,  
С. И. Ивашова. — 2-е изд. — Москва : Издательство МГТУ  
им. Н. Э. Баумана, 2018. — 396, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4815-9

Освещены вопросы радиолокации биологических объектов (биорадиолокации) — метода, который может быть использован для обнаружения живых людей, находящихся за преградами, и дистанционного определения параметров их дыхания и сердцебиения. Биорадиолокация может найти применение в различных областях: спасательных операциях, анти-террористической борьбе, медицине и др. Описаны физические основы процесса биорадиолокации, особенности биорадиолокаторов с непрерывным и импульсным зондирующими сигналами, а также методы расчета и моделирования процессов в биорадиолокации.

Для научных работников, аспирантов и студентов старших курсов.

УДК 621.396.969

ББК 28.071

ISBN 978-5-7038-4815-9

© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Радиолокация биологических объектов является интенсивно развивающимся направлением радиотехники. В отличие от классических областей применения радиолокации, в которых, как правило, объектами зондирования являются неживая природа (поверхность Земли и планет Солнечной системы) или искусственно созданные предметы (космические аппараты, самолеты, другие объекты военной техники), локация биообъектов имеет целый ряд особенностей, что позволяет выделить ее в отдельную область знаний.

Это обстоятельство и обусловило выбор названия книги, в качестве которого стал термин «биорадиолокация». К особенностям биорадиолокации относится использование аппаратуры, как правило, незначительной дальности действия (от нескольких сантиметров до десятков метров) с пониженным уровнем излучения, не оказывающим вредного воздействия на организм человека. Кроме этого характеристики самих объектов зондирования в части их электрофизических свойств, а также частот и амплитуд колебаний органов человека и животных носят достаточно специфический характер и для правильной интерпретации результатов измерений требуют привлечения исследователей биоинженерных специальностей.

Следует отметить также, что в отечественной и зарубежной научно-технической литературе термин, близкий по смыслу к термину «биорадиолокация», отсутствует, в силу чего введение его в научный оборот с учетом возросшего объема исследований и публикаций в этой области представляется вполне обоснованным.

Использование радиолокаторов для обнаружения живых людей, находящихся за преградами, и дистанционное определение параметров их дыхания и сердцебиения может найти применение в спасательных операциях, антитеррористической борьбе, медицине и других областях. Для решения этих задач в настоящее время наиболее широко используются импульсные радиолокаторы со сверхширокополосным сигналом, а также локаторы с непрерывным излучением, в частности со ступенчатым изменением

ем частоты. Исследования в этой области в нашей стране и за рубежом направлены не только на создание новых типов аппаратуры, но и на решение ряда теоретических задач. Для достижения оптимальных характеристик радиолокационных комплексов требуется разработка адекватных моделей радиолокационных сигналов, которые должны быть построены на физических моделях взаимодействия радиоволн с объектами, формирующими зондируемую сцену. Построение этих моделей позволит разработать алгоритмы оптимальной обработки сигнала, которые дадут возможность извлекать больше информации о зондируемом объекте (классификация целей), а также о характеристиках его движения. С помощью этих моделей можно будет сформулировать требования к аппаратным средствам радиолокаторов. Важно также определить наиболее перспективные направления приложения рассматриваемой технологии, так как не все из описываемых в настоящей книге задач могут по тем или иным причинам иметь адекватное решение. Появление биорадиолокационных средств следующего поколения с улучшенными потребительскими характеристиками и более совершенным математическим обеспечением можно ожидать уже в ближайшие несколько лет.

Уровень отечественных работ в области биорадиолокации сопоставим с уровнем зарубежных исследований, а в некоторых случаях и превосходит его. В частности, можно отметить работы, выполняемые в МГТУ им. Н.Э. Баумана и Московском авиационном институте, которые позволили обосновать новые приложения биорадиолокационных технологий как в медицине, так и в сфере обеспечения безопасности.

Авторами представляемой читателю книги являются: А.С. Бугаев (предисловие, введение, разд. 3.1, заключение), С.И. Ивашов (предисловие, введение, гл. 1, разд. 2.4, 3.1, заключение), И.Я. Иммореев (предисловие, введение, разд. 4.1—4.6, заключение), А.В. Журавлев (гл. 1), Л.Н. Анищенко (разд. 2.1, 2.4, 2.5), В.Б. Парашин (разд. 2.1, 2.4, 2.5), А.И. Дьяченко (разд. 2.2), В.И. Миняев (разд. 2.3), А.В. Миняева (разд. 2.3), Г.И. Морозов (разд. 2.3), М.Н. Петушков (разд. 2.3), И.А. Васильев (разд. 3.1), В.В. Разевиг (разд. 3.1), А.П. Шейко (разд. 3.1), О.В. Сытник (разд. 3.2), И.А. Вязьмитинов (разд. 3.2), Е.И. Мирошниченко (разд. 3.2), Ю.А. Копылов (разд. 3.2), А.И. Амосова (разд. 3.2), В.Л. Пазынин (разд. 3.2), К.Ю. Сиренко (разд. 3.2), Д.А. Усанов (разд. 3.3), Ал.В. Скрипаль (разд. 3.3), Ан.В. Скрипаль (разд. 3.3), А.В. Абрамов (разд. 3.3), А.С. Боголюбов (разд. 3.3), А.Э. Постельга (разд. 3.3), С.В. Самков (разд. 4.1—4.3), С.А. Исайчев (разд. 4.2), С.Н. Павлов (разд. 4.2, 4.3), К.К. Осадчий (разд. 4.3), Е.В. Солодов (разд. 4.3), А.В. Зайцев (разд. 4.4, 4.6),

Э.Г. Зиганшин (разд. 4.4, 4.5), М.В. Фесенко (разд. 4.4, 4.5), А.И. Черненко (разд. 4.5), В.В. Помозов (разд. 4.7), А.В. Дудник (разд. 4.7), В.В. Чапурский (гл. 5), В.С. Черняк (гл. 6). Разделы объединены в главы, содержащие близкий по смыслу материал.

В настоящее время авторы активно работают в области радиолокации биологических объектов.

Книга адресована научным работникам, аспирантам и студентам старших курсов, работающим в данной области или интересующимся возможностью использования описываемых в ней эффектов.

А.С. Бугаев, С.И. Ивашов, И.Я. Иммореев

---

## ВВЕДЕНИЕ

---

При радиолокационном зондировании в слабопоглощающих и прозрачных средах традиционными объектами локации до недавнего времени являлись в основном неживые объекты (цели), что определялось спецификой использования радиолокационных устройств. К областям применения традиционной радиолокации можно отнести обнаружение и определение координат, а также параметров перемещения:

- аэродинамических целей (самолеты, крылатые ракеты и т. д.);
- баллистических и космических объектов (боеголовки и спутники);
- наземных и надводных объектов (наземные транспортные средства и боевые машины, корабли).

Другим направлением радиолокации, бурно развивающимся в последние десятилетия, является подповерхностная радиолокация (георадиолокация), предназначенная для зондирования конденсированных сред, характеризующихся высоким поглощением и дисперсией электромагнитных волн [1–3]. Подповерхностная радиолокация наиболее широко применяется для следующих целей:

- зондирования грунтов для выявления их глубинной структуры и неоднородностей (уровня грунтовых вод, различного рода природных включений, расположения и состояния технических конструкций и коммуникаций);
- обследования местности для обнаружения взрывоопасных предметов, например мин;
- зондирования строительных конструкций для выявления их внутренней структуры, например мест залегания деталей арматуры, строительных дефектов;
- неразрушающего контроля промышленных изделий.

В настоящее время существует большое количество серийно выпускаемых радиолокаторов, предназначенных для решения перечисленных задач.

Снижение стоимости вычислительных ресурсов, необходимых для обработки сигнала, а также миниатюризация СВЧ-устройств

способствуют развитию интереса к использованию радиолокаторов, когда отражающим объектом является все тело человека или отдельные его части и внутренние органы. Обнаружение людей за непрозрачными препятствиями (стенами домов, листовым покровом) актуально как для военных, так и для гражданских целей [4, 5].

Современные методы позволяют обнаруживать неподвижных людей по колебаниям их внутренних органов. Этот эффект применяют для поиска живых людей под завалами строительных конструкций, образовавшихся в результате природных или техногенных катастроф, он может быть использован в медицинских целях, когда необходим дистанционный контроль за состоянием пациента.

Модуляция радиосигнала, отраженного от человека, обусловлена сокращениями сердца, сосудов, легких и других внутренних органов человека, а также артикуляцией (одновременная работа активных произносительных органов: голосовых связок, языка, губ, небной занавески). Можно выделить четыре группы биомеханических движений, которые отличаются как по частотному диапазону, так и по амплитуде:

- сокращения сердечной мышцы (частоты в диапазоне 0,8...2,5 Гц, амплитуды колебаний грудной клетки 0,1 мм [6]);
- колебания грудной клетки человека при дыхании (частоты в диапазоне 0,2...0,5 Гц, амплитуды колебаний грудной клетки в зависимости от типа дыхания 0,5...1,5 см);
- движения органов речи человека (частота основного тона колебаний голосовых связок — приблизительно 100 Гц);
- движения других частей тела человека (рук, ног и т. д.).

Конкретные значения этих частот и амплитуд перемещений определяются физической активностью и состоянием испытуемого. Наиболее сложными представляются процессы артикуляции, так как в них участвуют сразу несколько органов человека, обладающих своими собственными характеристиками. Изучение процессов артикуляции при произнесении звуков может быть использовано при дистанционном распознавании речи без применения акустических устройств даже при расположении объекта локации за препятствиями, например за стенами зданий [7].

Метод дистанционного обнаружения и диагностирования людей (в том числе за оптически непрозрачными препятствиями), основанный на модуляции радиолокационного сигнала колебательными движениями и перемещениями частей тела и органов человека, будем называть *биорадиолокацией*.

Осуществляя селекцию проникающего сигнала передатчика и сигналов, отраженных от неподвижных объектов, можно добиться высокой чувствительности при обнаружении объектов, границы которых подвержены механическим колебаниям. По имеющимся в литературе данным, чувствительность радиочастотного зондирования к перемещению обнаруживаемого объекта в гигагерцовом диапазоне волн может достигать  $10^{-9}$  м [8]. При обнаружении человека как живого объекта задача наиболее просто решается с помощью радиолокаторов малой дальности, работающих с непрерывными немодулированными сигналами в частотном диапазоне 1...10 ГГц [9].

Перечислим некоторые перспективные области применения биорадиолокации:

- обнаружение людей, находящихся под завалами в результате землетрясений, техногенных катастроф, схода лавин, когда скорейшее определение мест нахождения живых людей очень важно;
- обнаружение и слежение за людьми, находящимися за непрозрачными препятствиями или в условиях плохой видимости при проведении антитеррористических операций, а также ведении боя в условиях города;
- дистанционное обнаружение раненных при боевых действиях по их дыханию для снижения риска медицинского персонала при эвакуации под огнем противника;
- дистанционное обнаружение скрытого под одеждой человека огнестрельного или холодного оружия;
- контроль охраняемых территорий от вторжения посторонних лиц;
- досмотр транспортных контейнеров в целях выявления лиц, нелегально пересекающих границу;
- дистанционное определение эмоционального состояния человека для выявления потенциально опасных лиц, например при предпосадочном досмотре в аэропортах;
- разработка дистанционного детектора лжи, позволяющего незаметно для человека измерять параметры его кардиореспираторной системы и на их основе оценивать его психоэмоциональное состояние [11];
- контроль состояния оператора сложных машинных комплексов;
- регистрация речевых сигналов человека за препятствиями без использования традиционных акустических микрофонов;
- мониторинг пульса и дыхания пациента в случае, когда применение контактных сенсоров невозможно или затруднено;



- слежение за состоянием и диагностика внутренних органов человека;
- дистанционное слежение за состоянием плода в период беременности (вместо мониторов, использующих ультразвук с контактными датчиками);
- определение эластичности кровеносных сосудов путем измерения скорости распространения импульса кровяного давления при сердечном сокращении, что поможет выявить предрасположенность пациента к сердечно-сосудистым заболеваниям.

Перечисленные выше направления являются только потенциальными областями применения биорадиолокации, и потребуются дальнейшие исследования для определения их практической реализуемости.

Уже сейчас можно сказать, что наиболее перспективной областью применения биорадиолокации в медицине является сомнология.

Исследование расстройств дыхания во время сна – наиболее изученный раздел в медицине сна [9, 12]. Многочисленные работы в области сомнологии относятся к исследованию патологических ночных остановок дыхания. Такие нарушения очень распространены (ими страдают от 3 до 8 % населения) и оказывают существенное влияние на здоровье и качество жизни пациентов. Мужчины страдают этим расстройством чаще женщин в 3–8 раз.

Диагностика нарушений дыхания во время сна обычно проводится чрезвычайно трудоемким и дорогостоящим методом в лабораториях сна, располагающих соответствующим диагностическим оборудованием. Этот метод требует длительной регистрации различных функций человеческого организма в период ночного сна. Как правило, регистрируются следующие сигналы: дыхание, шум дыхания (храп), дыхательные движения грудной клетки и брюшной стенки, поток выдыхаемого воздуха изо рта и ноздрей, положение тела, движения нижних конечностей, насыщение артериальной крови кислородом, электроэнцефалограмма и др.

Бесконтактный дистанционный мониторинг движений, дыхания и частоты сердечных сокращений (ЧСС) биорадиолокационным методом будет являться важным дополнением к полисомнологическим исследованиям, позволяя повысить комфортность проводимых ночных исследований для пациента, стабильность регистрируемых данных. Дистанционная регистрация движений, дыхания и ЧСС даст возможность проводить профилактические обследования населения для выявления дыхательных расстройств и нарушений сна, бесконтактный мониторинг нарушений дыха-

ния и сна у детей, в том числе для предотвращения синдрома внезапной смерти у младенцев.

## Литература

1. Подповерхностная радиолокация / Отв. ред. М.И. Финкельштейн. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
2. *Daniels D.J.* Surface-Penetrating Radar. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996.
3. Вопросы подповерхностной радиолокации / Отв. ред. А.Ю. Гринёв. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
4. Through-Wall Sensing (TWS) Technologies for Dismounted Infantry, DARPA SBIR 2004.1 Topic SB041-022.
5. TNO offers through-the-wall radar for special operations, Jane's international defense review. 2004. No. 8. P. 19.
6. *Singh M., Ramachandran G.* Reconstruction of sequential cardiac in-plane displacement patterns on the chest wall by laser speckle interferometry. Biomedical Engineering. IEEE Transactions on Volume 38. Issue 5. May 1991. P. 483–489.
7. Speech articulator measurements using low power EM-wave sensors / J.F. Holzrichter, G.C. Burnett, L.C. Ng, W.A. Lea // Journal Acoustical Society of America. Vol. 103. No. 1. January 1998. P. 622–625.
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. P. 176–186.
9. Обнаружение и дистанционная диагностика людей за препятствиями с помощью РЛС / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов и др. // Радиотехника. 2003. № 7. С. 42–47.
10. *Иммореев И.Я., Самков С.В.* Ultra-wideband (UWB) radar for remote measuring of main parameters of patient's vital activity // Радиофизика и радиоастрономия. Издание Национальной академии наук Украины. 2002. Т. 7. № 4. С. 16–22.
11. *Staderini E.M.* An UWB Radar Based Stealthy «Lie Detector». [www.hrvcongress.org/second/first/placed\\_3/Staderini\\_Art\\_Eng.pdf](http://www.hrvcongress.org/second/first/placed_3/Staderini_Art_Eng.pdf)
12. Diminished cerebral circulatory autoregulation in obstructive sleep apnea investigated by near-infrared spectroscopy / L.P. Safonova, A. Michalos, U. Wolf et al. // Sleep Research On-line. 2003. Vol. 5. No. 4. P. 123–132.

---

## Глава 1. ОБЗОР РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ БИОРАДИОЛОКАЦИИ

---

В настоящее время государственные и частные организации все чаще проявляют интерес к биорадиолокации. Это вызвано возросшей угрозой терроризма и, как следствие, необходимостью принять меры для защиты гражданских и военных объектов. В данной главе приведены сведения, появившиеся в открытых источниках и касающиеся различных приложений биорадиолокации. Остановимся в основном на зарубежных исследованиях. Отечественным разработкам и исследованиям в странах СНГ посвящены последующие главы книги.

В описываемых зарубежных радиолокационных системах применяются различные методы модуляции радиолокационного сигнала: линейная частотная модуляция, ступенчатая модуляция (частота излучаемого сигнала изменяется по ступенчатому закону), импульсные системы (длительность импульса может достигать  $10^{-7}$  с и менее). В простейшем случае биорадиолокатор может излучать непрерывный монохроматический сигнал.

Определенный интерес представляют и пассивные радиолокационные системы (радиометры), которые работают, как правило, в миллиметровом диапазоне длин волн. К преимуществам таких систем относится отсутствие собственного излучения. Однако миллиметровые волны относительно легко поглощаются даже во влажной одежде, что в значительной степени сдерживает применение этого метода.

**Радиолокатор Portaguard (Великобритания).** Одно из первых сообщений, появившихся в открытой печати [1], касалось попыток использования радиолокатора Portaguard, предназначенного для обзора на открытой местности и обнаружения передвигающихся на ней людей, в целях антитеррористической борьбы, включая обнаружение людей внутри закрытых помещений.

Из приведенных в табл. 1.1 данных следует, что радиолокатор Portaguard обладает весьма низкой чувствительностью, позволяющей обнаруживать людей за препятствиями толщиной, не пре-

В заключение отметим, что радиолокация биологических объектов является интенсивно развивающимся направлением. Использование радиолокаторов для решения актуальных задач, таких как обнаружение живых людей, находящихся за преградами, дистанционное определение параметров дыхания и сердцебиения, радиотомография и др., оправдано, что подтверждается существующими и ведущимися разработками. Обзор разработок в области биорадиолокации был сделан на основании материалов, представленных фирмами — разработчиками приборов. Поэтому к приведенным данным, касающимся технических характеристик, следует относиться с осторожностью. Это замечание в первую очередь относится к устройству LifeGuard компании DKL International Inc. В частности, авторам обзора неизвестны электромагнитные поля, излучаемые человеком, кроме инфракрасных, по излучению которых возможно обнаружение людей пассивными приборами на расстоянии до 500 м.

## Литература к главе 1

1. Jane's International Defense Review. 1998. No. 6. P. 43.
2. New funding for through-wall surveillance, Jane's International Defense Review. September 1999. No. 8. P. 8.
3. Jane's International Defense Review. September 2001. No. 9. P. 8.
4. TNO offers through-the-wall radar for special operations, Jane's International Defense Review. 2004. No. 8. P. 19.
5. [www.homelanddefensestocks.com/Companies/ViewDocument.asp?ID=2472](http://www.homelanddefensestocks.com/Companies/ViewDocument.asp?ID=2472), Markland Developing Next-Generation Technologies to Provide Early Detection of Suicide Bombers, [InvestorIdeas.com](http://InvestorIdeas.com), January 2005.
6. [www.haaretz.com/hasen/objects/pages/PrintArticleEn.jhtml?itemNo=445876](http://www.haaretz.com/hasen/objects/pages/PrintArticleEn.jhtml?itemNo=445876) Israeli start-up develops technology to see through walls, [www.haaretz.com](http://www.haaretz.com), January 2004.
7. [www.camero-tech.com/xaver800.shtml](http://www.camero-tech.com/xaver800.shtml), Xaver 800 Through-Wall Vision.
8. Патент US 6208286 B1, 27 марта 2001 г.
9. Патент на изобретение РФ № 2159942, 27 ноября 2000 г.
10. [www.cambridgeconsultants.com/news\\_pr179.shtml](http://www.cambridgeconsultants.com/news_pr179.shtml), Smart through-wall radar gives new tactical advantages to police, special forces and emergency services.
11. [www.radarvision.com/files/pdf/cutsheet/RadarVision2%20Flier\\_818\\_lo.pdf](http://www.radarvision.com/files/pdf/cutsheet/RadarVision2%20Flier_818_lo.pdf), Introducing the Second Generation Through-Wall Motion Detection Radar for Enhanced Tactical Entry.
12. [www.gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/RADARFLASH.html](http://www.gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/RADARFLASH.html). A Flash of Force: RADAR Flashlight Could Help Police Detect Suspects

Hiding Behind Doors and 8-Inch Thick Walls, [gtresearchnews.gatech.edu](http://gtresearchnews.gatech.edu), April 2001.

13. [www.dklabs.com](http://www.dklabs.com), описание детектора LifeGuard.

14. [www.bos-berlin.de](http://www.bos-berlin.de), описание разработок компании Berlin-Oberspree Sondermaschinenbau GmbH & Co.

15. [www.lionwings.de](http://www.lionwings.de), описание радиолокатора.

16. [www.defenselink.mil/news/Jan2006/20060103\\_3822.html](http://www.defenselink.mil/news/Jan2006/20060103_3822.html), New Device Will Sense Through Concrete Walls.

17. *Staderini E.M.* UWB Radars in Medicine. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. January 2002. P. 13–18.

18. *Staderini E.M.* An UWB Radar based stealthy ‘Lie Detector’ In Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 6. E. Mokole, K. Gerlach, M. Kragalott Eds. 2003 KLUWER ACADEMIC/PLENUM PUBLISHERS New York, U.S.A (originally presented at American Electromagnetics Meeting AMEREM 2000, Annapolis Maryland, USA, 2002).

19. *Hunt A.R.* A wideband imaging radar for through-the-wall surveillance. Proc. of SPIE. Vol. 5403. Part 2. 2004. P. 590–595.

20. *Vertiy A.A., Gavrilov A.A.* Subsurface tomography application for through-wall imaging, in Proceedings of Joint 9-th International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications ICEAA’05 and 11th European Electromagnetic Structures Conference EESC’05. P. 223–226. Torino, Italy, September 12–16, 2005.

21. The Millimeter wave tomography application for the subsurface imaging / A.A. Vertiy, S.P. Gavrilov, I.V. Voynovskyy et al. // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2002. Vol. 23. No. 10. P. 1413–1444 (USA).

---

## Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ РАДИОЛОКАЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

---

### 2.1. Биомеханика дыхания и сердцебиения человека

В работах [1–5] экспериментально показана возможность регистрации дыхательных движений и пульсовых колебаний у человека радиолокационно-интерферометрическим методом с использованием радиолокатора технического назначения.

Для разработки специализированных биорадиолокаторов, оптимизации их характеристик необходима система исходных данных, содержащая оценки параметров циклических перемещений биоструктур в системах дыхания и кровообращения, характеристики физических свойств тканей, определяющих их взаимодействие с электромагнитным излучением.

Проблема сбора и анализа данных, относящихся к биомеханике дыхания и кровообращения, осложнена тем, что традиционно основное внимание уделялось измерениям «внутренних» параметров этих систем (временным зависимостям объемов и потоков переноса дыхательных газов и крови). Достоверных количественных характеристик колебаний «внешних» биоструктур (поверхности тела и подповерхностных тканей, от которых в основном отражается зондирующая радиоволна) существенно меньше, в особенности оценок амплитуд этих пульсаций.

#### 2.1.1. Изменения формы поверхности грудной клетки при дыхании

В этом разделе приведен аналитический обзор литературы, по результатам которого определены исходные данные для создания систем радиолокационного мониторинга дыхания и пульса.

Изменение формы грудной клетки при дыхании обусловлено движениями ребер и диафрагмы [6].

**Движения ребер.** Ребра соединены подвижными сочленениями с телами и поперечными отростками позвонков. Через эти две точки фиксации проходит ось, вокруг которой могут вращаться ребра.

сти кожи) не оказывает воздействия на коэффициент отражения ЭМВ. Однако данный параметр существенно влияет на процесс приема отраженного сигнала, так как с увеличением расстояния до БО увеличивается вероятность зашумления полезного сигнала отражениями от местных предметов. Кроме того, необходимо учитывать и такую характеристику биорадиолокатора, как однозначная дальность.

Как видно из различных результатов, коэффициент отражения от границы раздела сред в наибольшей степени зависит от параметров наружного слоя модели, граничащего с воздухом, — кожи. Также можно сделать вывод, что значение мнимой составляющей диэлектрической проницаемости тканей в наибольшей степени влияет на значение коэффициента отражения ЭМВ. Таким образом, при моделировании процессов отражения ЭМВ волны от БО необходима более точная информация о диэлектрических свойствах биологических тканей человека *in vivo*, кроме того, необходимо исследовать влияние физиологических процессов дыхания и кровообращения на изменение этих свойств.

## Литература к главе 2

1. *Bugaev A.S., Chapursky V.V., Ivashov S.I.* Mathematical Simulation of Remote detection of Human Breathing and Heartbeat by Multifrequency Radar on the Background of Local Objects Reflections. 2005 IEEE International Radar Conference Record. Arlington, Virginia, USA. May 9—12, 2005.

2. Detection of Human Breathing and Heartbeat by Remote Radar / S.I. Ivashov, V.V. Razevig, A.P. Sheyko, I.A. Vasilyev // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2004). March 28—31, 2004. Pisa, Italy. P. 663—666.

3. Through Wall Sensing of Human Breathing and Heart Beating by Monochromatic Radar / A.S. Bugaev, V.V. Chapursky, S.I. Ivashov et al. // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR'2004. June 21—24, 2004. Delft, The Netherlands. Vol. 1. P. 291—294.

4. Дистанционный контроль параметров кардиореспираторной системы человека с помощью радиолокационных средств / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов и др. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. № 10. С. 24—31.

5. Обнаружение и дистанционная диагностика людей за препятствиями с помощью РЛС / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов и др. // Радиотехника. 2003. № 7. С. 42—47.

6. Физиология человека / Отв. ред. Р. Шмидт, Г. Тевс. М.: Мир, 1996. Т. 2. 313 с.

7. Физические методы мониторинга в экологии человека. Методы и аппаратура для исследования механической активности кардиореспира-

торной системы человека / Сост. Н.М. Анишкина, В.А. Антонец, В.А. Лопата. Н. Новгород: ИПФ РАН., 2001. 39 с.

8. *Дадашев Р.С., Парашин В.Б., Семенов Г.В.* Биомедицинские измерения. Обзор из серии «Метрология и измерительная техника в СССР». 1972. 76 с.

9. *Петровский Б.В.* Большая медицинская энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986. 544 с.

10. *Баевский Р.М.* Основы практической баллистокардиографии. М.: Медицина, 1962.

11. *Парин В.В.* Современные методы исследования функций сердечно-сосудистой системы. М.: Медицина, 1963.

12. *Starr I., Noordengraaf A.* Ballistocardiography in cardiovascular research. Amsterdam, 1967.

13. *Бабский Е.Б., Карпман В.Л.* Динамокардиография. М.: Медицина, 1963.

14. *Андреев Л.Б., Андреева Н.Б.* Кинетокардиография. Ростов: Изд-во Ростов. ун-та, 1971. 307 с.

15. *Тумановский М.Н., Постников В.С., Провоторов В.М., Филякин Б.Ф.* Метод бесконтактной кинетокардиографии // Бюлл. эксп. биол. мед. 1970; 70 (11). С. 121–123.

16. *Золотарев А.И.* Исследование аппарата кровообращения как кибернетической системы. Дисс. ... д-ра мед. наук. Воронеж, 1967.

17. *Кондакова В.И.* К вопросу об изучении величины кровотока в крупных сосудах шеи методом индуктографии. В кн.: Электроника и химия в кардиологии. Вып. 6. 1971. С. 71–73.

18. *Любимов Г.А.* Механика органов дыхания. Биомеханика кровообращения, дыхания и биологических тканей. Рига: Зинатне, 1981. С. 109–120.

19. *Любимов Г.А.* Обоснование модели неоднородного легкого для описания форсированного выдоха // Изв. АН МЖГ. 1999. № 5. С. 29–38.

20. *Lutchen K.R., Hantos Z., Jackson A.C.* Importance of low-frequency impedance data for reliably quantifying parallel inhomogeneities of respiratory mechanics // IEEE Trans., Biomed. Eng. 1988. Vol. 35. No. 6. P. 472–481.

21. *Уэст Дж.* Физиология дыхания. М.: Мир, 1988. 200 с.

22. *Wade O. L.* Movements of the thoracic cage and diaphragm in respiration // J. Physiol. London, 1954. 124: 193–212.

23. *Konno K., Mead J.* Measurement of the separate volume changes of rib cage and abdomen during breathing // J. Appl. Physiol., 1967. 22(3): 407–422.

24. *ATS/ERS Statement on Respiratory Muscle Testing* // Am. J. Respir. Crit. Care Med. 2002. Vol. 166. P. 518–624.

25. *Mead J., Peterson N., Grimby G., Mead J.* Pulmonary ventilation measured from body surface movements // Science, 1967. 156: 1383–1384.



26. Respiratory cross-sectional area-flux measurements of the human chest wall / R. Sartene, P. Martinot-Lagarde, M. Mathieu et al. // *J. Appl. Physiol.*, 1990. 68: 1605—1614.
27. Effects of posture and bronchoconstriction on low-frequency input and transfer impedances in humans / R. L. Dellaca, L. D. Black, H. Atileh et al. // *J. Appl. Physiol.*, 2004. 97: 109—118.
28. Chest wall motion during tidal breathing / A. De Groote, M. Wantier, G. Cheron et al. // *J. Appl. Physiol.*, 1997. 83: 1531—1537.
29. Особенности регуляции дыхания и произвольного управления дыхательными движениями при различных функциональных нагрузках / В.И. Миняев., А.Г. Визирь, В.Г. Давыдов и др. // *Вопросы экспериментальной и клинической физиологии дыхания: Сб. науч. тр. Тверь: Твер. гос. ун-т, 2007. С. 139—149.*
30. Chest wall mechanics in sustained microgravity / M. Wantier, M. Estenne, S. Verbanck et al. // *J. Appl. Physiol.*, 1998. 84: 2060—2065.
31. *Groote De, A., Paiva M., Verbandt Y.* Mathematical assessment of qualitative diagnostic calibration for respiratory inductive plethysmography // *J. Appl. Physiol.*, 2001. 90: 1025—1030.
32. *Stagg D., Goldman M., Davis J. N.* Computer-aided measurement of breath volume and time components using magnetometers // *J. Appl. Physiol.: Respirat. Environ, Exercise Physiol.*, 1978. 44(4): 623—633.
33. A simple and reliable method to calibrate respiratory magnetometers and RespiTrace / R. Banzett, B., S. T. Mahan, D. M. Garner et al. // *J. Appl. Physiol.*, 1995. 79(6): 2169—2176.
34. *Ben-Haim S.A., Saidel G.M.* Mathematical model of chest wall mechanics: a phenomenological approach // *Ann. Biomed. Eng.* 1990. 18(1): 37—56.
35. *Deschamps C., Rodarte J. R., Wilson T. A.* Coupling between rib cage and abdominal compartments of the relaxed chest wall // *J. Appl. Physiol.*, 1988. 65: 2265—2269.
36. *Loring S. H., Lee H.-T., Butler J.P.* Respiratory effects of transient axial acceleration. // *J. Appl. Physiol.*, 2001. 90: 2141—2150.
37. *Wilson T.A.* Mechanics of compartmental models of the chest wall // *J. Appl. Physiol.*, 1988. 65 (5): 2261—2264.
38. *Primiano F.P. Jr.* Theoretical analysis of chest wall mechanics // *J. Biomech.*, 1982. 15(12): 919—931.
39. *Миняев В.И., Миняева А.В.* Зависимость соотношения и степени использования торакального и абдоминального дыхательных резервов от положения тела // *Физиология человека.* 1998. Т. 24. № 5. С. 11—15.
40. Relative contributions of rib cage and abdomen to breathing in normal subjects / J.T. Sharp, N.B. Goldberg, W.S. Druz, J. Danon // *J. Appl. Physiol.*, 1975. 39(4): 608—618.
41. Compartmental Analysis of Breathing in the Supine and Prone Positions by Optoelectronic Plethysmography / A. Aliverti, R. Dellaca, P. Pelosi et al. // *Annals of Biomedical Engineering.* Vol. 29. 2001. P. 60—70.

42. Миняев В.И., Петушков М.Н. Произвольное управление торакальными и абдоминальными дыхательными движениями // Физиология человека. 2005. Т. 31. № 6. С. 44–48.
43. Rib cage mechanics during quiet breathing and exercise in humans / Kenyon, C. M., S. J. Cala, S. Yan et al. // J. Appl. Physiol., 1997. 83(4): 1242–1255.
44. Respiratory muscle dynamics and control during exercise with externally imposed expiratory flow limitation / A. Aliverti, I. Iandelli, R. Duranti et al. // J. Appl. Physiol., 2002. 92: 1953–1963.
45. Chest wall kinematic determinants of diaphragm length by optoelectronic plethysmography and ultrasonography / A. Aliverti, G. Ghidoli, R.L. Dellaca et al. // J. Appl. Physiol., 2003. 94: 621–630.
46. Spatial distribution of human respiratory system transfer impedance / R.L. Dellaca, A. Aliverti, K.R. Lutchen, A. Pedotti // Ann. Biomed. Eng., 2003. 31(2): 121–131.
47. Ferrigno G., Carnevali P. Principal component analysis of chest wall movement in selected pathologies // Med. Biol. Eng. Comput., 1998. 36(4). P. 445–451.
48. Pizzi A., Grippo A., Scano G. Chest Wall Kinematics in Patients with Hemiplegia // Am. J. Respir. Crit. Care Med. 2003. Vol. 168. P.109–113.
49. Исаев Г.Г. Физиология дыхательных мышц // Физиология дыхания. Основы современной физиологии. СПб., 1994. С. 178–196.
50. Особенности реакций брюшного и грудного компонентов дыхания на прогрессирующую гиперкапнию / В.И. Миняев, Р.М. Гречишкин, А.В. Миняева и др. // Физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 1993. Т. 79. № 12. С. 74–78.
51. Campbell E.J., Agostoni E., Newson D. The respiratory muscles Mechanise and neural control. London, 1970.
52. Goldman M., Grimby G., Mead J. Mechanical work of breathing derived from rib cage and abdominal V-P partitioning // J. Appl. Physiol., 1976. Vol. 41. P. 752–763.
53. Лакин Г.Ф. Биометрия. М.: Высш. шк., 1973. 343 с.
54. Баранов В.М. Газоэнергообмен человека в космическом полете и модельных исследованиях. М.: Наука, 1993. 126 с.
55. Блохин И.П. Позно-респираторные реакции у человека / Автореф. дисс. ... д-ра биол. наук. Фрунзе, 1979. 27 с.
56. Бреслав И.С. Паттерны дыхания. Л.: Наука, 1984. 204 с.
57. Дворецкий Д.П. Вентиляция, кровообращение и газообмен в легких // Физиология дыхания. Основы современной физиологии. СПб., 1994. С. 197–257.
58. West J.B. Ventilation-perfusion relationships // Amer. Rev. Respirat. Disease. 1977. Vol. 116. P. 919–943.

59. *Foster K.R., Schwan H.P.* 1994. Dielectric properties of tissues. In C. Polk, E. Postow (eds), *Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields*, 2nd ed. Boca Raton, Fla, CRC Press.

60. *Foster K.R.* Dielectric Properties of Tissues. In Joseph D. Bronzino (editor-in chief), *Handbook of the Biomedical Engineering*, 2nd ed., volume 1, CRC Press, Springer, IEEE Press, 2000. Pt. 89.1–89.4.

61. A Simple Experimental Set-up for the Determination of the Complex Dielectric Permittivity of Biological Tissues at Microwave Frequencies / J. L. Sebastian, S. Munoz, J. M. Miranda, B. Ribas // 34th European Microwave Conference. Amsterdam. 2004.

62. *Березовский В.А., Колотилев Н.Н.* Биофизические характеристики тканей человека: Справочник. Киев: Наук. думка, 1990. С. 7–37.

63. *Самойлов В.О.* Медицинская биофизика. СПб.: СпецЛит, 2004. 496 с.

64. Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций / Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль, А.Э. Постельга // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 130–134.

65. *Финкельштейн М.И., Карпунин В.И., Кутев В.А.* Подповерхностная радиолокация / Отв. ред. Финкельштейн М.И. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.

---

## **Глава 3. БИОРАДИОЛОКАТОРЫ С НЕПРЕРЫВНЫМ СИГНАЛОМ**

---

### **3.1. Монохроматический биорадиолокатор**

Существующие прототипы и модели биорадиолокаторов используют как непрерывные, так и импульсные сигналы. Предлагаемые разработки значительно различаются по технической сложности. Самые простые имеют, например, светодиодный индикатор и не обладают пространственной селекцией, другие могут иметь цветной жидкокристаллический дисплей и высокое пространственное разрешение радиолокатора по дальности. Радиолокаторы, использующие непрерывные сигналы, позволяют провести простейшую обработку данных в виде Фурье-анализа выделенной низкочастотной модуляции принятого радиолокационного сигнала и не имеют селекции по дальности. Радиолокаторы, излучающие видеоимпульсные сигналы, могут иметь селекцию по дальности, но радиус действия их небольшой. Необходимо отметить, что ни одно из устройств пока не нашло сколько-нибудь широкого применения. Это объясняется как недостаточной чувствительностью аппаратуры при зондировании через препятствия, так и низкой помехозащищенностью и, как правило, отсутствием селекции по угловым координатам.

Другой малоисследованной областью является математическое моделирование процессов взаимодействия СВЧ-излучения с телом человека и его отдельными органами. При создании методов и алгоритмов обработки биорадиолокационных сигналов предполагается использование феноменологических моделей отражения от поверхности тела и органов человека. Корректно построенные феноменологические модели, согласованные с экспериментальными данными, позволят выявить относительно дешевыми средствами и с экономией времени такие особенности обработки биорадиолокационных сигналов, которые ранее не учитывались в традиционных радиолокационных приложениях. Некоторые подобные задачи уже были решены и опубликованы. В част-

- выбор режимов работы АЦП и управление работой АЦП, используемого для сопряжения узлов измерителя с компьютером;
- измерение параметров движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением, с использованием СВЧ-автодина или СВЧ-интерферометра;
- калибровку измерителя в различных режимах работы.

Окно программы, обеспечивающей обработку сигнала и выбор режимов измерений, представлено на рис. 3.38.

После фиксации сигнала, поступающего с СВЧ-измерителя, на спектрограмме курсором выделяют характерные частоты, значения которых заносят в соответствующие поля группы «Параметры», снимаемые со спектрограммы.

В группе «Параметры зондирующего излучения» задается его частота или длина волны.

Нажатием кнопки «Рассчитать параметры» запускается расчет, результаты которого отображаются в группе «Результаты расчета».

В программе обеспечен выбор следующих методов расчета:

- определение параметров движений грудной клетки, связанных с дыханием, по первой и третьей гармоникам;
- определение параметров движений грудной клетки, связанных с сердцебиением, по первой и третьей гармоникам;
- определение параметров движений грудной клетки, связанных с дыханием, по номеру гармоники с максимальной амплитудой.

### **Литература к главе 3**

1. Through Wall Sensing of Human Breathing and Heart Beating by Monochromatic Radar / A.S. Bugaev, V.V. Chapursky, S.I. Ivashov et al. // Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR'2004, June 21–24, 2004, Delft, The Netherlands. Vol. 1. P. 291–294.

2. *Bugaev A.S., Chapursky V.V., Ivashov S.I.* Mathematical Simulation of Remote detection of Human Breathing and Heartbeat by Multifrequency Radar on the Background of Local Objects Reflections. 2005 IEEE International Radar Conference Record, Arlington, Virginia, USA. May 9–12, 2005.

3. Радиолокационные методы выделения сигналов дыхания и сердцебиения / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов, В.В. Чапурский // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 10. С. 1224–1239.

4. Обнаружение и дистанционная диагностика людей за препятствиями с помощью РЛС / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов и др. // Радиотехника. 2003. № 7. С. 42–47.

5. Detection of Human Breathing and Heartbeat by Remote Radar / S.I. Ivashov, V.V. Razevig, A.P. Sheyko, I.A. Vasilyev // Progress in Electro-

magnetics Research Symposium (PIERS 2004). March 28—31, 2004. Pisa, Italy. P. 663—666.

6. Remote Control Mine Detection System with GPR and Metal Detector / S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.V. Razevig et al. // Proceedings of the Eight International Conference on Ground Penetrating Radar, GPR'2000, May 23—26, 2000. University of Queensland, Gold Coast, Queensland, Australia. P. 36—39.

7. RF Band High Resolution Sounding of Building Structures and Works / I.A. Vasiliev, S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov et al. // IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine. May 1999. Vol. 14. No. 5. P. 25—28.

8. Speech articulator measurements using low power EM-wave sensors / J.F. Holzrichter, G.C. Burnett, L.C. Ng and W.A. Lea // Journal Acoustical Society of America. Vol. 103. No. 1. January 1998. P. 622—625.

9. Дистанционный контроль параметров кардиореспираторной системы человека с помощью радиолокационных средств / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов и др. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. № 10. С. 24—31.

10. Физиология человека / Отв. ред. Р. Шмидт, Г. Тевс. М.: Мир, 1996. Т. 2. 313 с.

11. *Иммореев И.Я., Самков С.В.* Сверхширокополосный радар для обнаружения и измерения параметров движущихся объектов // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: Докл. Всерос. науч. конф., Муром, 1—3 июля 2003. Муром, 2003. С. 446—450.

12. *Иммореев И.Я.* Возможности и особенности сверхширокополосных радиосистем // Прикладная электроника. Харьков, 2002. Т. 1. № 2. С. 122—140.

13. *Иммореев И.Я., Синявин А.Н.* Излучение сверхширокополосных сигналов // Антенны. 2001. Вып. 1 (47).

14. *Черненко А.И.* Сверхширокополосный радар для измерения параметров сердечно-сосудистой системы человека при физических нагрузках // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: Докл. 2-я Всерос. науч. конф., Муром, Россия, 4—7 июля 2006.

15. *Самков С.В., Черненко А.И.* Обработка сигнала СШП-радаров для измерения параметров сердечно-сосудистой системы человека при занятии спортом // Дистанционное обнаружение и диагностика людей с помощью радиолокационных средств: Всерос. науч.-техн. семинар. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 20 декабря 2005.

16. Применение сверхширокополосных радаров ближнего радиуса действия для получения данных о физиологических параметрах человека / И.Я. Иммореев, С.Н. Павлов, С.В. Самков, Е.В. Солодов // Дистанционное обнаружение и диагностика людей с помощью радиолокационных средств: Всерос. науч.-техн. семинар, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 20 декабря 2005.

17. Доплеровская РЛС для разведки на местности. Сер. Техн. средства развед. служб кап. гос. // ВИНТИ. 1997. № 10. С. 46—47.
18. Nordwall Bruce D. Ultra-wideband radar detects buried mines // Aviat. Week and Space Technol. 1997. No. 13. P. 63—64.
19. Wang Wei, Liu Youngtan. A system of signal detection and estimation for ground wave over-the-horizon radar // High Technol. Lett. 1997. No. 1. P. 70—83.
20. Frank U.A., Kratzer D.L., Sullivan J.L. The Two-pound Radar // RCA Eng. 1967. No. 2. P. 52—54.
21. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации. М.: Радио и связь, 1985. 376 с.
22. Черняк В.С. Теоретические вопросы обнаружения и определения местоположения людей в завалах с помощью многопозиционного сверхширокополосного радиолокационного устройства // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: Докл. 2-я Всерос. науч. конф., Муром, Россия, 4—7 июля 2006.
23. Sytnik O.V. Algorithm for Detection and Identification of Low Doppler Target // Telecommunications and Radio Engineering. 2004. Vol. 61. No. 2. P. 130—140.
24. Vuzmitinov I.A., Myroshnychenko Y.I., Sytnik O.V. The Features of Radar Developments for People Detection under Obstructions // Telecommunications and Radio Engineering. 2004. Vol. 61. No. 10. P. 875—885.
25. Вопросы подповерхностной радиолокации: коллективная монография / Отв. ред. А.Ю. Гринёва. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
26. Sytnik O.V., Myroshnychenko Y.I., Kopylov Y.A. Estimation of Implementation Errors Effect on Characteristics of Pseudorandom Radar Signal // Telecommunications and Radio Engineering. 2003. Vol. 60. No. 1&2. P. 132—140.
27. Справочник по радиолокации / Отв. ред. М. Сколник. М.: Сов. радио, 1978. Т. 3. 528 с.
28. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
29. Диксон Р.К. Широкополосные системы. М.: Радио и связь, 1979. 302 с.
30. Сытник О.В. Методы идентификации природных сред и объектов по данным радиофизического эксперимента // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 1. С. 30—57.
31. Sytnik O.V. Invariant Transformation in Identification Theory // Telecommunications and Radio Engineering. 2003. Vol. 60. No. 10, 11&12. P. 20—32.
32. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. математическая. 1941. № 5. С. 3—14.

33. *Wiener N.* Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. New York: John Willey, 1949. 162 p.
34. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 1. М.: Сов. радио, 1972. 744 с.
35. *Лозэ М.* Теория вероятностей. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. 719 с.
36. *Бендат Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов. М.: Мир, 1974. 464 с.
37. *Драган Я.П.* Энергетическая теория линейных моделей стохастических сигналов. Львов: Центр стратегических исследований экобиотехнических систем, 1997. 333 с.
38. *Драган Я.П.* Структура и представление моделей стохастических сигналов. Киев.: Наук. думка, 1980. 384 с.
39. *Омельченко В.А., Санников В.Г.* Вероятностные и детерминистские модели каналов и проблемы передачи информации в электросвязи. Киев.: НМК ВО, 1992. 200 с.
40. *Gardner W.A.* Spectral Correlation of Modulated Signals: Part I. Analog Modulation // IEEE Transactions on Communications. 1987. COM-35. No. 6. P. 584—594.
41. *Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А.* Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Сов. радио, 1977. 176 с.
42. *Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П.* Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 128 с.
43. *Кофман Л.Н.* Затухание радиоволн в горных породах // Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации. Рига, 1980. С. 61—65.
44. *Лещинский Ю.И., Ульянычев Н.В.* Расчет электрических параметров песчано-глинистых грунтов на метровых — сантиметровых волнах // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 5. С. 530—532.
45. *Хипп Д.Е.* Зависимость электромагнитных характеристик почвы от влажности, плотности и частоты / ТИИЭР. 1974. Т. 62. № 1. С. 122—127.
46. *Иванов Н.И., Иванова Е.П., Толубенко В.Г.* Потери электромагнитного излучения в зерновых насыпях // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. Харьков, 2000. Вып. 7. С. 102—105.
47. *Масалов С.А., Пузанов А.О.* Дифракция видеоимпульсов на слоистых диэлектрических структурах // Радиофизика и радиоастрономия. 1997. Т. 2. № 1. С. 85—94.
48. *Калмыков А.И., Тимченко А.И., Щербинин И.В.* Возможности исследования подповерхностных объектов с помощью радиолокационного зондирования // Препринт АН УССР, ИРЭ. Харьков, 1990. 26 с.



49. Радиолокационные наблюдения сильных отражателей, расположенных под слоем почвы. Модель подповерхностных отражений / А.И. Калмыков, И.М. Фукс, В.Н. Цимбал и др. // Препринт АН УССР, ИРЭ. Харьков, 1993. 30 с.

50. *Ulaby F.T., Moor R.K., Fung A.K.* Microwave Remote Sensing Active and Passive. Vol. 11. Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory. Reading, MA: Eddison — Wisley. 1982. 612 p.

51. *Тимченко А.И.* Особенности подповерхностного радиолокационного зондирования природных объектов // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 5. С. 1091—1094.

52. *Кротиков В.Д.* Некоторые электрические характеристики земных пород и их сравнение с характеристиками поверхностного слоя Луны // Изв. вузов. Радиофизика. 1962. Т. 5. № 6. С. 1057—1061.

53. *Лещинский Ю.М., Лебедева Г.Н., Шумилин В.Д.* Электрические параметры песчаного и глинистого грунтов в диапазоне сантиметровых, дециметровых и метровых волн // Изв. вузов. Радиофизика. 1971. Т. 14. № 4. С. 562—569.

54. *Hocktra P., Delaney A.* Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies // J.Geophys. Res. 1974. 79. P. 1699—1708.

55. Hans Shantz. The Art and Science of Ultrawideband Antennas. Boston—London: Artech House, 2005. 331 p.

56. *Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А.* Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / Отв. ред. А.А. Потапова. М.: Радиотехника, 2003. 720 с.

57. *Месяц Г.А., Яландин М.И.* Пикосекундная электроника больших мощностей // Успехи физических наук. 2005. Т. 175. № 3. С. 225—246.

58. Справочник по антенной технике: Справ.: В 5 т. Т. 1 / Л.Д. Бахрах, Л.С. Бенинсон, Е.Г. Зелкин и др. М.: ИПРЖР, 1997. 256 с.

59. Патент на полезную модель 14933, Украина. Спосіб розв'язки між передавальним і приймальним модулями антенної системи / Ю.О. Копилов, С.О. Масалов, Г.П. Почанін.

60. *Андренко С.Д., Вязьмитинов И.А., Сидоренко Ю.Б.* Антенная система радиолокатора непрерывного излучения // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. НАН Украины; Ин-т радиофизики и электроники. Харьков, 2003. Т. 8. № 1. С. 67—71.

61. *Силин Р.А., Сазонов В.П.* Замедляющие системы. М.: Сов. радио, 1966. 632 с.

62. *Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н.* Спиральные антенны. М.: Сов. радио, 1974. 224 с.

63. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами / Отв. ред. М. Абрамовиц и И. Стиган. М.: Наука, 1979. 832 с.

64. Фундаментальные и прикладные задачи теории рассеяния электромагнитных волн / Ю.К. Сиренко, И.В. Сухаревский, О.И. Сухаревский, Н.П. Яшина. Харьков: Крок, 2000. 344 с.

65. *Yee K.S.* Numerical solution of initial value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Trans. on AP.* 1966. Vol. 14. No. 5. P. 302—307.

66. *Engquist B., Majda A.* Absorbing boundary conditions for the numerical simulation of waves // *Mathematics of computation.* 1977. Vol. 31. No. 139. P. 629—651.

67. *Сиренко Ю.К.* Моделирование и анализ переходных процессов в открытых периодических, волноводных и компактных резонаторах. Харьков: Эдена, 2003. 363 с.

68. *Mur G.* Absorbing boundary conditions for the difference approximation of the time-domain electromagnetic field equations // *IEEE Trans. on EMC.* 1981. Vol. 23. No. 4. P. 377—382.

69. *Taflove A., Hagness S.C.* Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method. Boston: Artech House, 2000. 671 p.

70. *Rosen A., Stuchly M.A., Vander Vorst A.* Applications of RF/Microwaves in Medicine // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* Vol. 50. No. 3. 2002. P. 963—974.

71. *Okoniewski M., Stuchly M.A.* A study of the handset antenna and human body interaction // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* Vol. 44. No 10. 1996. P. 1855—1864.

72. *Clery S.F.* Microwave radiation effect on humans // *Bioscience.* Vol. 33. No. 4. 1983. P. 269—273.

73. *Vander Vorst A., Duhamel F.* 1990—1995 advances in investigating the interaction of microwave fields with the nervous system // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* Vol. 44. No. 9. 1996. P. 1898—1909.

74. *Apollonio F., D'Inzeo G., Tarricone L.* Theoretical analysis of voltage-gated membrane channels under GSM and DECT exposure // *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., Denver, CO, 1997.* P. 103—106.

75. *Michaelson S., Lin J. C.* Biological Effects and Health Implications of Radio-Frequency Radiation. New York: Plenum, 1987.

76. *Гуляев Ю.В.* Физические поля и излучения человека: новые методы ранней медицинской диагностики // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника.* 2000. № 12. С. 3—11.

77. *Бецкий О.В., Девятков Н.Д., Лебедева Н.Н.* Лечение электромагнитными полями. Ч. 3 // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника.* 2000. № 12. С. 11—31.

78. *Анищенко Л.Н., Ивашов С.И., Чапурский В.В.* Математическое моделирование методов выделения сигналов дыхания и сердцебиения в ви-

деоимпульсном радиолокационном датчике// Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2006. № 10. С. 16—21.

79. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С.* Измерение скорости нанометровых перемещений по спектру автодинного сигнала лазера на квантоворазмерных структурах// Письма в ЖТФ. 2004. № 7. С. 77—82.

80. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В.* Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С. 51—57.

81. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Калинин М.Ю.* Восстановление формы сложного движения объекта по сигналу автодинного детектирования полупроводникового лазера // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 2. С. 125—129.

82. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2003.

83. Сверхвысокочастотный автодинный измеритель параметров вибраций / Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль, А.Э. Постельга // Приборы и техника эксперимента. 2004. № 5. С. 130—134.

84. Радиоволновая интерферометрия движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением / Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль и др. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. № 11/12. С. 44—51.

85. Radiowave Interferometry of Human Respiratory Movements and Heartbeats / A.V. Abramov, A.S. Bogolyubov, A.E. Postelga, D.A. Usanov, Al.V. Skripal, An.V. Skripal // Proc. of 35rd European Microwave Conference. Paris, France. 4—6th October 2005. Vol. 2. P. 1047—1050.

86. Радиоволновая интерферометрия смещений грудной клетки человека, связанных с дыханием и сердцебиением/ Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль и др. // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Докл. 15-я Междунар. конф., Севастополь, Украина, 12—16 сент. 2005. Севастополь, 2005. С. 900—901.

87. *Usanov D.A., Skripal Al.V., Abramov A.V., Bogolyubov A.S., Postelga A.E.* Radiowave monitoring of human respiratory movements and heartbeats // Proc. of XVI International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2006. Poland, Krakow, May 22—24, 2006. Vol. 2. P. 667—770.

88. Патент на изобретение РФ № 2295911. Способ дистанционного контроля физиологических параметров жизнедеятельности организма / Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль, А.В. Абрамов, А.Э. Постельга, А.С. Боголюбов. Опубл. 27.03.2007. Бюл. № 9.

89. *Хелзайн Дж.* Пассивные и активные цепи СВЧ. М.: Радио и связь, 1981.

90. *Chattopadhyay T.P.* An injection-locked hybrid microwave discriminator // Proc. IEEE, 1986. Vol. 74. No. 5. P. 746—748.

91. *Мандельштам Л.И.* Полное собрание трудов. М.: Изд-во АН СССР, 1947. Т. 2.

92. *Лебедев И.В.* Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М.: Высшая школа, 1970.

93. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Вагарин В.А.* Определение амплитуды колебаний оптическим гомодинным методом по высшим гармоникам // Приборы и техника эксперимента. 1994. № 6. С. 612—165.

94. *Wei Jin, Li Ming Zang, Uttamchandani D., Culshaw B.* Modified J1...J4 method for linear readout of dynamic phase changes in a fiber-optic homodyne interferometer// Appl. Opt., 1991. Vol. 30. No. 31. P. 4496—4499.

95. *Pernick B. J.* Self-Consistent and Direct Reading Laser Homodyne Measurement Technique// Appl. Opt., 1973. Vol. 12. No. 3. P. 607—610.

96. *Mashkov D.A., Skripal A.V., Usanov D.A.* Vibration amplitude determination from the spectrum of autodyne signal of semiconductor laser // Proc. SPIE, 2003. Vol. 5067. P. 126—131.

---

## **Глава 4. БИОРАДИОЛОКАТОРЫ С ИМПУЛЬСНЫМ СИГНАЛОМ**

---

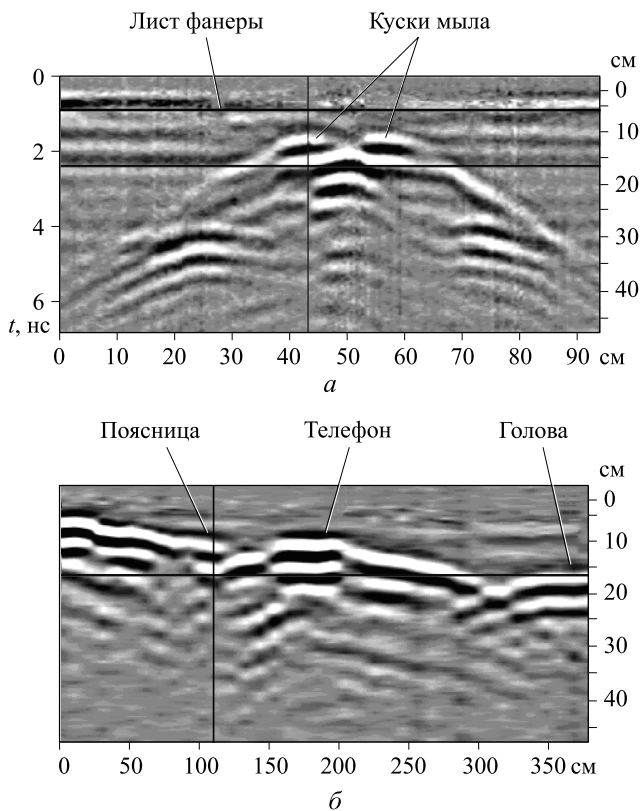
### **4.1. Особенности построения сверхширокополосных РЛС ближнего радиуса действия для регистрации физиологических параметров человека**

Наиболее реальным использованием СШП-технологии в радиолокации является создание относительно маломощных доплеровских РЛС, работающих на дистанциях в единицы и десятки метров. Такие РЛС находят самое широкое применение в различных областях человеческой деятельности, где требуется высокая точность дистанционного и бесконтактного наблюдения за движущимися объектами на небольших расстояниях. Одной из этих областей является медицина, где применение СШП РЛС для дистанционного измерения параметров сердечной и дыхательной деятельности человека позволяет в клиниках или ожоговых центрах вести круглосуточный бесконтактный контроль состояния пациентов, а в домашних условиях — осуществлять самостоятельную периодическую проверку параметров организма с последующей передачей полученных данных по телефонным сетям в центры контроля жизнедеятельности для диагностики и принятия необходимых мер.

Ниже рассмотрены особенности построения РЛС такого типа, их применение в медицинских целях и возможность выполнения ими необходимых для этого функций.

#### **4.1.1. Особенности построения СШП РЛС**

Функционирование доплеровских СШП РЛС, так же как и традиционных узкополосных, основано на отражении электромагнитных волн от объекта, образующего раздел двух сред, имеющих разные параметры, и на изменении параметров сигнала, отраженного от движущегося объекта. Однако при этом построение СШП РЛС имеет свои особенности, которые связаны в основном с су-



**Рис. 4.157.** Сечение объекта в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскостях

неподвижных людей по их дыханию, а также обнаружение опасных предметов, размещенных под одеждой на теле человека.

## Литература к главе 4

1. FCC 02-48, ET Docket 98-153, First Report and Order, April 2002.
2. FCC 04-285, ET Docket 98-153, Second Report and Order and Second Memorandum Opinion and Order, December 2004.
3. Данилова Н.Н. Психофизиология. М.: Аспект-Пресс, 2007. 367 с.
4. Данилова Н.Н. Функциональные состояния: механизмы и диагностика. М.: Наука, 1985.
5. Анализ variabilityности сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем (часть 1) / Р.М. Баевский, Г.Г. Иванов, Л.В. Чирейкин и др. // Вестник аритмологии. 2002. № 24. С. 65.

6. *Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З.* Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М.: Наука, 1984. С. 220.
7. *Баевский Р.М., Семенов Ю.Н., Черникова А.Г.* Анализ variability сердечного ритма с помощью комплекса «Варикард» и проблема распознавания функциональных состояний. Хронобиологические аспекты артериальной гипертензии в практике врачебно-летней экспертизы. М.: Медицина, 2000. С. 167–178.
8. *Баевский Р.М., Иванов Г.Г.* Variability сердечного ритма: теоретические аспекты и возможности клинического применения / [www.ecg.ru/books/book03/index.html](http://www.ecg.ru/books/book03/index.html)
9. Heart rate variability. Standatds of Measurement, Physiological interpretation and clinical use // *Circulation*. 1996. Vol. 93. P. 1043–1065.
10. Комплексная психофизиологическая оценка состояний стресса и утомления / А.М. Черноризов, С.А. Исайчев, И.А. Дубынин, Е.Г. Батурина // I съезд врачей железнодорожного транспорта. Москва, ВВЦ. 30.11.2004.
11. *Исайчев С.А., Черноризов А.М., Батурина Е.Г.* Диагностика динамических изменений ФС человека при монотонии и стрессе: Всерос. конф. по проблемам корпоративной безопасности. Тверь: Изд-во ТГУ, 2005.
12. *Батурина Е.Г., Исайчев С.А.* Зависимость слуховых вызванных потенциалов от условий операторской деятельности. Ломоносов, 2005 // *Вестник МГУ. Психология*.
13. *The Lancet*. Vol. 349. No. 9061. 3 May 1997.
14. *Иммореев И.Я.* Возможности и особенности сверхширокополосных радиосистем // *Прикладная электроника*. Харьков, 2002. Т. 1. № 2. С. 122–140.
15. *Иммореев И.Я.* Сверхширокополосные радары: новые возможности, необычные проблемы, системные особенности // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 1998. Вып. 4.
16. *Иммореев И.Я.* Main possibilities and main features of ultra-wideband (UWB) radars // *Радиофизика и радиоастрономия*. 2002. Т. 7. № 4.
17. *Immoriev I.* Main Features of UWB Radars and Differences from Common Narrowband Radars // В кн.: «Ultrawideband Radar Technology», Edition by James D.Taylor. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington D.C. 2000.
18. *Зайцев А.В.* Исследования электромагнитных полей во временной области: Сб.: Антенны / Под ред. Л.Д. Бахраха. 2001. Вып. 6 (51). С. 3–10.
19. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Дробкин и др. М.: Сов. радио, 1974.
20. Антенны УКВ: Ч. 1. / Г.З. Айзенберг и др. М.: Связь, 1977.
21. Особенности излучения сверхширокополосных сигналов каноническими антеннами / А.В. Зайцев и др. // ЦВНИ МО РФ. Сер. Б. М., 2006. Вып. 76. 35 с.

22. *Подосенов С.А., Потапов А.А., Соколов А.А.* Импульсная электродинамика широкополосных радиосистем и поля связанных структур / Отв. ред. А.А. Потапова. М.: Радиотехника, 2003. 720 с.
23. *Фрадин А.З.* Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977.
24. *Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В.* Развитие георадаров серии «ОКО». // Вопросы подповерхностной радиолокации / Под ред. А.Ю. Гринёва. М., 2005.
25. *Семейкин Н.П., Помозов В.В., Дудник А.В.* Расширение спектра георадарных задач как следствие совершенствования аппаратной базы // Разведка и охрана недр. 2005. № 12.



---

## Глава 5. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ДЫХАНИЯ И СЕРДЦЕБИЕНИЯ

---

При радиолокации живых объектов в качестве зондирующего сигнала (ЗС) могут использоваться непрерывные немодулированные или модулированные СВЧ-сигналы в диапазонах частот от сотен мегагерц до десятков гигагерц с различной занимаемой полосой частот — от узкополосных (УП) до широкополосных (ШП) и сверхширокополосных (СШП), в том числе СШП видеоимпульсные сигналы (ВИС), не имеющие явно выраженной несущей частоты [1–7].

Сигналы, отраженные от человека, приобретают специфическую биометрическую модуляцию, которая отсутствует при отражении от неживых объектов и местных предметов (МП). Такая модуляция в отраженном радиосигнале вызвана сокращениями сердца, сосудов, легких и особенно колебаниями кожных покровов в области грудной клетки и гортани в такт дыханию и сердцебиению [3, 8, 9]. Эти процессы носят почти периодический характер с частотами в диапазоне 0,8...2,5 Гц для сердца и 0,2...0,5 Гц для легких. Таким образом, отраженный СВЧ-сигнал имеет периодическую модуляцию по задержке или по фазе в такт с колебаниями кожных покровов и внутренних органов. Параметры этой модуляции определяются частотой и интенсивностью дыхания и сердцебиения. Возможна и аperiodическая модуляция сигнала, вызванная малыми перемещениями частей тела и артикуляцией органов речи [5, 10].

При режекции (подавлении) проникающего сигнала передатчика и сигналов, отраженных от МП, можно добиться высокой чувствительности радиолокационного обнаружения объектов, границы которых подвержены малым механическим колебаниям. По имеющимся в литературе данным, чувствительность радиочастотного зондирования в гигагерцовых диапазонах волн потенциально может достигать  $10^{-9}$  м [11].

На практике наблюдение за живыми людьми с помощью радиолокатора производится на фоне отражений ЗС от МП. Как

ние по дальности ближайшей отметки вполне точно соответствовало истинному положению цели. В ряде случаев отметки не разрешаются по дальности и интерферируют, в результате чего наблюдается небольшое смещение дальности истинной отметки.

При обнаружении дышащего человека также имеет место дальностный интерференционный гребень отметок, начало которого всегда соответствует истинной дальности до цели. Максимумы на больших дальностях объясняются переотражениями вида радиолокатор — МП — человек — радиолокатор, где в качестве МП могут выступать плоскости стен, пол, потолок и иные неподвижные предметы. Особенность отражений от задней стены заключается в том, что человек переотражает их по принципу радиолокации на просвет, т. е. за счет образования на силуэте человека весьма интенсивной теневой компоненты рассеянного поля, которая приводит к большому сигнальному максимуму на увеличенной дальности, в ряде случаев превосходящему прямое отражение от грудной клетки. В проведенных экспериментах вторая гармоника дыхания не наблюдалась и практически не удалось обнаружить компоненту сердцебиения.

В целом эксперименты подтвердили работоспособность макета и правильность выбранных технических решений в части аппаратной режекции интенсивных отражений от неподвижных МП. В экспериментах подтвержден также установленный с помощью математического моделирования факт наличия и влияния на сигнальную функцию в плоскости частота — дальность интерференционных переотражений от МП и поверхностей в помещении через подвижные объекты (маятник, дышащий человек). Простейшей мерой борьбы с такими переотражениями является расширение полосы частот ЗС вплоть до появления разрешения интерференционных путей по дальности и применение логического выделения ближайшей отметки по дальности на обнаруженной частоте дыхания.

## Литература к главе 5

1. Microwave Life-Detection System for Searching Human Subjects Under Earthquake Rubble or Behind Barrier / Kun-Mu Chen, Yong Huang, Jianping Zhang, A. Norman. // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. Vol. 27. No 1. January 2000. P. 105—114.
2. Barnes Mark A., Nag Soumya, Payment Tim. Covert situational awareness with handheld ultra-wideband short pulse radar, SPIE Conference on «Radar Sensor Technology VI», Orlando, Fla. 19 April 2001, Proc. SPIE. 2001. Vol. 4374, P. 66—77.

3. *Staderini E.M.* UWB Radars in Medicine, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. January 2002. P. 13—18.
4. *Immooev 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. Vol. 7. No. 4. P. 404—407.
5. Обнаружение и дистанционная диагностика людей за препятствиями с помощью РЛС / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов и др. // Радиотехника. 2003. № 7. С. 42—47.
6. Радиоволновая интерферометрия движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением / Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль, Ан.В. Скрипаль и др. // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2005. № 11—12. С. 44—51.
7. Ultra-Wideband Radar Technology. Edited by James D. Taylor. CRC Press. Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 2000.
8. *Greneider E.F.* Radar Sensing of Heartbeat and Respiration at a Distance with Application at the Technology. IEE Conference RADAR-97, 14—16 October 1997. Conf. Publication Number 449. P. 150—154.
9. *Greneider E.F.* Radar Sensing of Heartbeat and Respiration at a Distance with Security Applications. Proceedings of SPIE, Radar Sensor Technology II. Orlando, Florida, April 1997. Vol. 3066. P. 22—27.
10. Speech articulator measurements using low power EM-wave sensors / Holzrichter J.F., Burnett G.C., Ng L.C. and Lea W.A. // Journal Acoustical Society of America. Vol. 103. No. 1, January 1998. P. 622—625.
11. *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. P. 176—186.
12. *Евсиков Ю. А., Чанурский В.В.* Преобразование случайных процессов в радиотехнических устройствах. М.: Высш. шк., 1977.
13. *Рабинер Л.Р., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1981.
14. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем / С.В. Первачев, А.А. Валуев, В.М. Чиликин и др. М.: Сов. радио, 1973.
15. *Васильев И.А., Ивашов С.И., Саблин В.Н.* Широкозахватная радиотехническая система обнаружения мин // Радиотехника. Радиолокационные системы и системы радиоуправления. 1998. № 4. С. 55—58.
16. *Черненко А.И., Самков С.В.* Алгоритм обработки сигналов сверхширокополосного радара для измерения параметров сердечно-сосудистой системы человека // Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике: Докл. I Междунар. конф., Суздаль, Россия, 27—29 сентября 2005. Суздаль, 2005. С. 51—54.
17. *Борисов Ю.П., Пенин П.И.* Основы многоканальной передачи информации. М.: Связь, 1967.

18. *Wehner D.R.* High Resolution Radar. Artech House. 1987.

19. *Васильев В.Н., Гуров И.П.* Компьютерная обработка сигналов в приложении к интерферометрическим системам. ВНУ, 1998.

20. *Vertiy A.A., Voinovskyy I.V.* Sunullah Ozbek. Microwave through-obstacles life-sings detection system. Proceedings of the International Workshop on Microwaves, Radar and Remote Sensing MRRS 2005. Kiev, Ukraine. September 19—21, 2005.

21. *Васильев И.А., Ивашов С.И., Чапурский В.В., Шейко А.П.* Исследование радиолокатора малой дальности со ступенчатой частотной модуляцией при работе внутри помещения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2008. № 1. С. 31—47.

---

## **Глава 6. ОБНАРУЖЕНИЕ НЕПОДВИЖНЫХ ЛЮДЕЙ ПОД ЗАВАЛАМИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОЛОКАТОРА\***

---

Известно много работ, посвященных проблеме обнаружения людей за оптически непрозрачными преградами с помощью радиолокаторов (РЛ) [1—11]. Как правило, применяются СШП-радиолокаторы с наносекундными ЗС, обладающие очень высокой разрешающей способностью по дальности. Ряд устройств уже есть на рынке [5—9]. Некоторые из них специально предназначены для поиска людей под завалами [7]. Живой человек обнаруживается благодаря квазипериодическим изменениям задержки эхосигналов в результате движения поверхности тела при дыхании.

Несмотря на то что дальность действия таких радиолокаторов обычно не превышает 8...10 м, обнаружение живых людей оказывается весьма трудной задачей как из-за очень малой энергии каждого наносекундного зондирующего импульса, так и из-за большого ослабления сигналов при их распространении сквозь завалы строительных конструкций. Кроме того, ЭПР движущейся части поверхности тела мала. Наконец, желательно учитывать ограничения излучаемой мощности, вытекающие из требований электромагнитной совместимости.

Все это приводит к необходимости оптимизации алгоритма обнаружения полезного сигнала. Настоящая глава посвящена решению этой задачи (см. также [12—14]).

### **6.1. Основные особенности задачи обнаружения**

Задача радиолокационного обнаружения живого человека в завалах строительных конструкций имеет ряд существенных особенностей. Наиболее важные из них следующие.

---

\* В настоящей главе использованы результаты работы, выполненной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований: Проект 05-02-08139.

## Литература к главе 6

1. *Barnes Mark A., Nag Soumya, Payment Tim.* 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. Vol. 4374. P. 66—77.
2. Обнаружение и дистанционная диагностика людей за препятствиями с помощью РЛС / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов и др. // Радиотехника. 2003. № 7. С. 42—47.
3. *Immooeev I., Samkov S., Teh-Ho Tao.* Short-Distance Ultra-Wideband Radars / IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. Vol 20. No. 6. 2005.
4. UWB Signal Propagation Through Walls / P. Bezousek, V. Schejbal, D. Cermak et al. // Proc. of MRSS-2005. Kiev, 2005.
5. *Prism 100, Prism 200,* Cambridge Consultants Limited, UK. [www.cambridgeconsultants.com](http://www.cambridgeconsultants.com)
6. Through Wall Radar Vision, Time Domain Corp., [www.radarvision.com](http://www.radarvision.com)
7. Радар-01, Научно-производственная фирма «Плис-ЛТД», Москва, Россия.
8. СШП-радар для наблюдения живых объектов / А.В. Андрианов, М.Г. Домбек, С.В. Курамшев и др. //Труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. Сер. Сверхширокополосные сигналы и сверхкороткие импульсы в радиолокации, связи и акустике. Москва, 2005. Вып. 1. С. 137—139.
9. [www.camero-tech.com/xaver800.shtml](http://www.camero-tech.com/xaver800.shtml), Xaver 800 Through-Wall Vision.
10. Through-Wall radar / J. Sachs, J. Friedrich, R. Zetik et al. // Proc. of the IRS 2005. Berlin, Germany. 6—8 September 2005.
11. UWB Radar for Human Being Detection/ A.G. Yarovoy, J. Matuzas, B. Levitas, L.P. Lighthart // Proc. EuRAD 2005, Paris, 6—7 October 2005. P. 85— 88.
12. *Черняк В.С.* Теоретические вопросы обнаружения и определения местоположения людей в завалах с помощью многопозиционного сверхширокополосного радиолокационного устройства // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике: Докл. 2-я Всерос. науч. конф. Муром, Россия, 4—7 июля 2006.
13. *Chernyakh V.* Signal Processing in Multisite UWB Radar Devices for Searching Survivors in Rubble //Proc. EuRAD-2006. Manchester UK, 13—15 September 2006.
14. *Chernyakh V.* Principles of UWB Multisite Radar Devices for Searching Survivors in Rubble //Proc. of CIE Int. Conf. on Radar, ICR-2006. Shanghai, China, 16—19 October 2006.
15. Радиолокационные методы выделения сигналов дыхания и сердцебиения / А.С. Бугаев, И.А. Васильев, С.И. Ивашов, В.В. Чапурский // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 10. С. 1224—1239.

16. *Frazier L.* Radar surveillance through solid materials // SPIE Photonics East conference. Enabling technologies for law enforcement and security. Boston, MA. Paper 2938-20. November 18–22, 1996.
17. [www.cis.rit.edu/info/IA\\_S2004\\_files/HuntCharts.pdf](http://www.cis.rit.edu/info/IA_S2004_files/HuntCharts.pdf) (Image formation through walls using a distributed radar sensor network. CIS Industrial Associates Meeting, 12 May 2004.)
18. *Stone W.* Electromagnetic Signal Attenuation in Construction Materials, NIST Construction Automation Program, Report No. 3, October 1997.
19. FCC 02-48, ET Docket 98-153, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems, 2002.
20. *Hanna S.A.* Ultra-Wideband Development within ITU Task Group 1/8, 2005 Int. Workshop on UWB Technologies, Yokosuka, Japan, December 8–10, 2005.
21. *Chernyak V., Immoreev I.* Detection of Extended Targets by Ultra-Wideband Radars // Proc. Int. Radar Symp. «IRS-2003». Dresden, Germany, 2003.
22. Теоретические основы радиолокации / Отв. ред. Я.Д. Ширман. М.: Сов. радио, 1970.
23. *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1982.
24. *Левин Б.П.* Теоретические основы статистической радиотехники: В 3 т. М.: Сов. радио, 1975. Т. 2. 392 с.
25. FCC 04-285, ET Docket 98-153, Second Report and Order and Second Memorandum Opinion and Order, December 2004.
26. [www.aptsec.org](http://www.aptsec.org) (Update of Worldwide UWB regulation status, IDA, Singapore, 2005) [www.aptsec.org](http://www.aptsec.org)

---

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

Биорадиолокационные системы, представленные в этой монографии, появились на стыке работ в области радиофизики и биологии — разделов науки достаточно далеких друг от друга. Тем не менее эти системы сразу привлекли внимание исследователей, а затем и потенциальных потребителей во многих странах мира. Главной причиной такого внимания явилась особенность, присущая радиолокационным системам как источникам информации — возможность дистанционно и бесконтактно контролировать положение и состояние наблюдаемой цели. А прогресс радиолокационной техники и технологии, позволивший существенно увеличить количество и повысить качество информации, получаемой о цели, «повернул» радиолокацию к наблюдению за такими нетрадиционными для нее объектами, как живые организмы.

Несмотря на то что разделы монографии различаются по своему содержанию и полноте описания биорадиолокационных систем различного типа, книга в целом дает читателю достаточно полную картину современного состояния этого интенсивно развивающегося направления техники. Широкий спектр представленных в монографии систем — от радиолокаторов, излучающих непрерывные колебания (разд. 3), до радиолокаторов, излучающих импульсы нано- и пикосекундной длительности (разд. 4) — позволяет получить представление о возможностях этих систем и оценить их достоинства и недостатки.

Специалисты, создающие биорадиолокационные системы, обычно не имеют образования в области биологии. Поэтому разделы монографии, посвященные биологическим особенностям человеческого организма (разд. 2.1 — 2.4), позволят им более точно представить предмет и помогут в дальнейшем более грамотно и целенаправленно проектировать такие системы.

Биорадиолокационные системы по своему назначению подразделяются на две группы. К первой относятся радиолокаторы, обеспечивающие наблюдение за живыми объектами в условиях особых и чрезвычайных ситуаций — от спасения людей, погреб-



бенных под развалинами зданий или снежными лавинами, до тайного наблюдения за криминальными группами, находящимися в здании или скрывающимися за естественными преградами (разд. 3.1, 3.2, 4.5, 4.7 и гл. 5, 6). Во вторую группу входят радиолокаторы, имеющие чисто медицинское применение — от длительного дистанционного контроля за больными в реанимационных и ожоговых отделениях больниц до быстрого профилактического осмотра (скрининга) больших групп людей (разд. 4.2, 4.3, 4.4).

К биорадиолокаторам каждой из этих групп предъявляются различные требования. Так, радиолокаторы первой группы должны обнаруживать и наблюдать за людьми, находящимися за преградами различного типа на фоне мощных отражений от окружающих их предметов и подстилающей поверхности. Однако преграды вносят в излученный сигнал большое затухание, иногда исчисляемое десятками децибеллов. Чтобы обеспечить отношение сигнал/шум, которое позволит обнаружить объект, требуется относительно большой уровень мощности излучаемого сигнала. Кроме того, в большинстве случаев на радиолокаторы этой группы возлагается задача определения угловых координат живого объекта. Для ее решения необходимо применение сканирующих антенн (антенных решеток) либо антенн достаточно большого размера. Эти обстоятельства приводят к усложнению аппаратной части биорадиолокаторов первой группы.

В то же время «полевые» условия эксплуатации таких систем, как правило, требуют малого веса и габаритов, автономного питания в течение длительного периода времени, простоты управления. Эти же условия обычно диктуются требованием оперативного обнаружения живого объекта. Однако такой объект в спокойном состоянии совершает очень медленные и малые по амплитуде движения. Так, у неподвижного человека самый «информативный» движущийся орган — грудная клетка — совершает примерно шесть движений (вдохов) в минуту с амплитудой 1,5—2 см. Для обнаружения сигнала, отраженного от такого медленно движущегося объекта, может потребоваться несколько минут. Таким образом, важный оперативный параметр — время обнаружения объекта — является критическим для биорадиолокатора.

Дополнительной трудностью, стоящей на пути проектирования биорадиолокаторов первой группы, является выбор средней частоты спектра сигнала. Для уменьшения затухания сигнала в преградах, позволяющего снизить мощность передатчика, целесообразно выбрать по-возможности более низкое значение средней частоты спектра. Однако с понижением частоты растут размеры антенных систем (при равных требованиях к их параметрам).

рам), что сказывается на эксплуатационных характеристиках радиолокатора. Одновременно уменьшается величина доплеровского приращения частоты, вызванного движением объекта, что снижает фазовую чувствительность системы обработки сигнала, особенно важную в биорадиолокации, где наблюдаемые объекты перемещаются с очень малыми скоростями.

На выбор средней частоты спектра сигнала влияют также законодательные ограничения. Широкополосные и сверхширокополосные биорадиолокаторы занимают в эфире весьма широкую полосу частот, которая может перекрывать диапазоны рабочих частот других радиотехнических систем. Для исключения взаимных помех для биорадиолокационных систем во многих странах в законодательном порядке вводятся так называемые маски, устанавливающие допустимый уровень излучаемой радиолокатором мощности в зависимости от диапазона частот. Особенно жесткие ограничения излучаемой мощности касаются широкополосных и сверхширокополосных радиосистем, работающих на частотах ниже 3 ГГц, поскольку в этом диапазоне используются космические системы навигации и связи, обеспечивающие эксплуатацию транспортных средств практически всех стран мира. Безусловно, при работе биорадиолокаторов первой группы в зоне катастрофы возможны определенные кратковременные отступления от норм, установленных законодательством. Однако сегодня такие отступления пока не регламентированы.

Учитывая большую востребованность этой группы биорадиолокаторов, вызванную ухудшением криминогенной обстановки в мире и появлением многочисленных антитеррористических программ, разработчикам таких биорадиолокаторов необходимо искать технические и технологические пути преодоления указанных выше трудностей и противоречий.

Биорадиолокаторы второй группы, используемые в медицинских целях, работают в значительно более благоприятных условиях. Дальность действия таких радиолокаторов не превышает нескольких метров, отсутствуют потери энергии в среде распространения сигнала, местоположение объектов наблюдения, как правило, известно и зафиксировано. Но к радиолокаторам этой группы предъявляются значительно более высокие требования по точности измерения параметров живого объекта и воспроизведения траектории его движения.

В наиболее распространенном случае биорадиолокаторы второй группы выполняют длительный мониторинг частоты дыхания и частоты сердечного ритма человека. В условиях реанимационных отделений больниц к этим функциям добавляется конт-

роль за превышением верхней и нижней границ частот дыхания и пульса, определяемых врачом.

Основное преимущество биорадиолокаторов перед традиционными методами длительного контроля состояния человеческого организма заключается в бесконтактном и не беспокоящем больного мониторинге его физиологических параметров. Биорадиолокатор не требует регулярной очистки инструментария, не требует использования одноразового инвентаря и в сочетании с невысокой стоимостью является перспективным прибором для широкого применения в медицине. Биорадиолокаторы этого типа с успехом могут заменить известные методы измерения механического перемещения абдоминального и торакального участков грудной клетки человека (разд. 2.2), перемещения поверхности грудной клетки при пульсациях сердца и сосудов (разд. 2.1) — кинетокардиографию, динамокардиографию, баллистокардиографию.

Наиболее информативными являются биорадиолокаторы второй группы, воспроизводящие траекторию движения грудной клетки или сердца человека. Полученные биорадиолокатором данные обычно верифицируются с помощью электрокардиограммы, снятой одновременно с радарограммой. Однако необходимо отметить, что электрокардиограф и радиолокатор выдают разную информацию о работе сердца. Электрокардиограф регистрирует электрические потенциалы, управляющие работой сердечных мышц, а радиолокатор фиксирует механическое движение сердца и его отдельных элементов. Эти данные не дублируют, а существенно дополняют друг друга. По мнению известного отечественного терапевта члена-корреспондента РАМН, доктора медицинских наук, профессора Московской медицинской академии им. И.М. Сеченова В.И. Маколкина, совместная обработка электрокардиограммы и радарограммы позволит существенно расширить диагностические возможности лечащего врача.

Для реализации этой возможности биорадиолокатор должен обеспечивать высокую точность воспроизведения истинного движения живого объекта. Трудность воспроизведения заключается в том, что грудная клетка и сердце человека совершают необычное для традиционной радиолокации поступательно-возвратное движение. Когда амплитуда этого движения становится сравнимой с длиной волны излучаемого сигнала или превосходит ее, форма принятого сигнала начинает существенно отличаться от формы излученного и для восстановления истинной траектории живого объекта применяются нетрадиционные методы обработки сигнала.

В дальнейшем на основе таких биорадиолокаторов возможно создание биорадиолокационного томографа, позволяющего получить объемную динамическую картину механического движения грудной клетки и сердца человека.

Биорадиолокация является новой технологией, совершающей первые попытки выхода на широкий технологический рынок, для чего есть все возможности. Авторы надеются, что настоящая монография станет инструментом ускорения этого процесса.

---

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

Предисловие .....	3
Введение .....	6
Литература .....	10
<b>Глава 1. Обзор разработок в области биорадиолокации .....</b>	<b>11</b>
Литература к главе 1 .....	36
<b>Глава 2. Общие сведения о биологических объектах радиолока-</b>	
<b>ционного наблюдения .....</b>	<b>38</b>
2.1. Биомеханика дыхания и сердцебиения человека .....	38
2.1.1. Изменения формы поверхности грудной клетки при	
дыхании .....	38
2.1.2. Исследование биомеханики внешнего дыхания .....	41
2.1.3. Перемещение поверхности грудной клетки при	
пульсациях сердца и сосудов .....	44
2.2. Брюшной и грудной компоненты дыхательных движений .....	49
2.2.1. Дыхательные движения грудной клетки и выделение	
грудного и брюшного компонентов .....	50
2.2.2. Степени свободы и линейность .....	55
2.2.3. Методы исследования движений грудной клетки и	
методы калибровки .....	57
2.2.4. Модели механики дыхания .....	61
2.2.5. Эксперименты и факты .....	62
2.2.6. Невесомость и гравитационные перегрузки .....	64
2.3. Роль грудного и брюшного компонентов в спонтанном	
и произвольном дыхании .....	66
2.4. Диэлектрические характеристики биологических тканей .....	76
2.5. Физические основы биорадиолокации .....	83
2.5.1. Отражение электромагнитных волн от границы раз-	
дела двух сред .....	83
2.5.2. Отражение ЭМВ от слоистой структуры .....	85
2.5.3. Чувствительность коэффициента отражения ЭМВ	
от многослойной структуры к параметрам модели .....	88
Литература к главе 2 .....	93

<b>Глава 3. Биорадиолокаторы с непрерывным сигналом</b> . . . . .	98
3.1. Монохроматический биорадиолокатор . . . . .	98
3.1.1. Математическая модель монохроматического биорадиолокатора . . . . .	99
3.1.2. Эксперименты и результаты . . . . .	100
3.2. Обнаружение и идентификация людей за оптически непрозрачными преградами с использованием квазинепрерывных, псевдослучайных, широкополосных сигналов . . . . .	106
3.2.1. Концепции построения радиофизических систем для обнаружения биообъектов . . . . .	107
3.2.2. Методы идентификации биообъектов по сигналу когерентно-доплеровского радиолокатора. Теория, математические модели и эксперимент . . . . .	109
3.2.3. Методы и алгоритмы компенсации движения собственно локатора . . . . .	127
3.2.4. Экспериментальные данные по поглощению радиоволн СВЧ-диапазона в техногенных препятствиях . . . . .	132
3.2.5. Методы электродинамической развязки между передающей и приемной антеннами когерентно-доплеровской РЛС . . . . .	137
3.3. Радиоволновая интерферометрия движений тела человека, связанных с дыханием и сердцебиением . . . . .	148
3.3.1. Одночастотная радиоволновая интерферометрия . . . . .	149
3.3.2. Многочастотная радиоволновая интерферометрия . . . . .	158
3.3.3. Программное обеспечение радиоволнового интерферометра физиологических параметров жизнедеятельности организма . . . . .	161
Литература к главе 3 . . . . .	162
<b>Глава 4. Биорадиолокаторы с импульсным сигналом</b> . . . . .	170
3.1. Особенности построения сверхширокополосных РЛС ближнего радиуса действия для регистрации физиологических параметров человека . . . . .	170
3.1.1. Особенности построения СШП РЛС . . . . .	170
3.2. Дистанционный контроль психофизиологического состояния человека с помощью СШП РЛС . . . . .	202
3.2.1. Психофизиологические основы контроля состояния и работоспособности человека . . . . .	203
3.2.2. Параметры, характеризующие ФС человека . . . . .	205
3.2.3. Сравнение показателей ВСР с контрольными показателями ЭЭГ . . . . .	206
3.2.4. Описание СШП РЛС, используемой для контроля ФС человека . . . . .	208

4.2.5. Обработка принятых сигналов	212
4.2.6. Сравнение данных РЛС и электрокардиографа	217
4.2.7. Улучшение качества радиолокационной информации при нечетком входном сигнале	220
4.3. Использование СШП-технологии для диагностики сердечной и сосудистой систем человека	225
4.3.1. Актуальность измерений параметров пульса человека	225
4.3.2. Состав и технические характеристики СШП-измерителя пульса	229
4.3.3. Принцип работы СШП-измерителя	230
4.3.4. Определение СПВ	234
4.3.5. Определение ВСР	235
4.3.6. Проверка правильности данных, полученных СШП-измерителем пульса	238
4.4. Сверхширокополосный радар для дистанционной регистрации физиологических показателей и общих двигательных реакций человека	241
4.5. Использование СШП РЛС для обнаружения людей в лесном массиве	249
4.5.1. Описание использованной в эксперименте СШП РЛС	250
4.5.2. Схема, методика и результаты эксперимента	253
4.6. Антенны для излучения и приема сверхширокополосных сигналов в биорадиолокации	257
4.6.1. Элементарные излучатели	259
4.6.2. Передающий симметричный вибратор	260
4.6.3. Приемный симметричный вибратор	267
4.6.4. Согласованные передающий и приемный вибраторы	273
4.6.5. Согласованный ТЕМ-рупор	276
4.6.6. Конструкции и параметры эффективных СШП-антенн для биорадаров	276
4.7. Обнаружение движущихся объектов, расположенных за непрозрачными преградами, с помощью видеоимпульсного георадара	283
4.7.1. Обнаружение движущегося человека за различными преградами	284
4.7.2. Обнаружение неподвижного человека по его дыханию	286
4.7.3. Определение угла местоположения человека	287
4.7.4. Дистанционное выявление опасных предметов на теле человека	290
Литература к главе 4	293

<b>Глава 5. Теоретические основы радиолокационного выделения сигналов дыхания и сердцебиения</b> . . . . .	296
5.1. Радиолокация живых объектов на основе монохроматического зондирующего сигнала . . . . .	297
5.2. Радиолокация живых объектов на основе видеоимпульсных сигналов . . . . .	302
5.3. Выделение биометрических сигналов на фоне местных предметов в радиолокаторе со ступенчатой частотной модуляцией . . . . .	309
5.4. Математическое моделирование радиолокатора с СЧМ-сигналом при работе внутри помещения . . . . .	318
5.5. Результаты лабораторных экспериментов на макете радиолокатора со ступенчатой частотной модуляцией . . . . .	326
Литература к главе 5 . . . . .	334
<b>Глава 6. Обнаружение неподвижных людей под завалами строительных конструкций с помощью сверхширокополосного радиолокатора</b> . . . . .	337
6.1. Основные особенности задачи обнаружения . . . . .	337
6.2. Выбор параметров зондирующих сигналов . . . . .	338
6.3. Синтез структуры обнаружителя полезных сигналов на фоне отражений от неподвижных окружающих предметов . . . . .	341
6.3.1. Постановка задачи и исходные соотношения . . . . .	341
6.3.2. Пространственная селекция пассивных помех и форма полезного сигнала после когерентного накопления . . . . .	346
6.3.3. Оптимизация обработки после когерентного накопления . . . . .	355
6.4. Анализ полученного алгоритма обнаружения . . . . .	358
6.4.1. Обнаружение сигналов на фоне собственных шумов при отсутствии сглаживания сигнала при когерентном накоплении . . . . .	359
6.4.2. Оптимизация коэффициентов когерентного и некогерентного накопления с учетом сглаживания сигнала при когерентном накоплении . . . . .	366
6.5. Эффективность подавления пассивных помех . . . . .	368
6.6. Максимизация энергетических параметров радиолокаторов с учетом требований электромагнитной совместимости . . . . .	371
6.6.1. Эквивалентная импульсная мощность . . . . .	373
6.6.2. Максимальная импульсная мощность и эквивалентная импульсная мощность, определяемые ограничением пиковой мощности излучения . . . . .	374



6.6.3. Максимальная импульсная мощность излучения, определяемая нормируемой средней мощностью . . . . .	376
6.6.4. Способы увеличения эквивалентной импульсной мощности . . . . .	379
Литература к главе 6 . . . . .	386
Заключение . . . . .	388

*Научное издание*

Авторы:

*Абрамов А.В., Амосова А.И., Анищенко Л.Н., Боголюбов А.С.,  
Бугаев А. С., Васильев И.А., Вязьмитинов И.А., Дудник А.В.,  
Дьяченко А.И., Журавлев А.В., Зайцев А.В., Зиганин Э.Г.,  
Ивашов С.И., Иммореев И.Я., Исайчев С.А., Копылов Ю.А.,  
Миняев В.И., Миняева А.В., Мирошниченко Е.И., Морозов Г.И.,  
Осадчий К.К., Павлов С.Н., Пазынин В.Л., Парашин В.Б.,  
Петушков М.Н., Помозов В.В., Постельга А.Э., Разевиг В.В.,  
Самков С.В., Сиренко К.Ю., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.,  
Солодов Е.В., Сытник О.В., Усанов Д.А., Фесенко М.В.,  
Чапурский В.В., Черненко А.И., Черняк В.С., Шейко А.П.*

## **Биорадиолокация**

Редактор *С.А. Виноградова*  
Художник *Э.Ш. Мурадова*  
Корректор *О.В. Калашникова*  
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*  
Компьютерная верстка *Н.Ф. Бердавцевой*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 17.11.2017. Формат 60×90<sup>1</sup>/16.  
Печ. л. 25,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)  
[www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»  
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.