

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

УДК 621.373.51

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ДВИЖЕНИЯ
ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ДУВХКАНАЛЬНОГО СВЧ-АВТОДИННОГО ГЕНЕРАТОРА

© 2019 г. Ю. В. Ветрова¹, А. А. Дорошенко¹, А. Э. Постельга¹, Д. А. Усанов¹, *

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского,
Российская Федерация, 410012 Саратов, ул. Московская, 155

*E-mail: usanovda@info.sgu.ru

Поступила в редакцию 09.01.2018 г.

После доработки 04.09.2018 г.

Принята к публикации 03.10.2018 г.

Описан способ восстановления формы движения отражателя по сигналу радиоволнового СВЧ-автодинного генератора на диоде Ганна, заключающийся в последовательном излучении и приеме отраженного от объекта электромагнитного СВЧ-сигнала, по двум каналам, которые отличаются электрической длиной, обеспечивающей сдвиг фаз интерференционных сигналов на $\pi/2$. В данной методике отсутствует неоднозначность в определении амплитуды движения отражателя и нет необходимости в определении начальной фазы детектируемого сигнала.

DOI: 10.1134/S0033849419040119

ВВЕДЕНИЕ

Излучение сверхвысокочастотного (СВЧ) и крайневых высокочастотного (КВЧ) диапазона находит применение в диагностике заболеваний и терапии [1, 2]. Одним из таких применений является мониторинг физиологических параметров человека, в частности дыхания и сердцебиения.

В данной работе рассматривается возможность решения проблемы мониторинга дыхания пациента в случае, когда применение контактных сенсоров невозможно или затруднено. В качестве частного примера может послужить реализация контроля дыхания при проведении лучевой терапии у пациентов с онкологическими заболеваниями для обеспечения большей точности подведения дозы ионизирующего излучения в опухоль.

На практике для этих целей широко используется система Real-Time Position Management (RPM), позволяющая в реальном времени отслеживать движение по внешнему сигналу [3, 4]. Однако данная система имеет недостаток, связанный с тем, что необходимо иметь дополнительный источник, в данном случае ИК-излучения, которое отражается от маркеров и детектируется камерой, что конструктивно усложняет установку, кроме того, каждый раз перед началом работы требуется предварительная калибровка системы. В представленном в статье методе эта проблема решена.

Проблеме определения динамических параметров движения внешних отражателей, таких как ам-

плитуда квазигармонических колебаний и их частотного спектра, с применением зондирующего СВЧ-излучения, посвящен ряд работ [2, 5–7]. Однако определение функции, описывающей движение отражателя для случая, когда неизвестно его начальное положение и перемещение может превышать четверть длины волны зондирующего излучения, не проводилось.

Принцип действия ряда устройств для такого мониторинга основан на автодинном эффекте, заключающемся в изменении параметров автоколебаний СВЧ-генератора (амплитуда и мгновенная частота колебаний, составляющие токов, напряжения автосмещения и ряд других), — возникающем при взаимодействии генератора с собственным излучением, отраженным от исследуемого объекта. Эти изменения обычно регистрируются с помощью дополнительных средств выделения автодинного отклика, которые преобразуют их в удобный для последующей обработки вид. Данное научное направление активно развивается рядом научных школ. Следует отметить, что автодинный принцип построения радиолокационных датчиков по сравнению с гетеродинным построением приемо-передающего модуля имеет ряд преимуществ, среди которых — простота конструкции и низкая стоимость датчика. Эти преимущества являются привлекательными, в частности, для широкого применения СВЧ-автодинов в медицинской аппаратуре радиоволнового контроля.

Использование автодинов оптического диапазона для регистрации параметров вибраций внешнего отражателя, описанное, например, в [8], ограничено случаями, в которых амплитуда этих вибраций незначительно превышает длину волны лазерного излучения. Такое ограничение связано с существенными изменениями величины уровня обратной связи при больших амплитудах вибраций, что приводит к специфическим искажениям автодинных сигналов.

В ряде работ описано применение СВЧ-автодинных генераторов в качестве быстродействующих бесконтактных датчиков и измерителей параметров движения [2, 6, 9, 10]. Несмотря на то, что лазерные и СВЧ-автодины имеют общий принцип работы, они сильно разнятся в технической реализации. Значительно большая длина волны СВЧ-излучения по сравнению с лазерным излучением, снимает ограничение по амплитуде вибраций. Однако обычно используемые при этом одноканальные математические методы также не позволяют однозначно восстанавливать функцию движения при превышении амплитуды колебаний объекта четверти длины волны зондирующего СВЧ-излучения и неизвестном значении начальной фазы сигнала.

Для определения функции движения при ее произвольных параметрах предлагалось решение фазовой демодуляции сигнала с использованием квадратурного демодулятора [11].

В данной статье рассмотрена методика, согласно которой для получения квадратурных составляющих предлагается использовать двухканальную схему, в которой автодинные сигналы поступают попеременно в оба канала, отличающиеся только электрической длиной, обеспечивающей сдвиг фаз автодинных сигналов в одном из каналов относительно другого на $\pi/2$, с частотой последовательного переключения каналов на несколько порядков большей, чем частота детектируемых сигналов и существенно меньшей частоты генерируемого СВЧ-сигнала.

В работах [12, 13] показан способ получения квадратурных составляющих для автодинных сигналов при помощи двухдиодного автодина, представляющего собой приемопередающий модуль восьмимиллиметрового диапазона, выполненного на основе двух взаимосинхронизированных генераторов на диодах Ганна, а также схемы блока выделения сигнала в цепи питания диодов Ганна. Представлены результаты измерения параметров двухдиодного автодинного генератора и даны рекомендации по его настройке. Определенные функции, описывающей гармоническое перемещение с амплитудой большей четверти волны зондирующего излучения, осуществляется с помощью фазового дискриминатора. Данный метод обработки применялся для восстановления

гармонического движения, при этом было указано, что решение задачи восстановления сложного движения отражающего объекта требует реализации иного алгоритма. Описанный в данной статье алгоритм является универсальным для любого вида движения отражателя.

Ранее в работе [14], посвященной определению параметров движений объекта с помощью оптического гомодинного метода, была предложена методика восстановления движения объекта с учетом направления движения с использованием интерференционного сигнала и его производной. Эта методика была предложена для реализации в оптическом диапазоне, имеющем описанные выше недостатки. Предлагаемая методика не имеет подобных недостатков из-за особенностей ее реализации.

Таким образом, в данной работе предлагается экспериментальная реализация способа восстановления формы движения отражателя по сигналу радиоволнового СВЧ-автодина с использованием двухканальной схемы.

ВЫДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ДВИЖЕНИЯ ОТРАЖАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ АВТОДИННОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

При движении отражателя зависимость напряжения на детекторе от времени представляется в виде

$$U(t) = A \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right), \quad (1)$$

где A – амплитуда, t – время, θ – начальная фаза сигнала, λ – длина волны излучаемого электромагнитного СВЧ-сигнала, $f(t)$ – функция движения отражателя, $U(t)$ соответствует виду интерференционного сигнала.

Зависимость (1) представляет собой фазомодулированный (ФМ) сигнал с нулевой несущей. Зависимость, аналогичная (1), появляется в ФМ-демодуляторе с квадратурным гетеродином после фильтра низких частот (ФНЧ). Она используется в методике, описанной в [11, 15], в соответствии с которой необходимо получить второй сигнал, сдвинутый по фазе на $\pi/2$ относительно протектированного сигнала, что можно реализовать введением второго канала.

В этом случае интерференционные сигналы в первом и втором каналах представляют соответственно в виде

$$\begin{aligned} A(t) &= A_0 \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right), \\ B(t) &= \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{\lambda} f(t)\right). \end{aligned}$$

Значение амплитуд измеренных сигналов не влияет на конечный результат, поэтому для упро-

щения процесса математической обработки было предложено проводить биполярное нормирование по амплитуде указанных выше сигналов. Нормированный сигнал определяется как:

$$U_0 = \frac{2U - (\max(U) + \min(U))}{\max(U) - \min(U)},$$

где $U_0 \in [-1; +1]$ – нормированное значение сигнала, U , $\max(U)$, $\min(U)$ – текущее, максимальное и минимальное значения сигнала соответственно.

Используя зависимости $A(t)$ и $B(t)$, можно определить полную фазу сигнала:

$$\Phi(t) = \operatorname{arctg}\left(\frac{B(t)}{A(t)}\right).$$

В связи с тем что функция arctg вычисляется в пределах $(-\pi/2, \pi/2)$, значения фазы не могут быть определены однозначно за этими пределами и будут испытывать скачки, поэтому, продифференцировав полную фазу $\Phi(t)$, получим мгновенную частоту:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \operatorname{arctg}\left(\frac{B(t)}{A(t)}\right) = \\ &= \frac{B'(t)A(t) - A'(t)B(t)}{A^2(t) + B^2(t)}, \end{aligned}$$

где $A'(t)$ и $B'(t)$ – производные по времени от $A(t)$ и $B(t)$ в первом и втором каналах соответственно, значения которых определяются методом конечных разностей. Отметим, что после выполнения этой процедуры пропадает необходимость учитывать начальную фазу сигнала θ .

Зависимость полной фазы от времени $\Phi(t)$ может быть определена через решение дифференциального уравнения

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \omega(t)$$

численными методами, например, методом конечных разностей.

Таким образом, функция, описывающая закон движения поверхности объекта, определяется как

$$f(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \Phi(t).$$

По изложенному способу было проведено модельное восстановление формы движения отражателя, совершающего колебания по закону $X(t) = 10\cos(2\pi ft) + 5\cos(5\pi ft)$, где f – частота. При частоте дискретизации сигнала 2 кГц было вычислено среднеквадратичное отклонение восстановленной функции движения относительно изначально заданной, которое составило 0.32 единицы, что относительно амплитуды в 10 единиц составляет ошибку в 3.2%.

Необходимо отметить, что сигнал автодинного генератора может описываться функцией (1) толь-

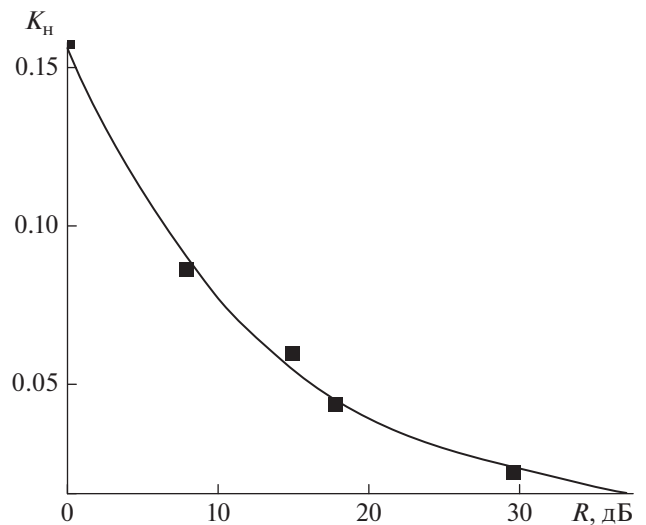


Рис. 1. Зависимость величин КНИ K_H (точки) от коэффициента отражения сигнала R .

ко при малом уровне обратной связи [16], определяемом значениями внутренних параметров генератора и условий, накладываемых на объект измерения. Однако на практике удобно характеризовать уровень обратной связи легко измеряемым коэффициентом отражения. Для определения диапазона коэффициентов отражения, в котором сигнал автодинного генератора имеет синусоидальный вид с минимальными искажениями (т.е. когда возможно применение рассматриваемых интерференционных методик), был построен график зависимости величины коэффициента нелинейных искажений (КНИ) от коэффициента отражения сигнала, рассчитанный по соотношению, приведенному в [17] (рис. 1).

Как следует из полученных результатов, при коэффициенте отражения сигнала 16 дБ и более значение КНИ не превышает 5%, что соответствует искажениям формы синусоидального сигнала, неразличимым визуально [17]. Ограничение по большим ослаблениям отраженного сигнала определяется чувствительностью используемых измерительных приборов и мощностью генератора.

Были определены средние уровни мощности генерируемого и отраженного сигналов при различных положениях человека, находящегося в дальней зоне излучения, относительно рупорной антенны, а также когда волна отражалась от окружающих объектов в отсутствии человека, и определены ослабления отраженного сигнала. Зону излучения рассчитывали по формуле

$$r \geq 2 \frac{D^2}{\lambda}, \quad (2)$$

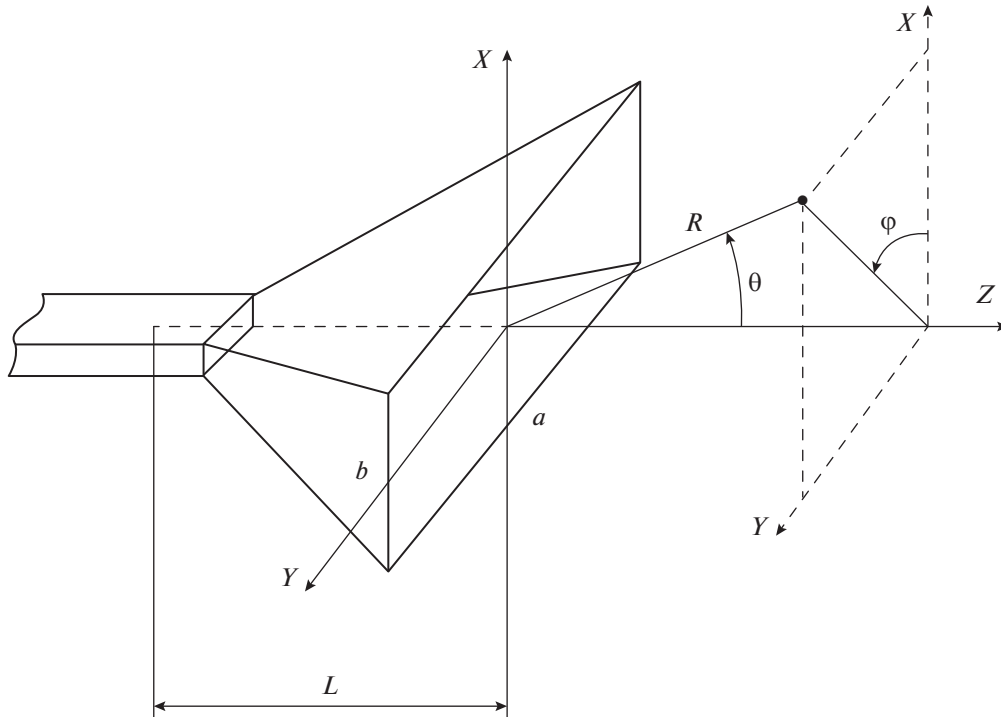


Рис. 2. К расчету ППЭ вблизи пирамидального рупора.

где D – максимальный раскрыв рупора, λ – длина волны в пространстве, равная 23 мм. Для используемой рупорной антенны дальняя зона начиналась с расстояния около 0.5 м.

Из анализа полученных результатов следует, что присутствие человека не оказывает заметного влияния на уровень мощности отраженного сигнала, который в зависимости от наличия различных поглощающих и отражающих объектов в помещении колеблется в пределах 16...33 дБ. Эти значения соответствуют диапазону ослаблений отраженного сигнала, при котором сигнал с автодинного генератора можно считать интерференционным, что позволяет использовать интерференционные методики обработки сигнала.

Плотность потока энергии (ППЭ) сравнивали с действующими на территории Российской Федерации санитарными нормами [18]: для СВЧ при облучении не более 1 часа за один рабочий день ППЭ должна составлять не более 200 мкВт/см². Для пирамидального рупора ППЭ рассчитывали по формуле [19]

$$\Pi = \frac{P}{4\pi R^2} D_p F^2(\theta, \varphi), \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (3)$$

где R – расстояние между пирамидальной рупорной антенной и точкой, в которой измеряется ППЭ, P – мощность, излучаемая антенной, Вт; $F(\theta, \varphi)$ – характеристика направленности рупора (θ и φ – зенитный и азимутальный угол соответ-

ственно), D_p – коэффициент направленного действия рупора (рис. 2).

На расстоянии 40 см до рупора максимальная ППЭ для используемого автодинного генератора составляла не более 30 мкВт/см², что соответствует установленным санитарным нормам.

Эффективность описанной методики была проверена экспериментально на специально созданной установке (рис. 3), в которую входит автодинный генератор АГ на диоде Ганна типа АА703. Генератор был подключен к источнику питания ИП, генерирующему СВЧ-сигнал, который с помощью трехдечибельного направленного ответвителя Отв1 расходился на два параллельных канала. Блок NI ElvisTraditional [20] (ETr) выполнял роль цифро-аналогового преобразователя ЦАП при подаче управляющего напряжения на $p-i-n$ -аттенюаторы Атт. Таким образом, поддерживались равные уровни мощности в обоих каналах и выполнялось поочередное открытие и закрытие каналов с частотой 500 Гц, что при выделении формы колебания отражателя с низкими частотами обеспечивало необходимое разрешение для параллельной записи сигнала с обоих каналов. В одном из каналов при прохождении через фазовращатель tromбонного типа ФВ фаза изменялась относительно другого канала на $\pi/2$. Сигнал с каждого канала через ответвитель Отв2 подводился к рупорной антенне Р, распространялся в пространстве, после отражения от объекта Отр возвращал-

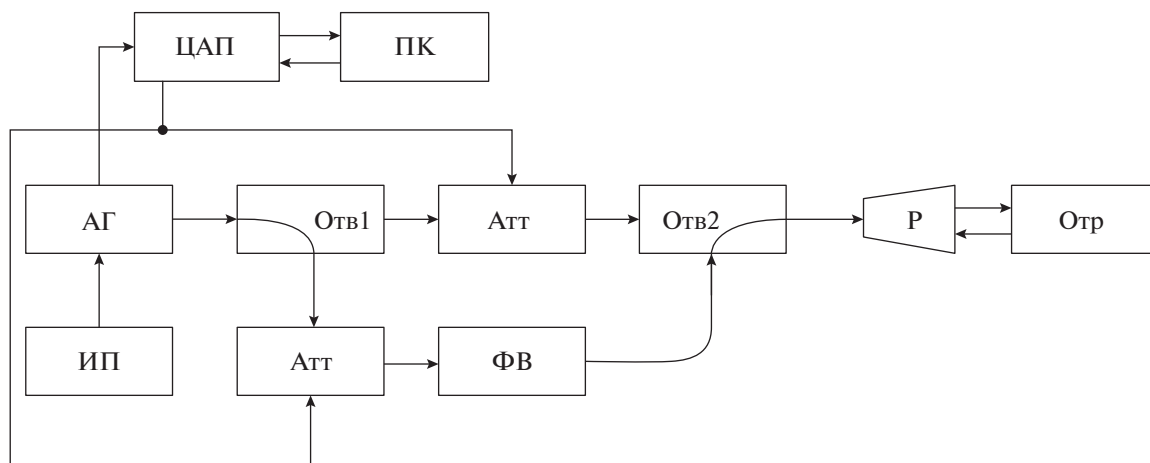


Рис. 3. Блок-схема установки: АГ – автодинный генератор, ИП – источник питания, Атт – $p-i-n$ -аттенюатор, ФВ – фазовращатель, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ПК – персональный компьютер, Отв1 и Отв2 – направленные трехдесибельные ответвители, Р – рупорная антенна, Отр – отражатель сигнала.

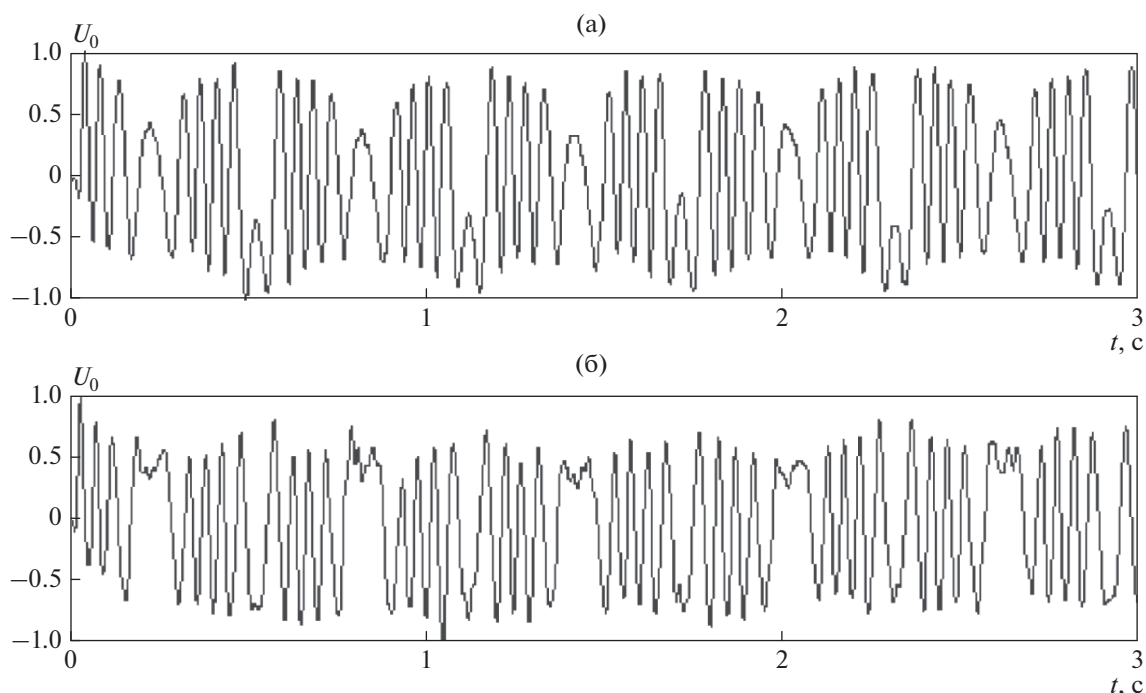


Рис. 4. Зависимости напряжения на детекторе от времени после цифровой фильтрации и нормировки: а – в первом канале $A(t)$, б – во втором канале $B(t)$, U_0 – нормировочный параметр.

ся обратно и детектировался автодинным генератором АГ, сигнал с которого оцифровывался и поступал в персональный компьютер. Таким образом, производилась параллельная регистрация сигналов с двух каналов.

В роли отражателя выступал объект, совершающий движение по гармоническому закону в продольном направлении с частотой 1.7 Гц и амплитудой 3 см, что примерно соответствует случаю, когда измеряют колебательные движения, связанные с дыханием и сердцебиением.

Продетектированные сигналы подвергали интерполяции для получения равномерной дискретизации, чтобы в дальнейшем применить ФНЧ для очистки от шумов. На рис. 4 представлены зависимости напряжения на детекторе от времени после цифровой фильтрации и нормировки. Зависимость мгновенной циклической частоты представлена на рис. 5, результат восстановления – на рис. 6.

Амплитуда колебательных движений, определяемая независимым методом, составила 3 см с точностью 0.5 мм; частота движений 1.7 Гц с точностью

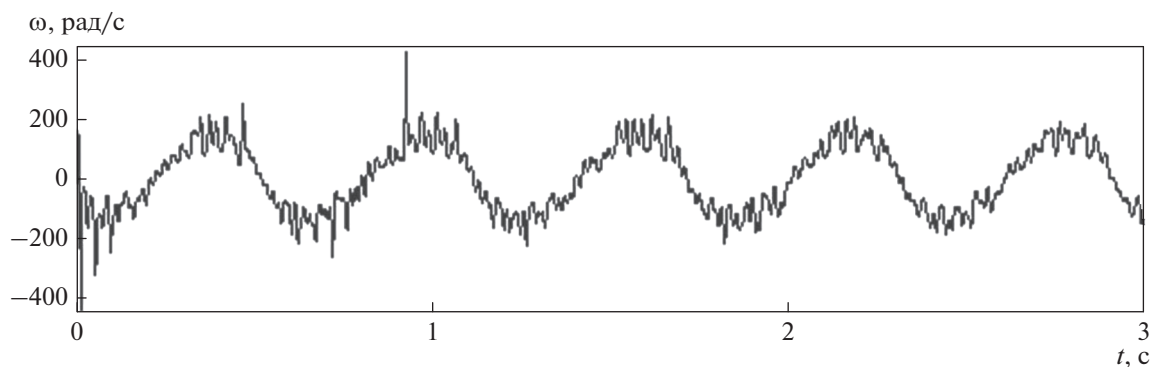


Рис. 5. Зависимость мгновенной циклической частоты сигнала от времени.

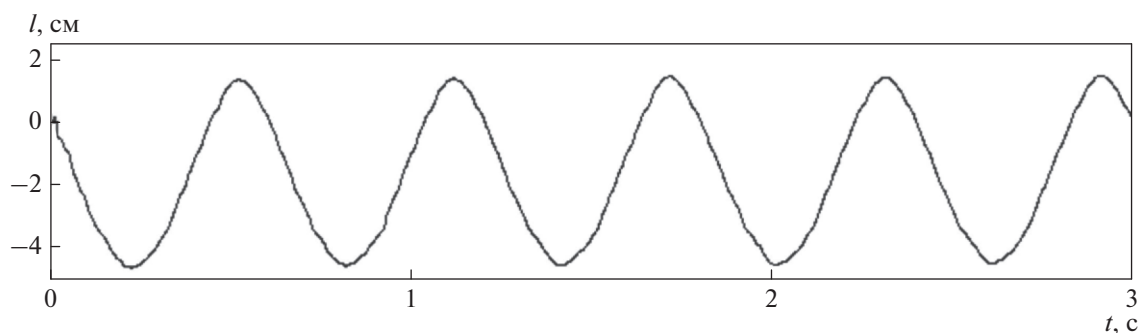


Рис. 6. Зависимость восстановленной функции движения отражателя от времени.

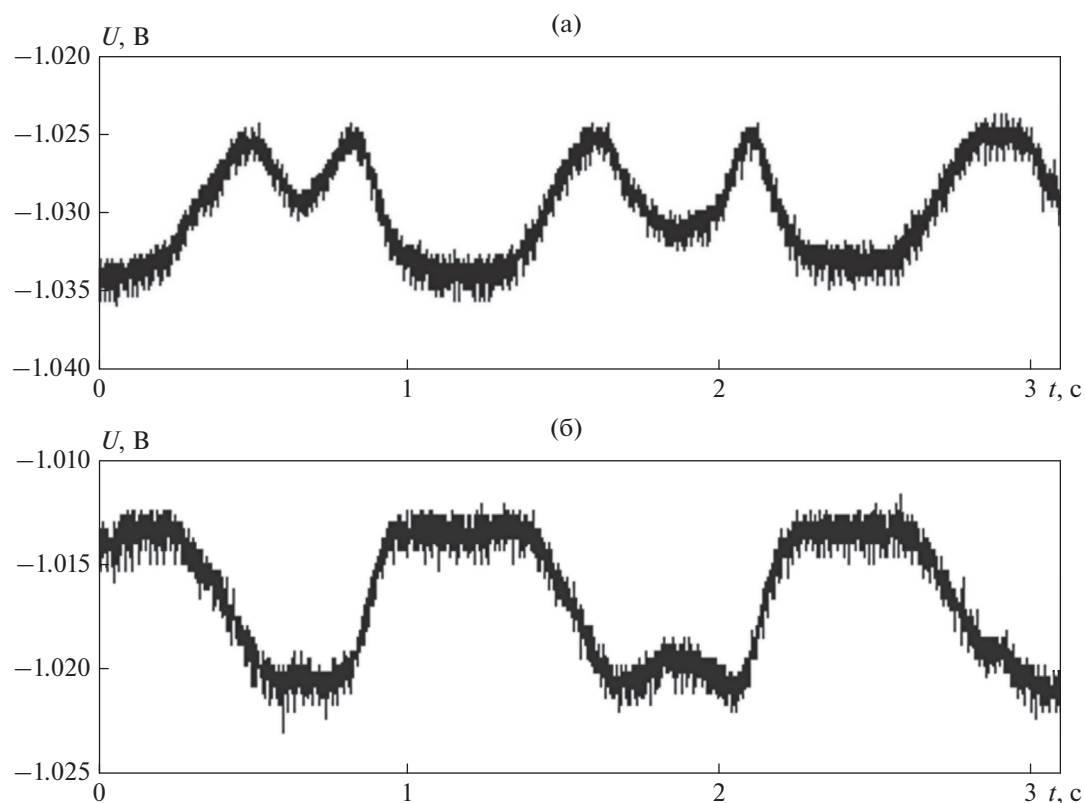


Рис. 7. Зависимости напряжения на детекторе от времени: а - в первом канале $A(t)$, б - во втором канале $B(t)$.

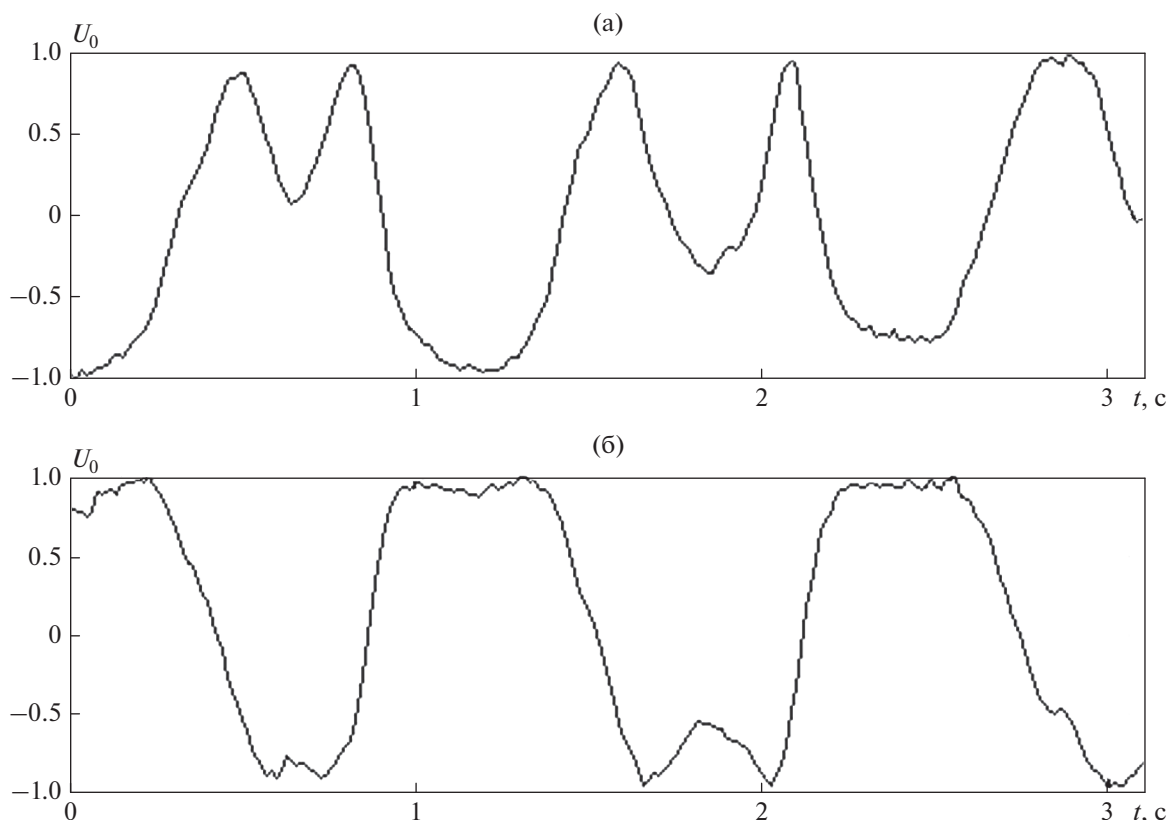


Рис. 8. Зависимости напряжения на детекторе от времени после цифровой фильтрации и нормировки: а – в первом канале $A(t)$, б – во втором канале $B(t)$.

0.05 Гц. Полученное экспериментально значение амплитуды колебаний составляло 3.05 см, частота 1.66 Гц, т.е. ошибка по амплитуде и частоте не превышала 3%.

Для демонстрации эффективности методики проводилось восстановление формы движения участка грудной клетки человека вследствие дыхания и сердцебиения.

На рис. 7 представлены зависимости напряжения на детекторе от времени. Для фильтрации была выбрана функция `decimate` программы

“Matlab”, которая осуществляет процедуру прореживания, в противоположность интерполяции, и понижает частоту дискретизации сигнала [21]. Процесс прореживания сводился к пропуску исходного сигнала через ФНЧ и последующему отбрасыванию лишних отсчетов. По умолчанию функция `decimate` использует ФНЧ Чебышева первого рода восьмого порядка. Для устранения фазовых искажений производилась двунаправленная фильтрация сигнала, так что результирующий порядок фильтра удваивался. Понижение

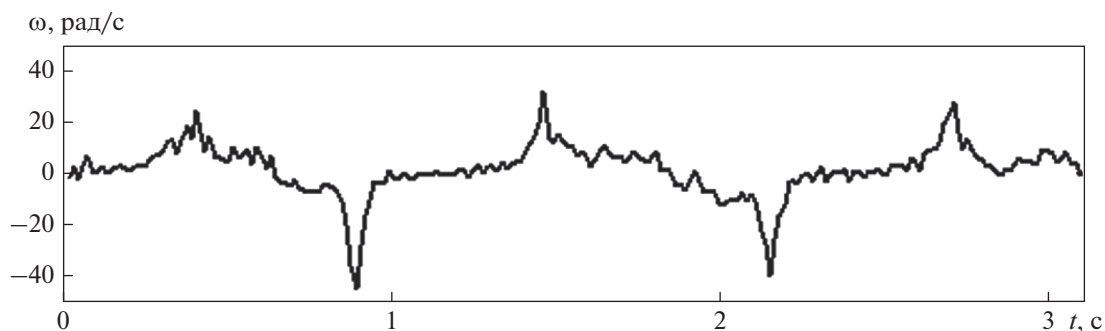


Рис. 9. Зависимость мгновенной циклической частоты сигнала от времени.

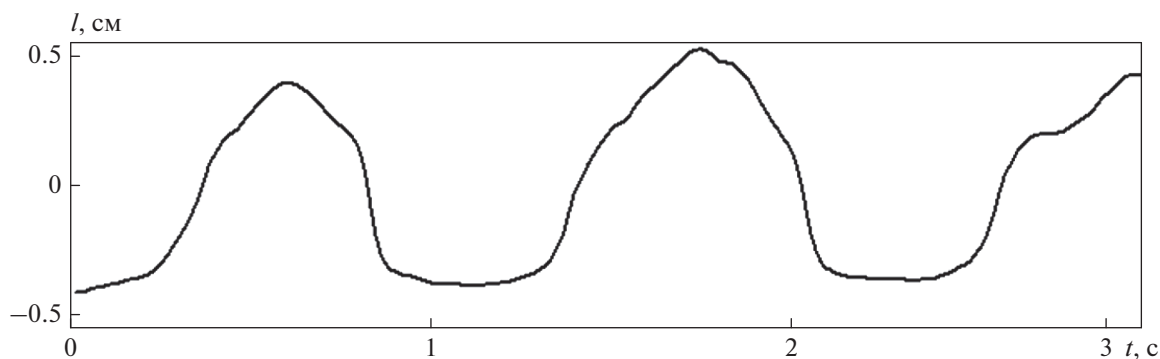


Рис. 10. Зависимость восстановленной функции движения грудной клетки человека от времени в спокойном состоянии.

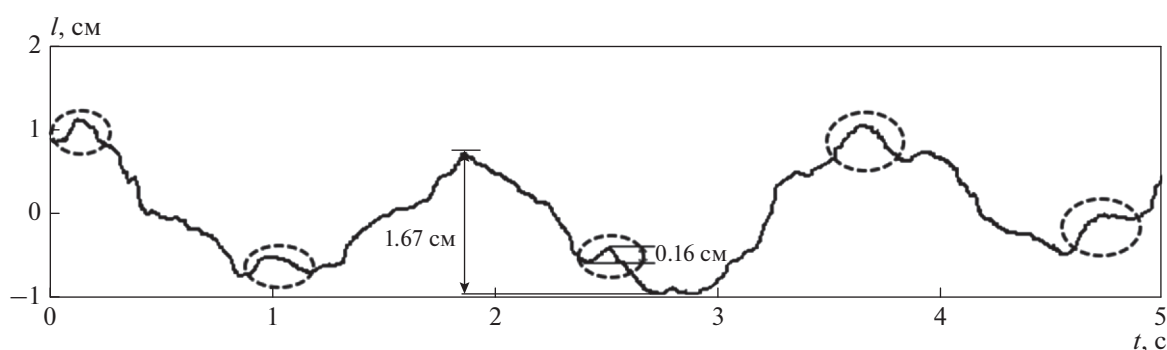


Рис. 11. Зависимость восстановленной функции движения грудной клетки человека после физической нагрузки от времени; пунктиром обозначены участки движения, связанные с пульсовой волной.

частоты дискретизации в восемь-десять раз дало удовлетворительный результат. На рис. 8 представлены зависимости напряжения на детекторе от времени после цифровой фильтрации и нормировки. Зависимость мгновенной циклической частоты представлена на рис. 9, результат восстановления – на рис. 10.

Если измерению сигналов предшествовала физическая нагрузка испытуемого, то амплитуда дыхательных движений могла увеличиться в два-три раза. Колебания участка грудной клетки, характерные для сердцебиений, при этом составляли несколько миллиметров, что на порядок меньше амплитуды колебаний вследствие дыхания. Восстановленная форма для этого случая представлена на рис. 11.

Отметим, что движения участка грудной клетки вследствие дыхания и сердцебиения могут находиться в противофазе, поэтому изменения вследствие сердцебиения могут быть не всегда заметны на графике. Для более подробного изучения таких движений необходимо проводить измерения на различных участках тела человека, а также использовать Фурье или вейвлет-спектральные преобразования [6, 10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлена методика, заключающаяся в последовательном излучении и приеме отраженного от объекта электромагнитного СВЧ-сигнала по двум каналам, отличающимся электрической длиной, обеспечивающей сдвиг фаз интерференционных сигналов на $\pi/2$, и показана возможность восстановления формы движения отражателя по виду СВЧ-автодинного сигнала при превышении амплитуды колебаний объекта четверти длины волны зондирующего излучения и независимо от начальной фазы детектируемого сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бецкий О.В., Лебедева Н.Н., Яременко Ю.Г.* // Радиотехника. 2007. № 3. С. 4.
2. *Абрамов А.В., Амосова А.И., Анищенко Л.Н. и др.* // Биорадиолокация. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 397.
3. *Jeung A. et al.* Method and system for monitoring breathing activity of a subject // Pat. USA 2007/076935.
4. Real-time Position Management™ (RPM) Respiratory Gating [Электронный ресурс]. <https://www.vari->

- an.com/oncology/products/real-time-tracking-motion-management/real-time-position-management-rpm.
5. *Doppler Radar Physiological Sensing* / Ed. Boric-Lubecke O., Lubecke V.M., Droitcour A.D. et al. Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2016.
 6. *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. и др. // Биомед. технологии и радиоэлектроника. 2005. № 11–12. С. 44.*
 7. *Викторов В.А., Лункин Б.В., Совлуков А.С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоатомиздат, 1989.*
 8. *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кацавцев О.Е. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 5. С. 82.*
 9. *Усанов Д.А., Постельга А.Э. // Мед. техника. 2011. № 1. С. 8.*
 10. *Усанов Д.А., Постельга А.Э., Дорошенко А.А. // Мед. физика. 2013. № 1. С. 78.*
 11. *Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и связь, 1986. С. 513.*
 12. *Носков В.Я., Игнатков К.А., Чупахин А.П. // Датчики и системы. 2016. № 6. С. 31.*
 13. *Носков В.Я. // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 4. С. 65.*
 14. *Гангнус С.В., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. // Автометрия. 1999. № 1. С. 31.*
 15. Демодуляция сигналов с угловой модуляцией. РМ и FM демодуляторы. <http://www.dsplib.ru/content/fmdemod/fmdemod.html> (Дата обращения: 01.09.2017).
 16. *Туманов Н.Б., Закарлюк Н.М. // Электрон. Техника. Сер. Электроника СВЧ. 1985. № 10. С. 6.*
 17. *Справочник по радиоэлектронным устройствам. В 2-х т. / Под ред. Линде Д.П. М.: Энергия, 1978.*
 18. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03 “Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов”. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М., 2003.
 19. МУК 4.3.1167-02. Определение плотности потока энергии электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 300 МГц–300 ГГц. М.: Минздрав России, 2002.
 20. National Instruments: тестирование, измерения и встраиваемые системы – National Instruments. <http://www.ni.com/ru-ru.html> (Дата обращения: 01.09.2017).
 21. *Солонина А.И., Арбузов С.М. Цифровая обработка сигналов. Моделирование в MATLAB. СПб.: БХВ-Петербург, 2008.*