



ПРОХОЖДЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ЧЕРЕЗ РАСТВОР, ИМИТИРУЮЩИЙ СРЕДУ ВНУТРИ ТЕЛ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

А. И. Рыжов¹, М. Г. Попов^{1,2}

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7

²Московский физико-технический институт (государственный университет)
141700 Московская область, Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9
E-mail: mef.box@gmail.com, maksim.g.popov@phystech.edu

Поступила в редакцию 18.05.2017

В работе рассматривается вопрос распространения сверхширокополосных хаотических сигналов через среду внутри живых организмов. Данный вопрос приобретает свою актуальность в связи с развитием различных беспроводных медицинских датчиков, собирающих информацию о физиологических параметрах, в том числе малогабаритных искусственных источников радиосвета, которые могут быть эффективно применены для решения задач, например, диагностики заболеваний. Предварительно необходимо исследовать условия распространения сигнала и их влияние на работу различных систем передачи информации. В данной работе впервые проводятся эксперименты по исследованию затухания радиосигнала внутри живых организмов для сверхширокополосных хаотических сигналов, генерируемых непосредственно в полосе частот 3–5 GHz. В качестве источника и приёмника сигнала использовались сверхширокополосные прямоотические приёмопередающие модули. При экспериментальном исследовании скорости затухания сигнала в качестве модельного объекта использовалась кювета с раствором сахара, имитирующая электродинамические параметры среды живого организма. Для оценки затухания измерялись значения амплитуды сигнала на выходе логарифмического детектора приёмника. Эксперименты проводились для случаев, когда кювета была пуста, наполнена сахарным раствором, а также для нескольких вариантов изоляции антенн приёмопередатчиков от попадания на них жидкости. В результате экспериментов были получены зависимости уровня затухания сигнала от расстояния между приёмной и передающей антеннами для вышеупомянутых случаев, которые затем были использованы для вычисления значения показателя затухания сигнала в среде. Исходя из значений излучаемой мощности сигнала и чувствительности приёмника, была оценена максимальная дальность передачи между приёмником и передатчиком в живом организме, на основе чего были оценены возможности использования сверхширокополосных хаотических сигналов этого диапазона частот для передачи данных внутри живых организмов.

Ключевые слова: Нелинейные динамические системы, хаотические сигналы, сверхширокополосный хаотический сигнал, затухание, живые организмы, тело человека.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-4-23-32

Образец цитирования: Рыжов А.И., Попов М.Г. Прохождение микроволновых сверхширокополосных хаотических сигналов через раствор, имитирующий среду внутри тел млекопитающих // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25, № 4. С. 23–32. DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-4-23-32

PROPAGATION OF MICROWAVE ULTRAWIDEBAND CHAOTIC SIGNALS THROUGH THE SOLUTION EMULATING MEDIA WITHIN BODIES OF MAMMALS

A. I. Ryzhov¹, M. G. Popov^{1,2}

¹Kotel'nikov Institute of Radio-Engineering and Electronics
11-7, Mokhovaya, 125009 Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
9, Institutskiy per., 141700 Dolgoprudny, Moscow Region, Russia
E-mail: mef.box@gmail.com, maksim.g.popov@phystech.edu

Received 18.05.2017

The problem of ultrawideband chaotic radio pulse propagation through the media within living organisms is considered in this article. This area gains relevance due to the increase of wireless communications applications in medicine, especially in diagnostics. It is important to research in advance the circumstances of radio signal propagation and their influence upon different wireless communication systems. In this work, the first experiments on measurement of the radio signal attenuation within living organisms for chaotic ultrawideband radio pulses occupying 3–5 GHz frequency domain are considered. Direct chaotic ultrawideband transceiver modules were used as transmitter and receiver. Cuvette filled with an aqueous solution of sucrose that provides electromagnetic characteristics of a living organism was used during the experimental research of a pulse attenuation rate. Signal amplitude on the output of logarithmic detector was measured in order to estimate path loss of the signal. The experiments were conducted when the cuvette was empty and filled with sucrose solution. Besides, different ways of antenna isolation from fluid were considered. Dependencies between path loss and the distance between transceiver antennas were obtained for the cases mentioned above. These results were further used to calculate signal attenuation rate within the medium. Based on the values of transmitter radiated power and receiver sensitivity one can make an estimation of the maximum transmission distance within the human body. These results were used to estimate the possibility of using ultrawideband chaotic signals of this frequency range for data transmission within living organisms.

Keywords: Nonlinear dynamic systems, ultrawideband chaotic signals, attenuation, living organism, human body.

DOI: 10.18500/0869-6632-2017-25-4-23-32

Paper reference: Ryzhov A.I., Popov M.G. Propagation of microwave ultrawideband chaotic signals through the solution emulating media within bodies of mammals. *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2017. Vol. 25. Iss. 4. Pp. 23–32. DOI:10.18500/0869-6632-2017-25-4-23-32

Введение

Задача исследования распространения сверхширокополосных (СШП) хаотических радиоимпульсов внутри тела человека приобретает особую актуальность в связи с развитием различных беспроводных медицинских датчиков, собирающих информацию о физиологических параметрах, в том числе малогабаритных искусственных источников радиосвета [1]. Развитие данного направления позволит решить такие задачи, как создание капсульных эндоскопов, создание микророботов, работающих внутри организма для проведения терапевтических процедур, создание имплантируемых таблеток для точной доставки лекарства.

На сегодняшний момент одним из наиболее актуальных применений техно-

логии беспроводной связи в медицине является капсульная эндоскопия, где, в частности, исследуется состояние желудочного тракта пациента [2]. Существуют реализации беспроводных эндоскопов на основе узкополосных средств связи, однако качество изображения, передаваемого ими, значительно уступает традиционным эндоскопам в связи с ограниченностью пропускной способности радиоканала.

Одно из возможных решений этой проблемы – это переход к использованию в медицине систем связи на СШП сигналах диапазона 1–10 GHz, которые отличаются высокой скоростью передачи данных при малых габаритах и низком энергопотреблении, а также экологической безопасностью. Предварительно необходимо исследовать возможность применимости таких систем, с точки зрения распространения сигнала.

На сегодняшний момент проводились исследования затухания СШП сигнала диапазона 3–5 GHz вблизи поверхности тела человека [3], однако также интерес представляет изучение вопроса распространения СШП сигнала внутри тела человека.

Были проведены симуляции распространения электромагнитных волн с использованием цифровых анатомических моделей. Результаты одной из таких симуляций представлены в работе [4]. Для расстояния 10 см затухание сигнала варьируется от 50 до 80 dB. Большой разброс значений вызван сильной неоднородностью среды, увеличивающейся с ростом расстояния между приёмной и передающей антеннами.

На основе этих результатов были разработаны модели затухания сигнала при его распространении через тело человека. Одним из способов уточнения этих моделей является проведение экспериментов с животными.

Так в статье [5] приведены результаты измерений затухания СШП сигнала диапазона 1–6 GHz при расположении передатчика внутри брюшной полости свиньи, а приёмника на её поверхности. Например, для частоты 1 GHz и расстояния между приёмником и передатчиком 10 см затухание сигнала составило 30–45 dB, а для частоты 4 GHz затухание составило 70–100 dB.

Экспериментальные результаты демонстрируют довольно большой разброс. Однако следует отметить, что, по сути, в этих работах проводились измерения ослабления узкополосного сигнала, перестраиваемого в СШП диапазоне частот. Нам же представляется интересным рассмотрение затухания СШП сигналов в более простой и однородной среде – сахарном растворе, имитирующем, с точки зрения распространения сигнала, среду живого организма. При этом в качестве СШП сигнала используется хаотический сигнал, генерируемый непосредственно в СШП диапазоне частот 3–5 GHz. Указанный диапазон обеспечивается хаотическим генератором, представляющим собой нелинейную динамическую систему.

В работе [6] были исследованы различные растворы, близкие по своим диэлектрическим свойствам к мышечной ткани человека, и было показано, что раствор сахара C12H22O11/1.0 M (342 г на 1 л воды) обладает максимальным сходством для диапазона излучения 3–10 GHz (действительная часть комплексной проницаемости $\epsilon' = 56$, а мнимая $\epsilon'' = 18$ для частоты 4 GHz).

Таким образом, задача настоящей работы – исследовать затухание СШП хаотического сигнала внутри тел млекопитающих на примере среды, имитирующей диэлектрические свойства живого организма (в данном случае сахарного раствора).

1. Экспериментальная установка

Таблица
Характеристики
использовавшихся приёмопередатчиков
Transceiver characteristics

Рабочий диапазон частот Working frequency range	3–5 GHz
Излучаемая мощность Radiated power	20 dBm
Чувствительность приёмника Receiver sensitivity	60 dB
Физическая скорость передачи Physical data transmission rate	Up to 6 Mbit/s

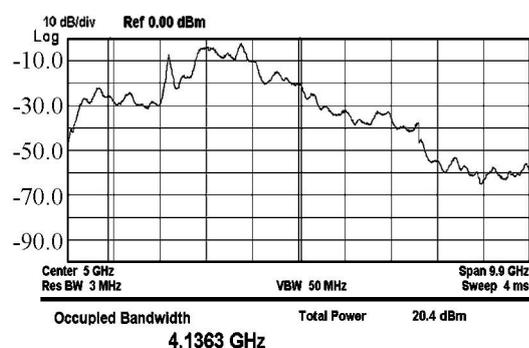


Рис. 1. Спектр сигнала, излучаемого приёмопередатчиком в непрерывном режиме

Fig. 1. Signal spectrum of a continuously radiating transceiver

Для проведения экспериментов в качестве приёмника и передатчика СШП хаотических сигналов использовались СШП прямохаотические приёмопередатывающие модули, разработанные на основе устройств, представленных в работе [7]. Характеристики приёмопередатчиков представлены в таблице.

На рис. 1 показан спектр излучения приёмопередатчика, полученный при помощи анализатора спектра. Приёмопередатчик находился в непрерывном режиме генерации сигнала. Полученный спектр является непрерывным в диапазоне излучения передатчика 3–5 GHz (по уровню -20 dB от максимального значения). Один из приёмопередатчиков настраивался на периодическую посылку хаотических радиоимпульсов, а другой на работу в режиме приёма данных. На рис. 2 показана схема экспериментальной установки для различных случаев расположения приёмопередатчиков.

Антенны подключались через коаксиальные кабели* к приёмопередатчикам и помещались в герметичный сосуд, располагавшийся внутри пустой кюветы.

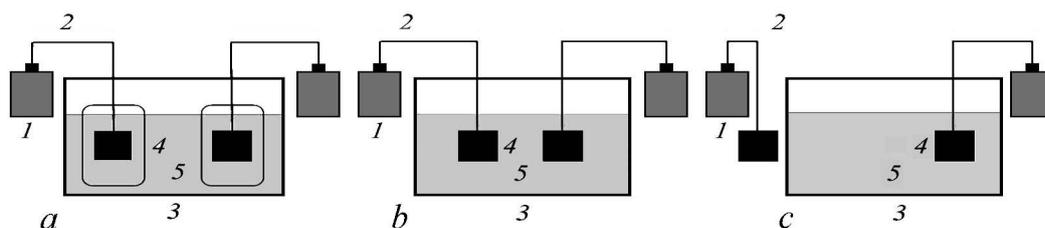


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для случая: *a* – с применением сосудов; *b* – пищевой плёнки; *c* – и приёмной антенны, вынесенной наружу. Здесь: *1* – приёмопередатчик; *2* – коаксиальный кабель; *3* – кювета; *4* – антенна, помещённая в герметичный сосуд; *5* – сахарный раствор

Fig. 2. Experimental setup scheme for different scenarios using: *a* – hermetic vessels, *b* – food film; *c* – and receiver antenna placed outside of the cuvette; *1* – transceiver, *2* – coaxial cable, *3* – cuvette, *4* – antenna in a vessel, *5* – sucrose solution

*Применявшиеся кабели вносили дополнительное затухание сигнала в 13.4 dB, из-за чего использовались приёмопередатчики с повышенной излучаемой мощностью.

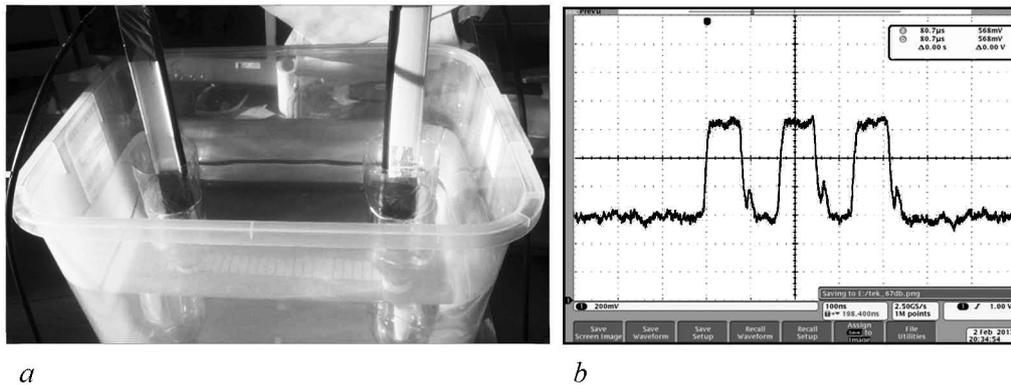


Рис. 3. *a* – расположение антенн приёмопередатчиков внутри кюветы, *b* – измерение амплитуды принимаемого сигнала при помощи осциллографа

Fig. 3. *a* – transceiver antennas placement inside the cuvette, *b* – amplitude measurement of a received signal using oscilloscope

ты или наполненной сахарным раствором $C_{12}H_{22}O_{11}/1.0$ М (рис. 3, *a*). При помощи осциллографа измерялась амплитуда сигнала на выходе логарифмического детектора приёмника в зависимости от расстояния между антеннами приёмника и передатчика (рис. 3, *b*).

2. Методика экспериментов

Измеряя амплитуду сигнала на выходе логарифмического детектора, можно следующим образом оценить затухание сигнала в канале.

Пусть: PL – затухание сигнала на расстоянии d , A_d – амплитуда сигнала на выходе логарифмического детектора приёмника на расстоянии d в некоторой среде, A_B – амплитуда сигнала на выходе логарифмического детектора приёмника на расстоянии 1 м в свободном пространстве, S – чувствительность логарифмического детектора, λ – средняя длина волны излучения передатчика. Затухание в канале оценивается по формуле

$$PL(d) = 20 \lg \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) + \frac{A_B - A_d}{S}. \quad (1)$$

Таким образом, измеряя в эксперименте значения A_d и A_B и подставляя их в формулу (1), можно рассчитывать величину затухания сигнала. В нашем случае первое слагаемое в (1) составляет 42 dB.

С другой стороны, затухание сигнала можно рассчитать по формуле

$$PL(d) = PL_0 + 10\gamma \lg \left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (2)$$

Здесь PL_0 – затухание сигнала на заданном расстоянии d_0 в некоторой среде. В нашем случае $d_0 = 1$ м, средой является сахарный раствор. При помощи графика зависимости $PL(d)$ можно определить PL_0 и показатель затухания γ , построив аппроксимирующую прямую методом наименьших квадратов.

На основании полученных результатов можно оценить максимальную дальность передачи d_{\max} исследуемой системы связи в растворе. Пусть $S_{\text{ПР}}$ – чувствительность приёмника; $P_{\text{ИЗ}}$ – излучаемая мощность. Тогда передача сигнала возможна при выполнении условия

$$P_{\text{ИЗ}} - PL > S_{\text{ПР}}. \quad (3)$$

Далее, зная значения PL_0 и γ , полученные после построения аппроксимирующей прямой для (2), можно определить максимальную дальность передачи d_{\max} .

В работе были проведены две серии экспериментов по исследованию затухания СШП хаотических радиоимпульсов: в воздухе и в вышеупомянутом сахарном растворе.

3. Измерения и результаты

3.1. Исследование затухания сигнала с применением герметичных сосудов. Сначала были проведены эксперименты по оценке затухания СШП хаотического сигнала в соответствии со схемой эксперимента, приведённой на рис. 2, а для случая пустой кюветы. На рис. 4 приведен полученный график затухания сигнала.

Далее была проведена серия экспериментов для исследования затухания СШП хаотических радиоимпульсов при их распространении в сахарном растворе. Для изоляции антенн от попадания на них воды внутри кюветы сначала использовались пластиковые емкости с герметичным дном и открытым верхом, куда помещались сами антенны. На рис. 5 представлен график зависимости затухания сигнала от расстояния между антеннами для этого случая (ему соответствует зависимость 1). Однако полученные результаты расходятся с результатами, известными из существующих исследований. Так в работе [8] для диапазона частот 3.1–3.6 GHz затухания в

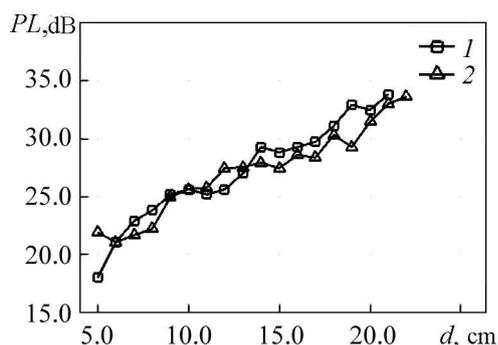


Рис. 4. Затухание сигнала в воздухе в зависимости от расстояния между антеннами, 1 – первая серия экспериментов, 2 – вторая серия экспериментов

Fig. 4. Path loss in the air depending on the distance between the transceiver antennas, 1 – first series of experiments, 2 – second series of experiments

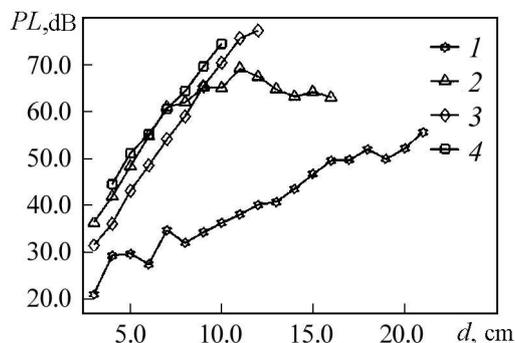


Рис. 5. Затухание принятого сигнала в сахарном растворе в зависимости от расстояния между антеннами: 1 – антенны помещены в сосуды, 2 – над поверхностью сахарного раствора расположен поглотитель, 3 – антенны обёрнуты пищевой плёнкой, 4 – приёмная антенна расположена снаружи кюветы

Fig. 5. Path loss in the sucrose solution depending on the distance between the transceiver antennas, 1 – antennas are put into vessels, 2 – absorber is placed above the sucrose solution surface, 3 – antennas are covered with food film, 4 – receiver antenna is placed outside the cuvette

сахарном растворе на расстоянии 10 см составило 70 дВ, в то время как из графика на рис. 5 следует, что затухание составило 36 дВ.

Было сделано предположение, что часть излучения распространяется не через сахарный раствор, а через воздушную среду над поверхностью раствора, проникая туда через отверстия в сосудах. Для проверки этой версии и уменьшения вклада переотражённой компоненты над поверхностью сахарного раствора рядом с излучающей антенной был установлен лист поглотителя. Результаты этого эксперимента отмечены линией 2 на рис. 5. Здесь уже на расстоянии 10 см затухание составило 65 дВ. Однако при увеличении расстояния с 10 до 15 см затухание сигнала перестало усиливаться, что говорит о том, что основной вклад в принимаемую мощность сигнала на этих дистанциях вносили переотражённые лучи, распространявшиеся в обход поглотителя.

Поэтому были предприняты специальные меры для исключения влияния на принимаемую мощность излучения, проникающего наружу сахарного раствора через отверстия в сосудах.

3.2. Исследование затухания сигнала с применением пищевой плёнки.

Для изолирования приёмной и передающей антенн от попадания на них воды, они обе были обернуты непроводящей пищевой плёнкой. Схема эксперимента представлена на рис. 2, *b*.

При помощи анализатора спектра был измерен уровень сигнала над поверхностью сахарного раствора, и он оказался на низком уровне для того, чтобы влиять на результаты эксперимента.

Результаты измерений приведены на рис. 5 и отмечены линией 3. Сравнивая полученные результаты с результатами из предыдущего эксперимента (где для антенн использовались сосуды и лист поглотителя) можно наблюдать практически идентичную динамику ослабления сигнала с ростом расстояния примерно до 10 см, где в случае с сосудами затухание составило 65 дВ и 70 дВ в случае с пищевой плёнкой. Однако в предыдущем эксперименте после расстояний выше 10 см мощность принятого сигнала выходила на уровень насыщения и переставала ослабляться с ростом расстояния, в то время как в эксперименте с пищевой плёнкой ослабление сигнала продолжало расти и составило 77 дВ на расстоянии 12 см. Это говорит о том, что во втором случае удалось устранить влияние побочных лучей на распространение сигнала.

Для проверки корректности полученные результаты были сопоставлены с данными для узкополосных сигналов в том же диапазоне, имеющимися в литературе. Так на рис. 6 приведено сравнение полученных результатов для СШП хаотических сигналов (линия 1) с результатами работы [8] для диапазона 3.1–3.6 GHz

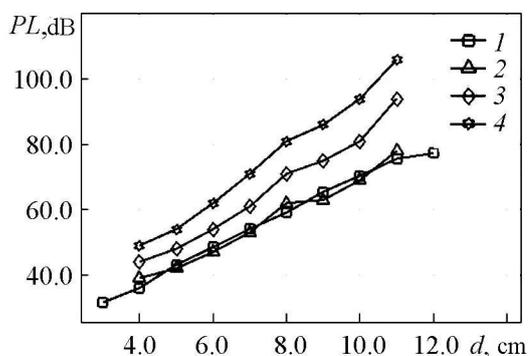


Рис. 6. Сравнение затухания СШП хаотических сигналов диапазона 3–5 GHz (линия 1) с результатами работы [8]: 2 – диапазон от 3.1 до 3.6 GHz, 3 – диапазон от 3.6 до 4.1 GHz, 4 – диапазон от 4.1 до 4.6 GHz

Fig. 6. Comparison of UWB chaotic signal (3–5 GHz) attenuation in sucrose solution (1) and results presented in [8]: 2 – from 3.1 to 3.6 GHz, 3 – from 3.6 to 4.1 GHz and 4 – from 4.1 to 4.6 GHz

(линия 2), для диапазона 3.6–4.1 GHz (линия 3), для диапазона 4.1–4.6 GHz (линия 4).

Результаты нашей работы и работы [8] не противоречат друг другу: основная доля излучения СШП хаотического сигнала находится в диапазоне частот 3–4 GHz, и график затухания сигнала 1 находится непосредственно рядом с графиками затухания узкополосных сигналов 2 и 3 для диапазона частот 3.1–3.6 GHz и 3.6–4.1 GHz, соответственно.

На практике важным сценарием применения системы передачи может быть передача данных внутри живого организма наружу. Следующая серия экспериментов была посвящена данному вопросу.

3.3. Исследование затухания сигнала при расположении приёмной антенны снаружи кюветы. Были проведены эксперименты с приёмной антенной, вынесенной наружу кюветы (см. рис. 2, с).

Результаты измерений представлены на рис. 5 (линия 4). В данном случае наблюдаемая динамика изменения затухания сигнала с расстоянием сходна с аналогичными результатами предыдущего эксперимента, однако, здесь все значения немного ниже (в среднем на 4 dB), что связано с наличием раздела сред на пути распространения сигнала.

Затем для расчёта затухания сигнала PL_0 на расстоянии в 1 m и показателя затухания сигнала γ в соответствии с методикой были построены графики затухания сигнала в зависимости от расстояния между приёмными и передающими антеннами в логарифмическом масштабе (их линейные области) и аппроксимирующие прямые для каждой серии вышеупомянутых экспериментов. В среднем получено, что для воздуха $PL_0 = 46$ dB и $\gamma = 2$, а для сахарного раствора $PL_0 = 150$ dB и $\gamma = 8$.

Для использовавшихся в эксперименте приёмопередатчиков, излучаемой мощности dBm и чувствительности приемника dBm по формулам (2) и (3) можно определить максимальную дальность передачи d_{\max} . Вычисления показали, что условие обеспечения достаточного уровня сигнала для осуществления радиосвязи выполняется при $PL < 80$ dB. Далее используем полученные выше из графических построений значения PL_0 и γ в двух вариантах эксперимента: в эксперименте с приёмной и передающей антеннами, обернутыми пищевой плёнкой и помещёнными в сахарный раствор, получили $d_{\max} = 13$ cm; в эксперименте с расположенной приёмной антенной снаружи кюветы получили $d_{\max} = 12$ cm.

Заключение

В работе исследован вопрос затухания СШП хаотических сигналов внутри среды живых организмов. Для имитации диэлектрических характеристик такой среды использовалась кювета с раствором сахара.

Получено, что для СШП хаотических сигналов диапазона 3–5 GHz затухание сигнала на расстоянии 10 cm в сахарном растворе составляет 70–75 dB, а показатель затухание в такой среде $\gamma = 8$.

С помощью значений мощности излучаемого сигнала и чувствительности приёмника использованных приёмопередатчиков была оценена максимальная дальность передачи в живом организме, которая составила около 12 cm.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что СШП хаотические сиг-

налы в диапазоне частот 3–5 GHz могут быть использованы, в частности, в беспроводной эндоскопии. Капсула-робот с использованием СШП прямохаотического излучения может быть реализована в виде миниатюрного источника шумоподобного СШП излучения – «радиосвета», прохождение которого через внутренние органы и мышечную ткань будет давать ценную информацию об их состоянии.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-00084).

Библиографический список

1. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В.* Источники радиоосвещения на основе сверхширокополосных микрогенераторов хаотических колебаний // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42, № 24. С. 49–57.
2. *Thothahewa K., Redoute J.-M., Yuce M.R.* A UWB wireless capsule endoscopy device // Proc. 36th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC). Chicago. IL. 2014. Pp. 6977–6980.
3. *Рыжов А.И., Попов М.Г.* Распространение сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов около поверхности и от внутренних органов к поверхности тела человека // Труды 26-й между. Крымской конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. Севастополь, Россия, 4–10 сентября 2016. С. 1811–1817.
4. *Khaleghi A., Chávez-Santiago R., Balasingham I.* Ultra-wideband statistical propagation channel model for implant sensors in the human chest // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2011. Vol. 5, Iss. 15. Pp. 1805–1812.
5. *Chavez-Santiago R., Sayrafiyan-Por K., Khaleghi A., Takizawa K. et al.* Propagation models for IEEE 802.15.6 standardization of implant communication in body area networks // IEEE Communications Magazine. 2013. Vol.51, Iss. 4. Pp. 80–87.
6. *Yamamoto H., Zhou J., and Kobayashi T.* Ultra wideband electromagnetic phantoms for antennas and propagation studies // IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 2008. Vol. E91-A, Iss. 11. Pp. 3173–3182.
7. *Дмитриев А.С., Герасимов М.Ю., Ицков В.В., Лазарев В.А., Попов М.Г., Рыжов А.И.* Активные беспроводные сверхширокополосные сети на основе хаотических радиоимпульсов // Радиотехника и электроника. 2017. Т. 62, № 4. С. 354–363.
8. *Chávez-Santiago R., Garcia-Pardo C., Fornes-Leal A., Vallés-Lluch A. et al.* Ultra wideband propagation for future in-body sensor networks // Proc. IEEE 25th Intl. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Washington. DC. 2–5 Sept., 2014. Pp. 2160–2163.

References

1. *Dmitriev A.S., Efremova E.V.* Radio-frequency illumination sources based on ultra-wideband microgenerators of chaotic oscillations. *Technical Physics Letters*. 2016. Vol. 43, No. 1. Pp. 42–45.

2. Thotahewa K., Redoute J.-M., Yuce M.R. A UWB wireless capsule endoscopy device. *Proc. 36th Annual Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC)*. Chicago, IL. 2014. Pp. 6977–6980.
3. Ryzhov A.I., Popov M.G. Propagation of ultrawideband chaotic radio pulses near the human body surface and from the inside of the human organs to the human body surface. *Proc. 26th International Crimean Conference «Microwave and Telecommunication Technology» (CriMiCo)*. Sevastopol, Russia, 4–10 Sept., 2016. Pp. 1811–1817.
4. Khaleghi A., Chávez-Santiago R., Balasingham I. Ultra-wideband statistical propagation channel model for implant sensors in the human chest. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. 2011. Vol. 5, No. 15. Pp. 1805–1812.
5. Chavez-Santiago R., Sayrafian-Por K., Khaleghi A., Takizawa K. et al. Propagation models for IEEE 802.15.6 standardization of implant communication in body area networks. *IEEE Communications Magazine*. 2013. Vol.51, No. 4. Pp. 80–87.
6. Yamamoto H., Zhou J., and Kobayashi T. Ultra wideband electromagnetic phantoms for antennas and propagation studies. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*. 2008. Vol. E91-A, No. 11. Pp. 3173–3182.
7. Dmitriev A.S., Gerasimov M.Yu., Itskov V.V., Lazarev V.A., Popov M.G., Ryzhov A.I. Active wireless ultrawideband networks based on chaotic radio pulses. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017. Vol. 62, No. 4. Pp. 380–388.
8. Chávez-Santiago R., Garcia-Pardo C., Fornes-Leal A., Vallés-Lluch A. et al. Ultra wideband propagation for future in-body sensor networks. *Proc. IEEE 25th Intl. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. Washington, DC. 2–5 Sept., 2014. Pp. 2160–2163.



Рыжов Антон Игоревич – родился (1986) в Москве, Россия. Окончил Московский физико-технический институт (2010). Защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук в области радиофизики (2016). Научный сотрудник лаборатории информационных и коммуникационных технологий на основе динамического хаоса в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва. Автор более 20 публикаций (в соавторстве).

125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7
 Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
 E-mail: mef.box@gmail.com



Попов Максим Геннадьевич – родился в 1991 году. Окончил факультет радиотехники и кибернетики Московского физико-технического института. Аспирант Московского физико-технического института, инженер лаборатории информационных и коммуникационных технологий на основе динамического хаоса в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Область научных интересов: беспроводные сенсорные и информационные сети, коммуникационные технологии. Автор более 10 публикаций (в соавторстве).

125009 Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7
 Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
 141700 Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9
 Московский физико-технический институт (государственный университет)
 E-mail: maksim.g.popov@phystech.edu