

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКУСТОЭЛЕКТРОННЫХ КОНВОЛЬВЕРОВ НА СНИЖЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ АСИНХРОННОГО РАДИОПРИЕМА ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

© 2014 г. Ю. Б. Синклер¹, В. В. Проклов², В. И. Григорьевский², О. А. Бышевский-Конопко²,
В. Н. Курский¹, Е. М. Кораблев²

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

²Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 141190 Фрязино, Московской обл., пл. Введенского, 1

E-mail: byshevski@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 07.12.2011 г.

Предложен метод сравнения помехоустойчивости асинхронного радиоприема широкополосных сигналов при использовании конвольвера на поверхностных акустических волнах, разработанного по существующей в России акустоэлектронной технологии, с помехоустойчивостью идеального корреляционного радиоприемника. Метод продемонстрирован на примере оценивания снижения помехоустойчивости радиоприема вследствие отражений акустических волн от встречно-штыревых преобразователей и неровностей звукопровода.

DOI: 10.7868/S003384941404010X

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена проблеме применения и развития теории потенциальной помехоустойчивости В.А. Котельникова [1, 2] в направлении оптимизации электронной элементной базы радиоприемников, которая является продолжением исследований [3]. В указанной работе рассмотрены вопросы оптимизации по критерию помехоустойчивости конвольверов на поверхностных акустических волнах (ПАВ), предназначенных для использования в системах сотовой связи CDMA в режиме траффика. Важной особенностью использования ПАВ-конвольверов для корреляционной обработки широкополосных сигналов (ШПС) в режиме траффика является упрощение технических требований к точности синхронизации по сравнению с техническими требованиями к точности синхронизации, предъявляемыми к системам сотовой связи на базе цифровой микроЭлектроники.

В данной работе исследуются вопросы, связанные с оптимизацией электронной элементной базы радиоприемника с позиций качества процесса установления радиосоединения. Сложность точного решения оптимизационной задачи состоит в том, что радиоприем ШПС проводится в асинхронном режиме, когда поступающий на решающее устройство выходной сигнал конвольвера представляет собой не дискретный отсчет, а

непрерывную временную функцию большой длительности, наблюдаемую на выходе конвольвера при прогоне опорного сигнала конвольвера по всей длине звукопровода.

В первом разделе статьи рассматривается вопрос выбора и обоснования такой маломерной решающей статистики, при использовании которой снижение помехоустойчивости асинхронного радиоприема ШПС будет несущественным по сравнению с оптимальным приемником.

Отметим, что исследование степени приближения помехоустойчивости к своему потенциальному значению предполагается проводить раздельно по каждому из видов технологических недовершенств ПАВ-конвольвера, связанных с различными вредными физическими эффектами:

1) с отражением акустических волн от ВШП и неоднородностей звукопровода;

2) с эффектом “самосвертки”, при котором на текущем интервале корреляционной обработки проявляются сигналы от предыдущего интервала;

3) с эффектом ослабления выходного сигнала ПАВ-конвольвера, связанным с малой величиной билинейного коэффициента материала подложки ПАВ-конвольвера.

В данной работе ограничимся исследованием первого вида недовершенств.

1. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ АКУСТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЫ РАДИОПРИЕМНИКОВ ПО КРИТЕРИЮ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

В данном разделе будут сформулированы принятые в статье принципы оптимизации технологии конволверов на ПАВ, предназначенных для асинхронного радиоприема ШПС.

На каждом этапе развития электронной технологии одной из важных задач методологии оптимизации элементной базы радиоприемника является задача оценивания вклада факторов, не позволяющих помехоустойчивости радиоприемника приблизиться к потенциально достижимой величине.

В работе [3] были рассмотрены три особенности технологии радиоприемника, использующего конволверы на ПАВ:

- а) конструктивные особенности ВШП,
- б) отражения акустических волн от ВШП и других неоднородностей звукопровода,
- в) физико-химические свойства материала звукопровода, от которых зависит степень ослабления сигнала в ПАВ-конволвере.

Варьируемым при решении оптимизационной задачи объектом в [3] был алгоритм выработки информационного решения по наблюдаемому на выходе ПАВ-конволвера значению выходного сигнала $F_3(t)$ во временной точке $t = 0$. Это было основано на предположении, что в радиоприемнике имеется вспомогательная система, осуществляющая точную синхронизацию передатчика и приемника.

Заметим, что проблема синхронизации играет важную роль в современных системах радиосвязи и может оказывать существенное негативное влияние на качество передачи информации [4].

Важной особенностью конволверов на ПАВ является способ приема информации в асинхронном режиме, когда момент времени прихода ожидаемого сигнала известен неточно, а в широком классе условий радиоприема вообще неизвестен. Корреляционный радиоприем методом встречных акустических волн в таких условиях позволяет создать устойчивую к ошибкам синхронизацию систему связи.

В общем случае при точной синхронизации достаточной решающей статистикой выходного сигнала является двумерное значение выходного сигнала.

$$F_3(0) = \operatorname{Re} F_3(0) + j \operatorname{Im} F_3(0).$$

Асинхронный радиоприем соответствует случаю многомерной решающей статистики, так как для выработки оптимального информационного решения необходимо учитывать всю функцию $F_3(t)$ на интервале наблюдения: от момента входа

опорного сигнала в интегрирующий электрод (ИЭ) до достижения опорным сигналом противоположного конца ИЭ. Но оптимальная обработка всей функции $F_3(t)$ в реальном времени трудно выполнима. Поэтому был предпринят поиск таких маломерных решающих статистик, для которых результаты решения оптимизационной задачи давали хотя бы на гауссовских моделях оптимизационные аналитические решения при многомерной решающей статистике, близкие по помехоустойчивости к помехоустойчивости приемника при маломерной решающей статистике.

Под терминами “многомерная и маломерная решающие статистики” подразумеваются способы принятия решения о наличии или отсутствии сигнала по максимально возможному или существенно ограниченному числу временных выборок выходного сигнала. Под термином “оптимальная обработка всей функции” имеется в виду способ принятия решений, приводящий к минимальной ошибке обнаружения сигнала.

A. Аппроксимационная гауссовская модель выходного сигнала ПАВ-коррелятора для сравнения помехоустойчивости радиоприема синхросигнала при оптимальной многомерной и близкой к ней по помехоустойчивости одномерной решающих статистиках

В данной работе принята следующая дискретная идеализированная математическая модель гауссова характера. Имеется K временных точек $t_i = t_1, \dots, t_K$, равноотстоящих друг от друга на величину Δt , равную $1/6\dots1/2$ от длительности элемента ШПС с базой BT (примем условие $\Delta t < 1/2B$). При отсутствии сигнала (гипотеза H_0) амплитуда наблюдаемого выходного сигнала r_i в K точках подчиняется рэлеевскому закону распределения вероятностей:

$$W_i(r_i | H_0) = \frac{r_i}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_i^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

Наблюдаемый выходной сигнал в данном случае представляет собой модуль комплексной огибающей узкополосного процесса.

При наличии сигнала (гипотеза H_1) амплитуда наблюдаемого сигнала в одной точке t_q (равновероятно для любой из K точек) подчиняется обобщенному рэлеевскому распределению, иногда называемому в литературе распределением Рэлея–Райса:

$$W_q(r_q | H_1) = \frac{r_q}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{r_q^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{Ar_q}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

где $I_0(z)$ – функция Бесселя от минимого аргумента. В остальных $K - 1$ точках амплитуда наблюдаемого

сигнала подчиняется закону (1). Здесь параметр A характеризует амплитуду автокорреляционного пика сигнала, а параметр σ – среднеквадратичное отклонение наблюдаемого выходного шума. Величину $20\log(A/\sigma)$ будем называть отношением сигнал/шум (ОСШ) на выходе приемника. При известных параметрах A и σ оптимальный алгоритм различения гипотез о наличии или отсутствии сигнала по наблюдаемому вектору отсчетов выходного сигнала r_1, \dots, r_K состоит в операции вычисления отношения правдоподобия, обозначаемого символом L , и в сравнении L с некоторым порогом C . Для рассматриваемой задачи отношение правдоподобия равно

$$L(r_1, \dots, r_K) = \frac{1}{K} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right) \sum_{i=1}^K I_0\left(\frac{Ar_i}{\sigma^2}\right). \quad (3)$$

Методом многократного (порядка 10^6 и более случайных реализаций) компьютерного моделирования величин q , имитирующих при наличии сигнала (гипотеза H_1) случайные задержки автокорреляционного пика на выходе асинхронного корреляционного радиоприемника, и при каждой реализации задержки q методом имитации K -мерных векторов r_1, \dots, r_K , построены две гистограммы значений отношения правдоподобия L : при наличии и отсутствии сигнала. По этим гистограммам построена рабочая характеристика оптимального приемника, пример которой представлен на рис. 1 для случая асинхронного радиоприема ШПС с базой $BT = 256$. Здесь α – вероятность того, что при отсутствии сигнала принимается решение о его присутствии, β – вероятность пропуска сигнала. В этом примере $A = 10$, $\sigma = 2$.

Реализация радиоприемника с решающим устройством, осуществляющим после каждого прохождения опорного звукового сигнала вдоль звукопровода конвольвера операцию вычисления отношения правдоподобия L , практически невозможна.

Поиск возможных решающих устройств, вполне реализуемых в отношении сложности исполнения и имеющих рабочие характеристики обнаружения, близкие к рабочим характеристикам оптимального приемника, показал, что данным условиям удовлетворяет одномерная решающая статистика – максимальная амплитуда выходного сигнала конвольвера r_{\max} . При моделировании величина r_{\max} определяется как максимальное значение из компонент вектора r_1, \dots, r_K . Рабочая характеристика обнаружения, полученная при моделировании в случае использования в качестве решающей статистики максимальной амплитуды выходного сигнала приемника (т.е. для определения величины r_{\max} предполагается использовать

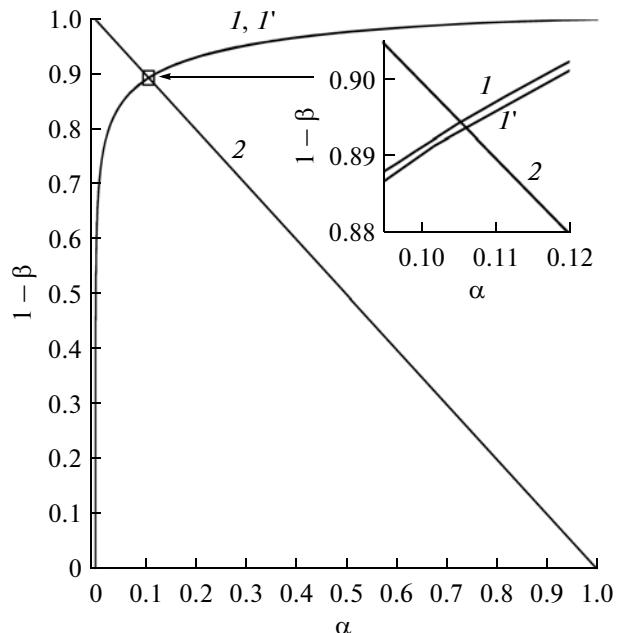


Рис. 1. Рабочие характеристики оптимального (кривая 1) и подоптимального (кривая 1') приемников для гауссовой аппроксимационной модели с параметрами $BT = 256$, $A = 10$, $\sigma = 2$. Прямая 2 соответствует уравнению $\alpha + \beta = 1$. На вставке показана область пересечения в увеличенном масштабе.

пиковое детектирование), представлена на рис. 1 кривой 1' (для тех же значений A и σ).

Для рабочих характеристик оптимального и подоптимального приемника, приведенных на рис. 1, выходное ОСШ составило $20\log(A/\sigma) = -13.98$ дБ. Путем варьирования величины A было найдено, что при $\sigma = 2$ и $A = 10.012$ местоположение рабочей характеристики подоптимального приемника совпадет с кривой 1, соответствующей оптимальному приемнику. При этом разница значений выходных ОСШ составит ~ 0.01 дБ. Таким образом, сравнение рабочих характеристик подоптимального приемника, основанного на измерении максимального пика амплитуды выходного сигнала, с рабочими характеристиками оптимального приемника, полученными при использовании в качестве решающей статистики функции правдоподобия при помощи идеализированной математической модели гауссова характера, позволяет оценить потери в ОСШ и сделать вывод о целесообразности использования максимального пика амплитуды выходного сигнала в качестве решающей статистики при более широком классе сигнально-помеховых особенностей асинхронного корреляционного радиоприема. Этот способ оценивания близости подоптимального приемника к оптимальному будет рассмотрен далее применительно к асинхронно-

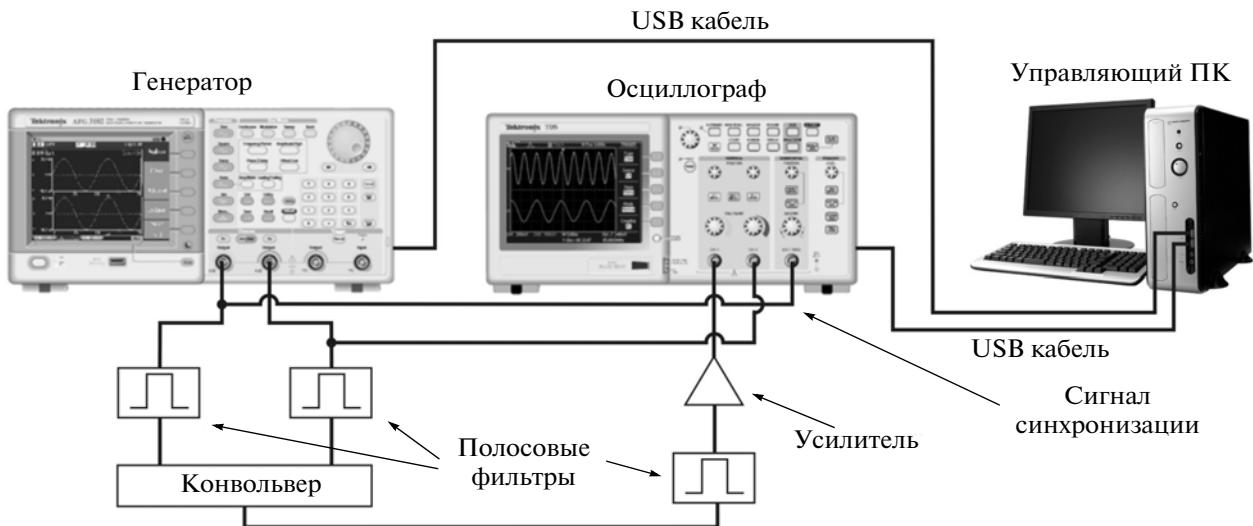


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной автоматизированной установки для измерения ДПХ.

му радиоприему на базе реального лабораторного образца акустоэлектронного конвольвера.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНОЙ ПЕРЕХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЗИЧЕСКОГО ОБРАЗЦА ПАВ-КОНВОЛЬВЕРА

В данной работе было проведено экспериментальное исследование физического образца прототипа ПАВ-конвольвера, предназначенного для корреляционной и спектральной обработки сложных сигналов. Акустоэлектронный ПАВ-конвольвер осуществляет операцию свертки сложных ограниченных во времени сигналов с опорным сигналом при их кодовом разделении в реальном масштабе времени. Основной характеристикой конвольвера, который представляет собой билинейное акустическое устройство, является, так называемая двухчастотная переходная характеристика (ДПХ) [5].

Основные элементы разработанной экспериментальной автоматизированной установки для измерения ДПХ составляют двухканальный цифровой генератор сигналов произвольной формы Tektronix AFG3102 (максимальная частота генерируемых сигналов в непрерывном режиме 100 МГц) и двухканальный цифровой осциллограф Tektronix Tektronix TDS 2022B (полоса частот 200 МГц). Блок-схема установки приведена на рис. 2. Измерения проводили в непрерывном режиме. Синусоидальные сигналы с частотами f_1 и f_2 через полосовые фильтры, подавляющие гармоники входных сигналов, подавали на входы конвольвера. Сигнал с выхода конвольвера на суммарной частоте $f_1 + f_2$ через полосовой фильтр, устраняющий электро-

магнитные наводки на частотах входных сигналов, и усилитель поступал на первый канал осциллографа. К его второму каналу был подсоединен сигнал, подаваемый на второй вход конвольвера. Подобные входные и выходной фильтры должны использовать и в реальной схеме твердотельного акустоэлектронного процессора. Общая синхронизация осциллографа осуществлялась по сигналу, поступавшему на первый вход конвольвера. Такая схема подключения позволила измерять фазовые соотношения между всеми сигналами, участвующими в эксперименте. Для вычисления амплитуды и фазы сигналов использовались данные об амплитуде измеряемого сигнала в двух точках временной шкалы, отстоящих друг от друга по фазе на четверть периода. Отметим, что особенностью данного метода измерений является тот факт, что ПАВ-конвольвер работает в режиме, максимально приближенном к реальной ситуации обработки сигналов во временной области.

Изучен образец конвольвера на ПАВ, изготовленный на подложке из ниобата лития YZ-среза со следующими основными параметрами: центральная частота входных сигналов 85 МГц; полоса частот входных сигналов (по уровню -3 дБ) 20 МГц; время распространения ПАВ между входными преобразователями 17 мкс; длительность обрабатываемых входных сигналов 14 мкс; база обрабатываемых сигналов $BT = 280$. Конструкция конвольвера содержит ИЭ в виде алюминиевой полоски на поверхности кристалла, представляющей собой $\Delta V/V$ — волновод, и сжимающие акустический пучок многополосковые ответвители. Измерения были проведены для двумерной сетки входных частот с равномерным шагом $\Delta f = 12.5$ кГц и размером 1601 на 1601 точке. Из накопленного массива данных формировалась комплексная

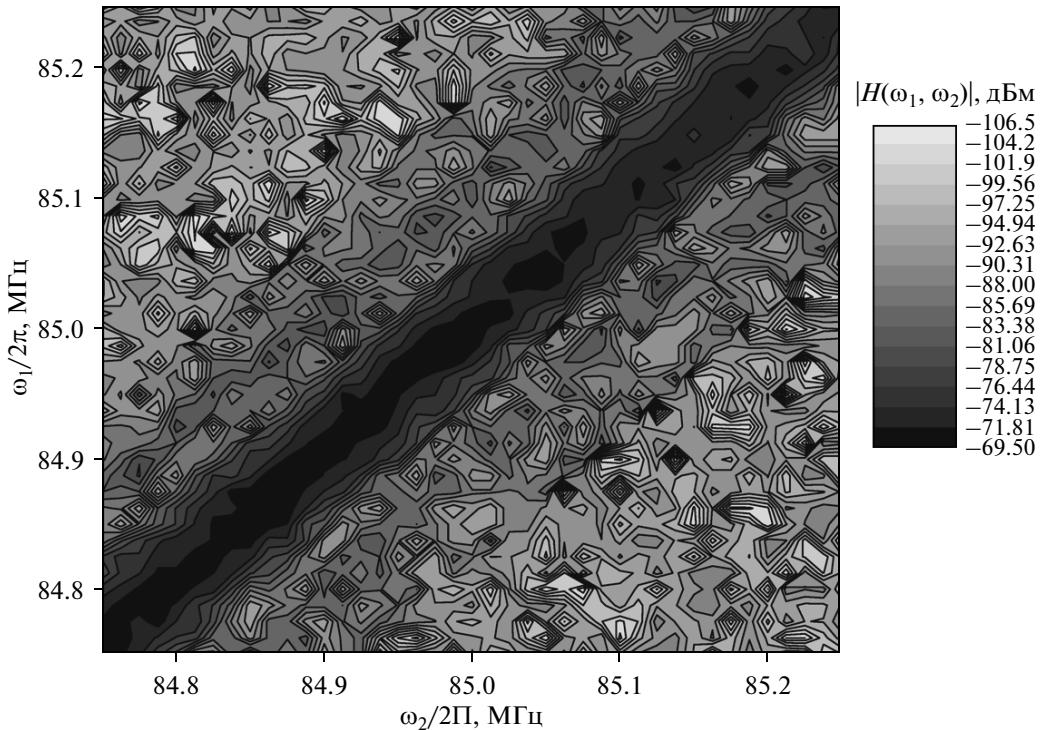


Рис. 3. Абсолютная величина ДПХ как функция частот входных сигналов $\omega_1/2\pi$ и $\omega_2/2\pi$, измеренная в диапазоне 84.75...85.25 МГц.

функция ДПХ $H(\omega_1, \omega_2)$, зависящая от частот входных сигналов.

На рис. 3 показана абсолютная величина $|H(\omega_1, \omega_2)|$, измеренная в диапазоне входных частот 84.75...85.25 МГц. ДПХ идеального конволвевера как функция частот входных сигналов (ω_1 и ω_2) имеет вид

$$H(\omega_1, \omega_2) = D \operatorname{sinc}[(\omega_1 - \omega_2)T_0/2] \times \exp[-j(\omega_1 + \omega_2)T_d/2], \quad (4)$$

где D — постоянное число; T_0 — задержка распространения ПАВ вдоль ИЭ; T_d — задержка, обусловленная расстоянием между входными преобразователями. Как видно из рис. 3, ДПХ реально-го конволвевера имеет максимальную и примерно одинаковую величину вблизи главной диагонали $\omega_1 \approx \omega_2$ и быстро убывает при отходе от нее, что согласуется с формулой (4).

На рис. 4 показана частотная зависимость ДПХ на главной диагонали $\omega_1 = \omega_2$ при мощности входных сигналов 1 мВт (кривая 1). Эта зависимость характеризует эффективность конволвевера как билинейного устройства. Видно, что билинейная эффективность равна -70 дБм, неравномерность в полосе входных частот 20 МГц составляет около 5 дБ. На этом же рисунке показан измеренный существенно нелинейный сигнал на выходе конволвевера (кривая 2), а именно, сигнал

свертки одного из входных сигналов с самим собой, иначе называемый “самосверткой” [6]. Видно, что сигнал “самосвертки” в данном конволвевере подавлен на -20 дБм по отношению к полезному сигналу свертки. Таким образом, динамический диапазон конволвевера, ограниченный сверткой

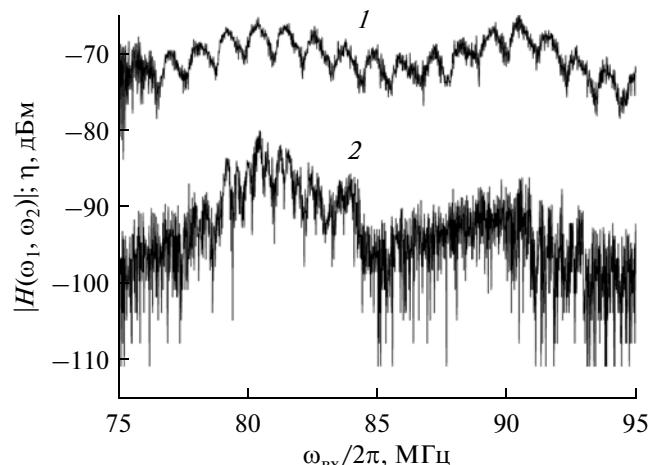


Рис. 4. Зависимости абсолютной величины ДПХ, измеренной при равенстве входных частот (кривая 1), и эффективности “самосвертки” входного сигнала η (кривая 2) от частоты входного сигнала. Указанные кривые соответствуют диагонали $\omega_1/2\pi = \omega_2/2\pi$ на рис. 3.

входного сигнала, составляет около 20 дБ. В конвольверах, предназначенных для использования в современных системах связи, этот сигнал при помощи дополнительных изменений в конструкции может быть уменьшен до уровня –30...–40 дБ по отношению к уровню полезного сигнала свертки [7, 8].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КОМПЬЮТЕРНЫЙ МЕТОД СОПОСТАВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО РАДИОПРИЕМА ШПС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПАВ-КОНВОЛЬВЕРА С ИДЕАЛЬНОЙ И РЕАЛЬНОЙ ДПХ

В данной работе принят следующий способ количественной оценки меры приближения помехоустойчивости реального асинхронного радиоприемника к помехоустойчивости оптимального приемника. Мерой приближения считается требуемое увеличение отношения сигнал/помеха, выраженное в децибелах, при котором вероятности ошибочных информационных решений в оптимальном и реальном приемниках будут равны. Эти оценки проведены при решении двух проблем асинхронного радиоприема ШПС:

1) для гауссовой модели асинхронного радиоприема в случае применения идеального цифрового коррелятора проведено сравнение рабочих характеристик обнаружения при использовании в качестве решающей статистики отношения правдоподобия L , выраженного через вероятностные распределения Рэлея–Райса для полного множества замеров амплитуд выходного сигнала на интервале наблюдения, и пикового значения амплитуды выходного сигнала;

2) для процессора на основе ПАВ-конвольвера сравнение рабочих характеристик обнаружения проводилось для двух моделей ДПХ: идеальной и экспериментально измеренной при использовании в качестве решающей статистики максимального замера амплитуды выходного сигнала на выходе конвольвера. ДПХ реального конвольвера содержит амплитудные и фазовые отклонения от идеальной ДПХ, описываемой выражением (4). Эти отклонения связаны с неоднородностью звукопровода, с отражениями акустических волн от ВШП и многополоскового ответвителя.

Для упрощения компьютерного моделирования будем использовать идеализированную модель передачи радиосигнала в условиях прямой видимости и однолучевого распространения радиоволн. Обобщение метода на случай многолучевого распространения не представляет принципиальных трудностей.

На основе результатов раздела 1 будем использовать в качестве наблюдаемого процесса функ-

цию $|F_3(t)| = F_{3\text{ набл}}(t)$, выражающую наблюдаемую временную зависимость модуля комплексной амплитуды выходного сигнала на выходе конвольвера, имеющего удвоенную частоту несущей $2f_0$, где f_0 – частота несущей сигналов на обоих входах конвольвера. Функция $|F_3(t)|$ измеряется на интервале времени от момента полного входа очередного опорного сигнала в интегрирующую часть звукопровода (момент начала наблюдения $t = t_h$) до момента достижения передним фронтом опорного сигнала противоположной границы интегрирующей части звукопровода, $t = t_K$. При этом опорные сигналы следуют друг за другом непрерывно. Ожидаемый одиничный сигнал и опорные сигналы имеют одну и ту же форму, обращенную во времени. В качестве решающей статистики для принятия информационного решения о том, имел ли место на отрезке $t_h < t < t_K$ корреляционный пик входного и опорного сигналов, принимается максимальное значение функции $F_{3\text{ набл}}(t)$:

$$y = \max_{t_h < t < t_K} F_{3\text{ набл}}(t). \quad (5)$$

Оба сигнала промодулированы кодами с расширенным спектром, при этом опорный сигнал обращен во времени. Длина интегрирующей части звукопровода должна не менее чем в 1.5 раза превышать длительность сигнала T_c .

Отметим, что оптимизационная задача решается для случая, когда мощность теплового флуктуационного шума радиоприемника точно известна, и других внешних мешающих воздействий нет. При наличии других внешних помех рассмотренная выше одномерная решающая статистика на этапе наблюдения выходного сигнала не дает решения в полном объеме. Тогда этот вопрос требует дополнительного рассмотрения.

Укажем основные операции и формулы, по которым проведены расчет и сопоставление рабочих характеристик помехоустойчивости конвольверов с идеальной и реальной ДПХ (см. [3]).

На вход ПАВ-конвольвера поступает суммарный сигнал, состоящий из шума $n(t)$ и сигнала $S_{\text{вх}}(t)$:

$$S_{\text{вх}}(t) = A \sum_{k=1}^K c_k \text{rect}\left\{\left[t - \tau_{\text{задер}} - (k-1)T_{\text{эл}}\right]/T_{\text{эл}}\right\} \times \times \cos[2\pi f_0(t - \tau_{\text{задер}})], \quad (6)$$

где A и $\tau_{\text{задер}}$ – амплитуда и задержка входного сигнала, ее величина находится в интервале, длительность которого равна длительности сигнала T_c ; c_k – спектрорасширяющий код ($c_k = -1$ или $+1$). Если в момент $t = t_h$ (момент полного входа опорного сигнала в интегрирующую часть звукопровода) входной сигнал совпадает с опорным, то

в этот момент имеет место автокорреляционный пик (АКП). Синхронизация по несущей частоте в рассматриваемом примере предполагается точной. Если входной сигнал задержан на время $t_K = kT_{\text{эл}}$, где $T_{\text{эл}}$ – длительность элемента сигнала, то АКП наблюдается в момент $kT_{\text{эл}}/2$. АКП можно наблюдать только в том случае, если задержка входного сигнала не превышает половины длительности сигнала $T_c/2$. При этом длительность прохождения сигнала через ИЭ конвольвера должна в 1.5 раза превышать длительность сигнала T_c .

Программа вычисления оптимальных и близких к оптимуму рабочих характеристик обнаружения ШПС при асинхронном однолучевом радиоприеме для идеальной и реальной ДПХ выполняется следующим образом. Для построения рабочей характеристики обнаружения ШПС при асинхронном однолучевом радиоприеме с учетом ДПХ необходимо построить две гистограммы значений максимальной амплитуды огибающей:

$$r(H_0) = \max_t \{f_3(t) | H_0\} \text{ и } r(H_1) = \max_t \{f_3(t) | H_1\}, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} & \{f_3(t) | H_0\} = \\ & = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega_1, \omega_2) F_{H_0}(\omega_1) F_2(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \{f_3(t) | H_1\} = \\ & = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega_1, \omega_2) F_{H_1}(\omega_1) F_2(\omega_2) d\omega_1 d\omega_2, \end{aligned} \quad (9)$$

$$F_{H_0}(\omega_1) = F_{\text{шум}}(\omega_1), \quad (10)$$

$$F_{H_1}(\omega_1) = F_{\text{шум}}(\omega_1) + F_c(\omega_1 | \tau_{\text{задер}}), \quad (11)$$

$F_{\text{шум}}$ – спектр шумовой реализации, $F_{H_1}(\omega_1)$ – суммарный спектр, состоящий из спектра сигнала, смещенного во времени на случайную величину $\tau_{\text{задер}}$, и спектра шумовой реализации.

Спектр шума генерируется в виде совокупности гауссовских составляющих (реальной и мнимой), являющихся независимыми случайными величинами с заданной дисперсией σ . Значение задержки $\tau_{\text{задер}}$ генерируется с равной вероятностью в пределах интервала задержек, равной половине длины сигнала. По формулам (7)–(11) вычисляется форма огибающей выходного сигнала конвольвера на всем интервале времени пробега опорного сигнала от одного до другого края интегрирующего звукопровода и определяется максимум огибающей, который вносится в массив, ис-

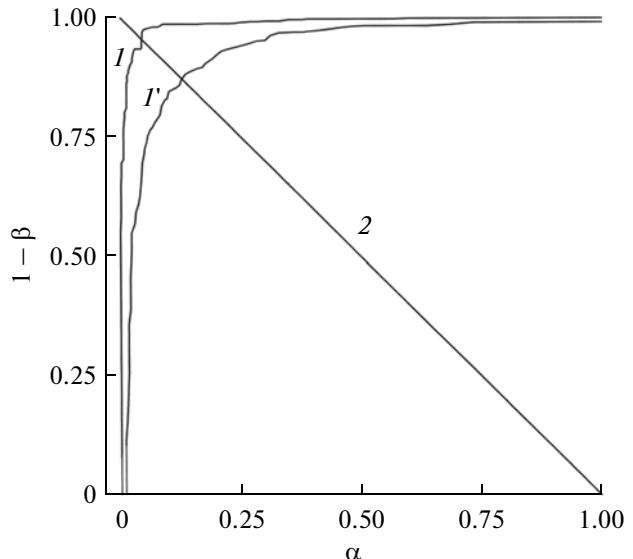


Рис. 5. Рабочие характеристики для идеальной (кривая I) и реальной (кривая I') ДПХ при использовании кодов Уолша с $BT = 32$. Прямая 2 соответствует уравнению $\alpha + \beta = 1$.

пользуемый для построения гистограмм $r(H_0)$ и $r(H_1)$.

После того как рабочие характеристики для идеальной и реальной ДПХ построены, проводится построение рабочих характеристик для реальной ДПХ с увеличенным ОСШ. Величина ОСШ подбирается таким образом, чтобы вероятности информационных ошибок ложного обнаружения и пропуска сигнала: α и β для идеальной и реальной ДПХ (с увеличенным ОСШ) были равны. Выраженное в децибелах увеличение ОСШ может служить количественной оценкой вклада неидеальностей конвольвера, связанных с переотражениями акустических волн от ВШП и от многополосковых ответвителей.

На основании приведенной в данном разделе теории был проведен цикл компьютерного моделирования с использованием спектрорасширяющих кодов Уолша с $BT = 32$. Число случайных реализаций в расчетах составляло 2.5×10^6 . Путем варьирования величины ОСШ было найдено, что разница значений ОСШ для идеальной и реальной ДПХ, имеющих равную вероятность информационных ошибок, составляет ~ 0.4 дБ (рис. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развит экспериментально-компьютерный метод статистического оценивания степени снижения ОСШ вследствие амплитудных и фазовых отклонений ДПХ реального конвольвера от идеальной модели. Эти отклонения связаны с неод-

нородностью звукопровода, с отражениями акустических волн от ВШП и многополоскового ответвителя.

Применение развитого метода показало, что при использовании ПАВ-конволвера снижение ОСШ не превышает 0.4 дБ. Это означает, что конволвер на ПАВ с позиций конструктивных особенностей ВШП и паразитных отражений акустических волн от неоднородностей звукопровода можно рассматривать как достаточно близкий к идеальному, в то время как снижение помехоустойчивости вследствие других возможных несовершенств ПАВ-конволверов необходимо дополнительно исследовать.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 12-07-00186а, № 14-07-00163-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости при флуктуационных помехах. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МЭИ, 1946. 364 с.
2. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М. Госэнергоиздат, 1956.
3. Синделер Ю.Б., Проклов В.В., Григорьевский В.И. и др. // РЭ. 2008. Т. 53. № 10. С. 1299.
4. Свириденко С.С. Основы синхронизации при приеме дискретных сигналов. М.: Связь, 1974.
5. Morgan D.P. // Electron. Lett. 1981. V. 17. № 7. P. 265.
6. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах. М.: Радио и связь, 1990.
7. Reindl L., Worz H.W., Grassl H.P. // Proc. 1987 IEEE Ultrasonics Symp. N.Y.: IEEE, 1987. P. 85.
8. Pohl A., Posch C., Seifert F., Reindl L. // Proc. 1995 IEEE Ultrasonics Symp. N.Y.: IEEE, 1995. P. 155.