

УДК 621.396+621.391.82

МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ВАТЕРСОНА ИОНОСФЕРНОГО КАНАЛА КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСВЯЗИ ДЛЯ АДАПТИВНОГО ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЁННОГО ПРИЁМА

С. А. Метелёв

Научно-производственное предприятие «Полёт», г. Нижний Новгород, Россия

В статье предлагается модель формирования сигналов с разнесённых антенн для имитаторов ионосферного коротковолнового радиоканала, предназначенных для тестирования алгоритмов и устройств с пространственно-временной обработкой сигналов. Путём сравнения предложенной модели с экспериментальными результатами показана её адекватность. С помощью модели определены потенциальные возможности пространственных компенсаторов помех в канале с рассеянием.

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокоскоростных радиоустройств для обмена информацией в условиях помех, использующих пространственный ресурс радиолиний (компенсаторов помех с встроенными модемами), невозможно без учёта дестабилизирующих факторов реальных радиоканалов [1, 2]. Наиболее актуальным это является для коротковолнового диапазона, канал распространения радиоволн в котором характеризуется высокой нестационарностью коэффициента передачи, развитой многолучёвостью, вызывающей замирания сигнала и межсимвольную интерференцию, и высоким уровнем внешних помех. Синтез алгоритмов пространственной обработки сигналов, опирающийся на теоретические представления о радиоканале как регулярной сферически-слоистой магнитоактивной ионосферной плазме, становится малопродуктивным, а учёт всего многообразия отклонений от такого идеализированного представления при подобном синтезе чрезвычайно затруднён.

Выходом из такой ситуации является построение модели ионосферного канала распространения радиосигналов коротковолнового диапазона, максимально учитывающей особенности реальных каналов, с одной стороны, а с другой — обладающей достаточной простотой и технологичностью для практической реализации в имитаторах радиоканала. В основе модели радиосигнала, прошедшего ионосферный радиоканал и принимаемого на разнесённые в пространстве антенны лежат физические принципы распространения радиоволн в ионосфере, результаты экспериментальных измерений параметров таких сигналов и модель Ватерсона, созданная для имитации канала с рассеянием для приёма коротковолнового радиосигнала по одной ветви разнесения. Достигнутый уровень вычислительной техники и программного обеспечения позволяет построить имитационные модели и устройства достаточно эффективным образом.

1. НЕОБХОДИМОСТЬ ИМИТАТОРОВ (СИМУЛЯТОРОВ) РАДИОКАНАЛА

Распространение коротких радиоволн характеризуется набором связанных между собой явлений, обусловленных высокой изменчивостью среды распространения. Эта изменчивость должна учитываться каждым разработчиком эффективных высокоскоростных цифровых систем связи коротковолнового диапазона. Способность качественно оценить, насколько уязвимы будут инженерные решения создаваемых радиосредств в реальных каналах связи ещё на этапе проектирования зачастую является залогом успеха разработки. Для сокращения цикла разработки применяются специальные инструменты, называемые канальными симуляторами. Эти устройства

незаменимы для проверки характеристик радиоприёмных устройств, таких, как динамический диапазон, допустимое отношение сигнал/шум, устойчивость по отношению к помехам по соседнему каналу и к изменению характеристик канала. Кроме этих основных факторов, влияющих на качество работы радиоустройств связи, не меньшее значение имеет качество используемого протокола связи: эффективность кадровой и символьной синхронизации, помехоустойчивого кодирования, успешность протокола адаптации и др.

Хотя некоторые из этих проверок могут быть выполнены на реальных радиотрассах, однако неповторимость условий распространения делает невозможным проведение сравнительных тестов данным образом. Это означает, что необходимо создать искусственную тестовую среду распространения радиоволн в ионосфере, которая может воспроизводить такие условия.

Компьютерное моделирование является одним из путей получения качественных результатов. Исследование методом имитационного моделирования, основанное на теоретических концепциях, может обеспечить ожидаемые характеристики качества радиосвязи и требования к аппаратному и программному обеспечению создаваемых радиосредств. Кроме того, оно является серьёзным обоснованием успешного результата проведения разработок.

Ключевым этапом разработки эффективных сигнально-кодовых конструкций и протоколов для высокоскоростных цифровых систем связи коротковолнового диапазона является понимание поведения ионосферы и степень её влияния на характеристики радиоканала.

2. МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРНОГО ОТРАЖЕНИЯ РАДИОВОЛН

Коротковолновая радиосвязь характеризуется многолучевым распространением и наличием замираний. Передаваемые радиосигналы распространяются несколькими модами, испытывая однократное или многократные отражения от слоёв E и F ионосферы. Вследствие различного времени распространения по разным путям (лучам) сигналы, поступающие в приёмник, могут быть размыты по времени прихода на несколько миллисекунд. Турбулентность ионосферы искажает сигнал как по амплитуде, так и по фазе, различные ионосферные слои движутся вверх или вниз, что приводит к независимому доплеровскому сдвигу в каждой моде распространения. Многолучёвость пространственной (небесной) волны КВ диапазона возникает вследствие наличия лучей с разным числом отражений от ионосферы и земли (многоскачковые пути распространения) и лучей с разными углами возвышения к горизонту, связывающих одни и те же конечные точки («высокие» и «низкие» лучи). Естественные неоднородности ионосферных слоёв и магнитно-ионное расщепление радиоволн также дают вклад в многолучёвость.

Влияние естественных неоднородностей вызывает временное рассеяние около $20 \div 40$ мкс каждого луча или моды распространения, существование высокого/низкого и обыкновенного/необыкновенного лучей приводят к уширению многолучёвости до 200 мкс. Для однокоскачковой трассы (с длиной $800 \div 2000$ км) типичным является интервал многолучёвости 100 мкс. В этом случае все лучи проходят через одну и ту же область ионосферы и поэтому различные моды обладают одним и тем же доплеровским уширением. Такой канал, как правило, является очень медленно замирающим каналом с характерным временем изменения около 100 с или более, соответствующим доплеровскому уширению 0,01 Гц. Многолучёвое рассеяние в диапазоне задержек от 1 до 2 мс в коротковолновом диапазоне возникает на коротких трассах (близких к почти вертикальному падению) с протяжённостью до 800 км вследствие запаздывания прихода сигнала из-за повторяющихся отражений от земли и ионосферы, или на очень длинных трассах (от 2000 до 10000 км), имеющих два или более скачков. На таких длинных трассах доплеровское уширение, возникающее из-за различий в доплеровском сдвиге, может простирается от $1 \div 2$ Гц (замираний в секунду). Короткопериодные искажения коротковолнового канала поэтому могут быть описаны

в терминах параметров, которые определяют характеристики уширения во времени и по частоте, т. е. дифференциальных задержек распространения между модами, и степенью доплеровского уширения в каждой моде.

3. МОДЕЛЬ ВАТЕРСОНА ДЛЯ ИМИТАТОРА ИОНОСФЕРЫ

На основе наблюдений коротковолновых радиоизлучений в широкой полосе на трассах Боулдер—Вашингтон в работе [3] предложена модель для узкополосного коротковолнового канала, формирующую основу для большинства современных симуляторов, как аппаратных, так и программных. Эта модель, известная как «Модель Ватерсона для ионосферного коротковолнового канала с гауссовым рассеянием», предполагает, что большинство нестационарных по частоте и по времени каналов в небольшой полосе частот (менее 12 кГц) и на достаточно коротком интервале времени (менее 10 минут) могут быть описаны стационарной моделью.

Коротковолновый канал моделируется линией задержки с отводами для каждой разделённой во времени моды. Этот задержанный сигнал модулирован по амплитуде и фазе случайной комплексной функцией времени, определяемой следующим образом:

$$G_i(t) = G_{ia}(t) \exp(j 2\pi f_{ia}t) + G_{ib}(t) \exp(j 2\pi f_{ib}t). \quad (1)$$

Здесь индексы a и b обозначают компоненты двух лучей магнитоионного расщепления для i -го элемента. В этом контексте $G_{ia}(t)$ и $G_{ib}(t)$ представляют два независимых комплексных гауссовых эргодических случайных процесса, каждый из которых имеет нулевое среднее и независимые действительную и мнимые части с равными среднеквадратическими значениями, которые вызывают рэлеевские замирания. Экспоненты обеспечивают частотный сдвиг f_{ia} и f_{ib} для магнитных компонент в спектре. Каждый такой коэффициент передачи имеет спектр, который в общем случае является суммой двух магнитоионных компонент, каждая из которых является гауссовской функцией частоты:

$$H(f) = \frac{1}{A_{ia}\sqrt{2\pi\sigma_{ia}}} \exp\left[-\frac{(f-f_{ia})^2}{2\sigma_{ia}^2}\right] + \frac{1}{A_{ib}\sqrt{2\pi\sigma_{ib}}} \exp\left[-\frac{(f-f_{ib})^2}{2\sigma_{ib}^2}\right]. \quad (2)$$

В большинстве случаев учёт магнитоионного расщепления не требуется, каждый из лучей может быть представлен одной компонентой (одним слагаемым из (1), (2)), которая определяется набором из трёх параметров рассеяния, включающим в себя затухание луча, его частотное уширение и доплеровский сдвиг частоты. Структурная схема модели Ватерсона ионосферного коротковолнового канала [3] для трёхлучевого случая представлена на рис. 1. Под шумом в этой модели следует понимать любой аддитивный шумовой процесс (внутренний тепловой шум приёмника, внешний атмосферный или индустриальный шум). Под помехой понимается внешняя стационарная помеха.

Комплексная функция рассеяния Ватерсона $G_i(t)$ состоит из двух независимых гауссовых случайных переменных, образующих вектор, который имеет двумерное гауссово распределение. Известно, что модуль комплексной переменной независимого двумерного гауссового случайного процесса имеет распределение Рэлея. Поэтому функция гауссового рассеяния формирует хорошо известные рэлеевские замирания, встречающиеся в распространении коротких радиоволн. Для генерации такой функции белый шум с равномерным распределением пропускается через частотный фильтр с гауссовой характеристикой, после чего случайный процесс приобретает гауссово распределение по времени и частоте.

Международный консультативный радиокomitee (CCIR), в настоящее время Международный телекоммуникационный союз (ITU-R), выпустил рекомендации [4], в которых определяются

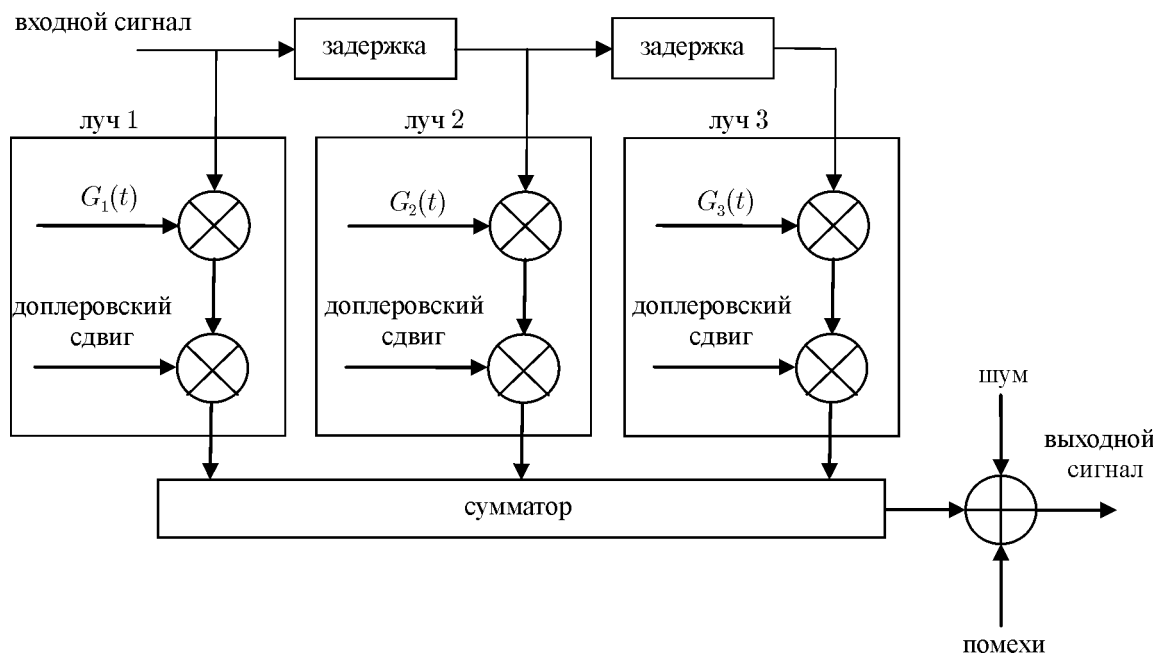


Рис. 1. Модель Ватерсона ионосферного коротковолнового канала для трёхлучевого случая: одно-канальный приём

величины частотного уширения и времён задержек для плохого, среднего и хорошего каналов в модели Ватерсона. Рекомендация [5] добавляет некоторые дополнительные характеристики каналов для низких, средних и высоких широт (см. табл. 1).

Предполагается, что эти параметры должны быть использованы для имитации средних и экстремальных условий распространения коротких радиоволн при компьютерном моделировании и при тестировании реальной аппаратуры.

Таблица 1

Условия	Частотное уширение, Гц	Задержки, мс
Общие (гладкие) замирания	0,2	0,0
Общие (гладкие) замирания (экстремальный случай)	1,0	0,0
Хороший канал	0,1	0,5
Средний канал	0,5	1,0
Плохой канал	1,0	2,0
Высокоширотный средний канал	10,0	3,0
Высокоширотный возмущённый канал	30,0	7,0

4. МОДИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ВАТЕРСОНА ДЛЯ МНОГОАНТЕННОГО ПРИЁМА РАДИОСИГНАЛА В КАНАЛЕ С РАССЕЯНИЕМ

Для реализации пространственного ресурса и повышения помехозащищённости приёма радиосигналов в присутствии случайных и преднамеренных помех применяется пространственно-временная обработка сигналов с разнесённых антенных элементов. Устройства, реализующие такие принципы, называются адаптивными антенными решётками, или системами (ААР или ААС), или автоматическими компенсаторами помех (АКП). Они автоматически или адаптивным образом должны осуществлять режекцию помехи путём взвешенного суммирования антенных колебаний. Создание модели этих антенных колебаний, являющихся смесями помехового и полезного радиосигналов, и является предметом данной работы.

На рис. 2 приведена схема, изображающая формирование антенного колебания одного из компонентов сигнально-помеховой смеси в трёхлучевом канале связи. Набеги фаз i -го луча на второй антенне $\Delta\varphi_i$ определяются их углами прихода — азимутальным α_i и углом места θ_i

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r_i = \frac{2\pi}{\lambda} d \cos \alpha_i \cos \theta_i, \quad (3)$$

где d — расстояние между антеннами, λ — длина волны.

В общем случае азимутальные углы прихода волн, идущих разными путями от одного источника, могут не совпадать между собой, хотя для дальнейшего моделирования достаточно принять предположение об их равенстве между собой и приравнять их к нулю: $\alpha_i = 0$, $i = 1, 2, 3$, т. е. расположить антенные элементы в плоскости падения волн.

Формирование колебания на первой антенне осуществляется в соответствии с описанной выше моделью Ватерсона (верхний сумматор на рис. 3), формирование колебания на второй антенне осуществляется с учётом разных набегов фаз по каждому из лучей (нижний сумматор на рис. 3). Добавление следующих антенн при многих ветвях разнесения в адаптивной антенной системе

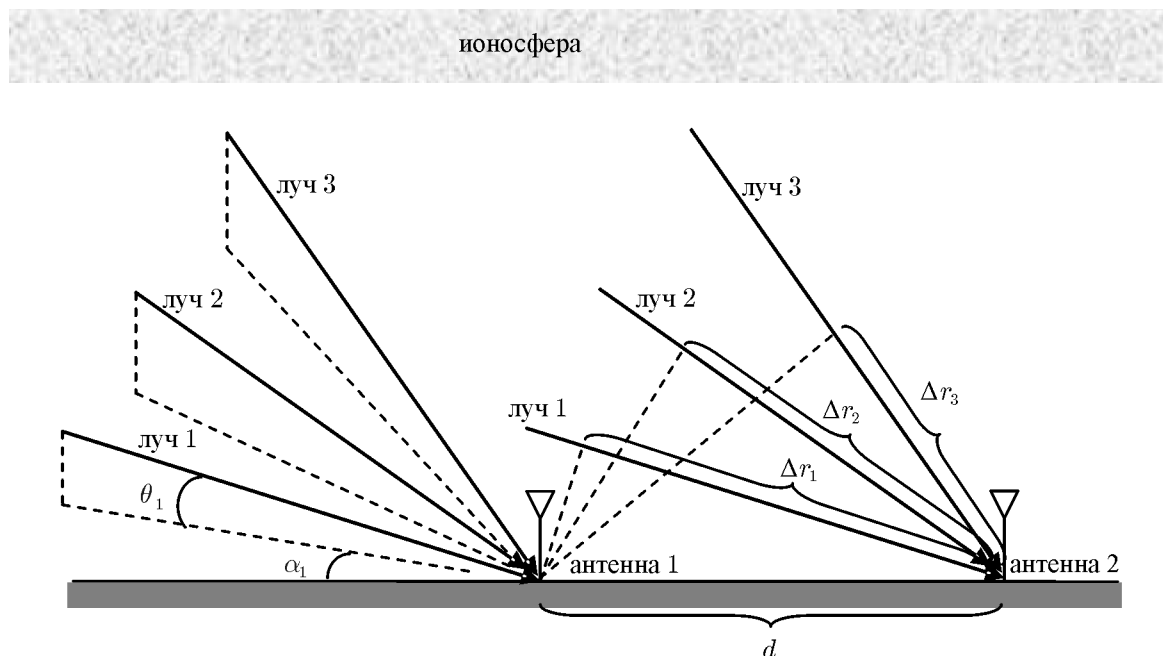


Рис. 2. Геометрия углов прихода радиоволн при различном числе скачков на трассе распространения

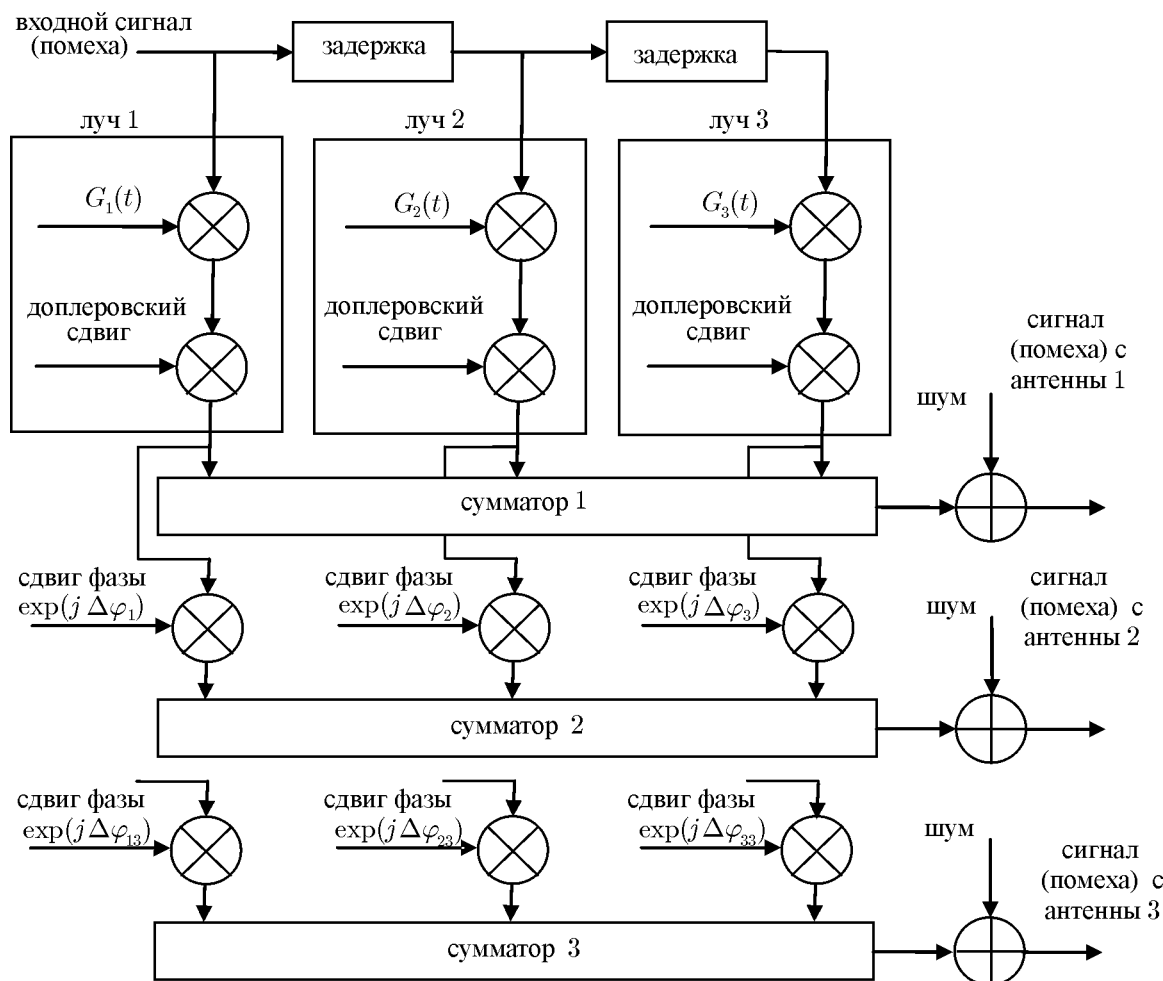


Рис. 3. Модифицированная модель Ватерсона ионосферного коротковолнового канала для трёхлучевого случая: многоканальный приём

осуществляется в данной модели простым добавлением новых «этажей» из фазосдвигающих цепочек (с другими набегами фаз) и сумматоров.

Такая модель пространственного (многоканального) приёма ионосферного сигнала достаточно проста, физически понятна, при этом основное звено модели — ионосферное рассеяние в модели Ватерсона — в ней сохраняется неизменным. Остаётся сопоставить свойства формируемых с её помощью сигналов и характеристики наблюдаемых сигналов на реальных трассах.

Моделирование таких сигналов наиболее удобно осуществить в среде «Simulink» пакета «Matlab», имеющего готовые блоки фильтров (в том числе гауссовского), генераторов и модуляторов различных сигналов, другие необходимые элементы модели, а также развитые средства графического представления сигналов (осциллографы, спектраллизаторы, цифровые дисплеи и пр.).

На рис. 4а приведена осциллограмма сигнала частотного телеграфа (ЧТ) с разносом частотных составляющих 200 Гц и скоростью передачи 50 бит/с в однолучевом канале связи ($G_2(t) = G_3(t) \equiv 0$), ионосферное рассеяние лучей имитировалось гауссовым фильтром с полосой пропускания в 1 Гц по уровню -3 дБ (плохой канал). Имитационное моделирование осуществлялось для комплексных огибающих сигналов на нулевой частоте, частота дискретизации составляла 2000 Гц. Из рис. 4а видно, что сигналы, принимаемые каждой из антенн, испытывают рэлеев-

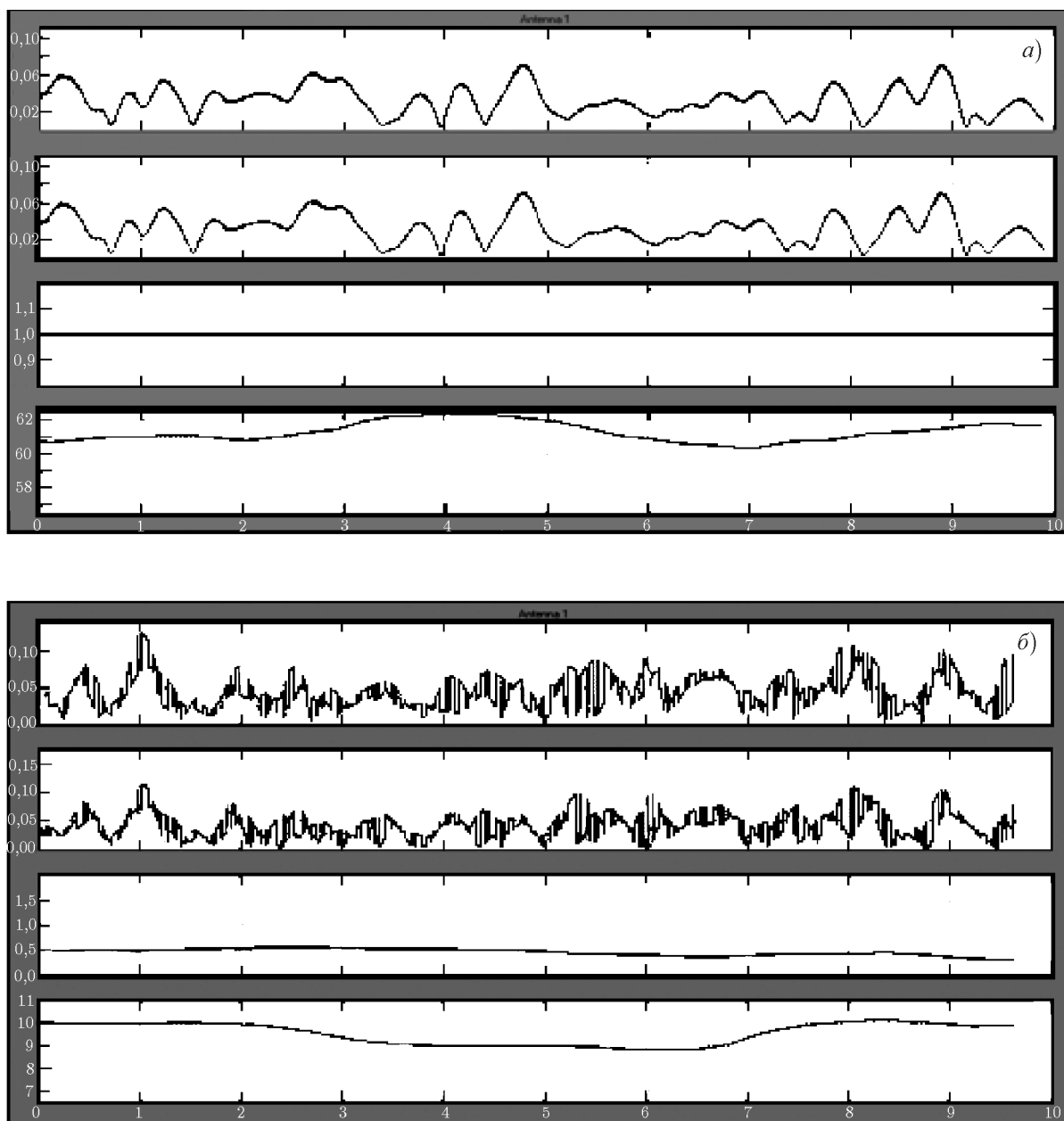


Рис. 4. Осциллограммы амплитуды сигнала в относительных единицах с первой антенны (верхняя панель) и второй антенны (вторая панель сверху), модуля коэффициента корреляции колебаний с двух антенн (третья панель, линейная шкала) и коэффициента подавления этого сигнала (в дБ) в квадратурном автокомпенсаторе; по горизонтальной оси отложено время в секундах. Однолучевая модель канала (а), двухлучевая модель (б)

ские замирания с характерным временем около 1 с, при этом коэффициент корреляции таких антенных колебаний близок к единице (третья осциллограмма), что обеспечивает возможность компенсации такого сигнала (помехи) в квадратурном автокомпенсаторе (АКП) с высоким коэффициентом подавления не менее 60 дБ (четвёртая осциллограмма). Полоса эффективного фильтра низкой частоты в АКП [6] составляла 5 Гц, что позволяло отслеживать односторонние замирания с близкой к нулю динамической ошибкой слежения. Из приведённых результатов следует, что в однолучевом канале распространения помеховой радиоволны возможна её компенсация

с высоким коэффициентом подавления независимо от ширины её полосы¹. Именно подобную картину мы наблюдали в редких случаях однолучевого коротковолнового канала на реальных трассах. Гораздо более частыми являются многолучевые помехи.

Появление второго луча меняет ситуацию радикальным образом. Амплитуда третьего луча по-прежнему равна нулю, доплеровский сдвиг первого луча остаётся равным 0 Гц, доплеровский сдвиг второго луча составляет 1 Гц. Задержка между вторым и первым лучом в соответствии с табл. 1 была принята 2 мс, углы прихода первого и второго лучей равнялись 30° и 60°, что соответствовало условиям распространения на трассе с протяжённостью менее 800 км. Характеристики принимаемых сигналов в этом случае приведены на рис. 4б. Из двух верхних осциллограмм мы видим, что огибающая сигнала частотного телеграфа, имеющая на выходе передатчика постоянную амплитуду, приобретает паразитную амплитудную модуляцию (амплитуда «нажатия» в частотном телеграфе отличается от амплитуды «отжатия»), но гораздо более худшим явлением становится некоррелированность двух антенных колебаний. Это приводит к тому, что такое колебание невозможно полностью скомпенсировать при помощи одного весового коэффициента адаптивного сумматора [1], минимальное время накопления которого не может быть менее 10 бит полезного сигнала (0,2 с).² Именно этот эффект значительного уменьшения степени компенсации многолучевого радиосигнала до 9÷10 дБ, вызванный уменьшением коэффициента корреляции антенных колебаний, демонстрируют четвёртая и третья осциллограммы рис. 4б.

Цикл экспериментальных измерений коэффициента подавления коротковолновых радиопомех в квадратурном автокомпенсаторе $K_{\text{АКП}}$, проведённый нами более десяти лет назад [6], позволил установить его среднее значение $K_{\text{АКП}} \approx 12$ дБ, которое близко к полученным в данном имитационном моделировании величинам.

Сравнение динамических спектров сигнала с разносом частот 500 Гц и скоростью 300 символов в секунду (ЧТ-500, 300 бод), полученных в экспериментальных измерениях [2] (см. рис. 5а–е), с динамическими спектрами такого же сигнала, полученными на вышеприведённой модели двухлучевого канала (рис. 5жс), показывает их качественное сходство, что также свидетельствует в пользу адекватности предложенной модели. На рис. 5а–е показаны динамические спектры сигнала на двух антеннах (а, б); флуктуации амплитуд частотных составляющих отжатия ($F = -250$ Гц) и нажатия ($F = 250$ Гц) на первой (в, г) и второй (д, е) антеннах. На рис. 5жс показаны динамические спектры сигнала с двух разнесённых антенн, прошедшего через имитатор двухлучевого канала с рассеянием; использовалось быстрое 128-точечное преобразование Фурье по вертикальной оси — частота ± 1000 Гц относительно рабочей частоты (центральная метка 64); по горизонтальной оси отложено время в единицах $64/2000$ с, вся шкала составляет 9,6 с.

Увеличение используемой частотной полосы приводит к ухудшению корреляционных свойств сигналов с двух антенн и к уменьшению коэффициента подавления в АКП. Зависимость коэффициента подавления АКП $K_{\text{АКП}}$ от полосы частот принимаемого сигнала Δf (рис. 6), полученная в имитационном эксперименте, показывает его резкое уменьшение (примерно на 40 дБ) даже для монохроматического сигнала ($\Delta f = 0$), увеличение ширины полосы частот радиосигнала до 500 Гц приводит к его монотонному уменьшению до 9÷10 дБ. Дальнейшее расширение полосы частот сигнала не приводит к заметному уменьшению коэффициента подавления, что, вообще говоря, является несколько неожиданным эффектом.

На рис. 6 приведены три кривые $K_{\text{АКП}}(\Delta f)$, полученные для трёх случаев модифицированной модели Ватерсона — хорошего, среднего и плохого каналов в соответствии с табл. 1. Использо-

¹ Предполагается, что неидентичность амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик фильтров основной селекции двух приёмных каналов пренебрежимо мала или устранена адаптивным выравнивателем.

² Минимальное время усреднения устанавливается из требования декоррелировать сигнал и имитационную помеху, для чего необходимо накапливать сигнал на интервале времени с длиной не менее 10 бит полезного сигнала.

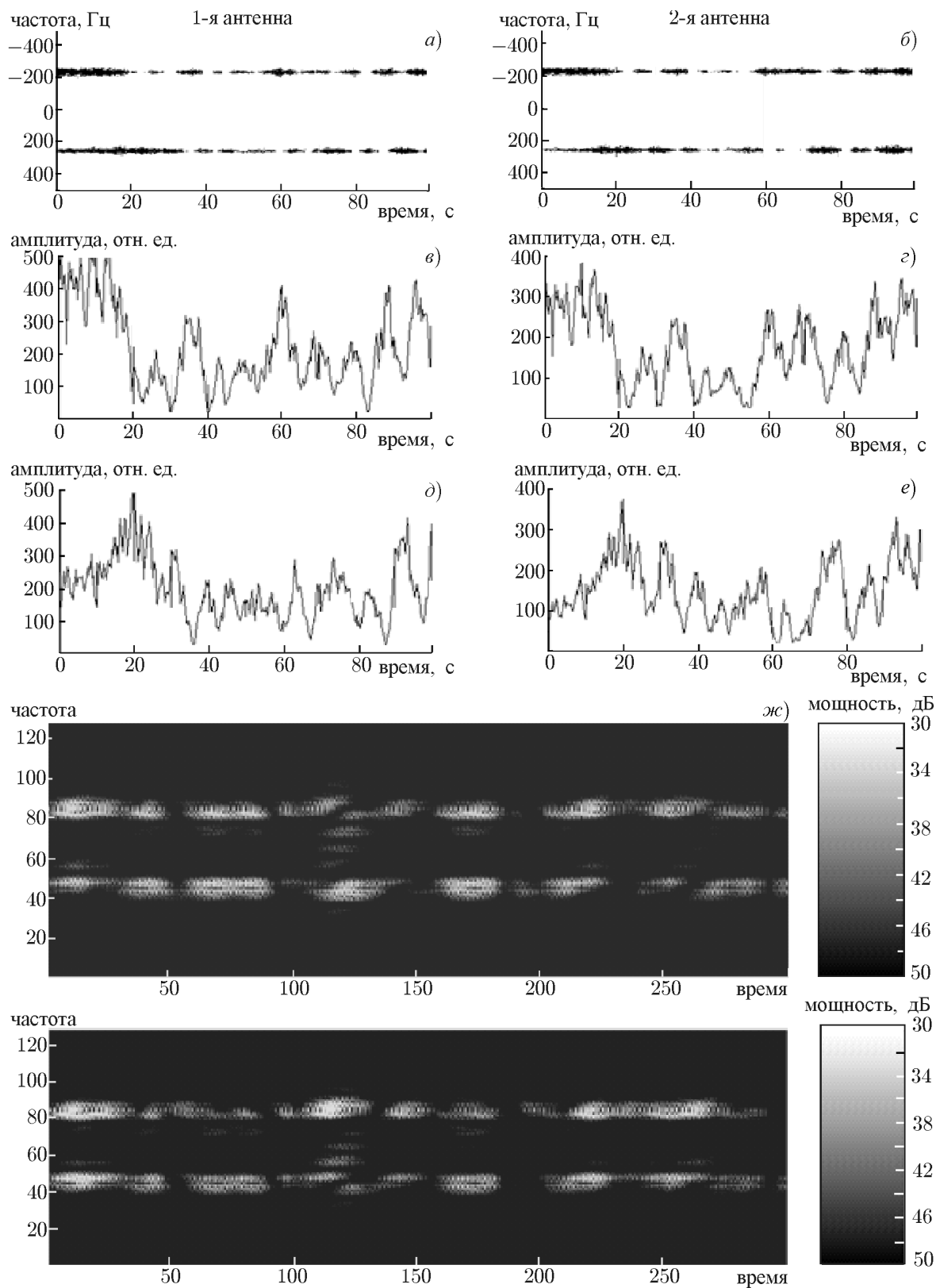


Рис. 5. Селективные замирания по частоте сигнала ЧТ-500 на несущей частоте $f = 6870$ кГц, 12:25 17.09.1996 (рис. 5а-е). Динамические спектры сигнала ЧТ-500, 300 бод с двух антенн, прошедшего через двухлучевый имитатор ионосферного канала с рассеянием (рис. 5ж)

валась двухлучевая модель, в которой второй луч имел доплеровское смещение частоты 1 Гц. В качестве тестового сигнала с изменяющейся полосой использовался сигнал с частотной модуляцией низкочастотным синусом. Из приведённых кривых видно, что приемлемый коэффициент подавления помехи (20 дБ) пространственно-корреляционными методами может быть достигнут для помехи с полосой не более 50 Гц в плохом канале, не более 100 Гц в среднем канале и не более 200 Гц в хорошем канале.

На рис. 7а, б приведены аналогичные зависимости для среднего и хорошего каналов при наличии доплеровского смещения второго луча и при отсутствии доплеровского сдвига. Из приведённых графиков видно, что умеренный доплеровский сдвиг ($0 \div 1$ Гц) незначительно изменяет коэффициент подавления при небольших полосах сигнала (до 100 Гц), большой сдвиг частоты (10 Гц) сильно влияет на корреляционные свойства сигнала с разнесённых антенн, $K_{\text{АКП}}$ уменьшается до 10 дБ. Плохая коррелированность более широкополосных сигналов ($\Delta f > 100$ Гц) практически не меняется при добавлении доплеровского сдвига в модифицированной модели Ватерсона, и он может не использоваться при имитационном моделировании широкополосных сигналов.

Из рис. 7 также видно влияние частотного уширения спектра сигнала (или полосы частотного рассеяния канала) σ_i — в канале с большим σ_i коррелированность антенных сигналов уменьшается. На рис. 7б приведена зависимость $K_{\text{АКП}}(\sigma_i)$ для двух разных задержек между лучами в двухлучевой модели канала без доплеровского сдвига частот. В качестве тестового сигнала был выбран узкополосный сигнал с частотной модуляцией и шириной полосы 50 Гц.

Хорошо видно, что независимо от величины задержки (иначе говоря, на трассе любой протяжённости) при сильном частотном рассеянии ($\sigma_i > 2,5$ Гц) коррелированность принимаемых радиосигналов уменьшается, и коэффициент подавления АКП уменьшается, т. е. в условиях возмущённой ионосферы, или в её полярных областях следует ожидать снижения эффективности компенсации помех.

Влияние третьего луча демонстрирует график на рис. 7г, на котором приведены зависимости $K_{\text{АКП}}(\Delta f)$ для двухлучевого и трёхлучевого «плохих» каналов (частотное уширение 1 Гц), полученные также для частотно-модулированного сигнала с изменяющейся шириной полосы. Появление третьего луча также приводит к уменьшению коэффициента подавления.

Таким образом, несмотря на то, что для широкополосных (высокоскоростных) сигналов ($\Delta f > 200$ Гц) вариации доплеровского сдвига между лучами, частотного уширения или добавление третьего луча заметны в корреляционных характеристиках узкополосных сигналов, принимаемых на разные антенны, они не вызывают значительных изменений в параметрах пространственной когерентности радиоволны и в качественном поведении коэффициента подавления АКП. Это говорит о том, что уже двух лучей достаточно для разрушения когерентности волны на расстоянии в половину длины волны и для снижения эффективности пространственно-временной

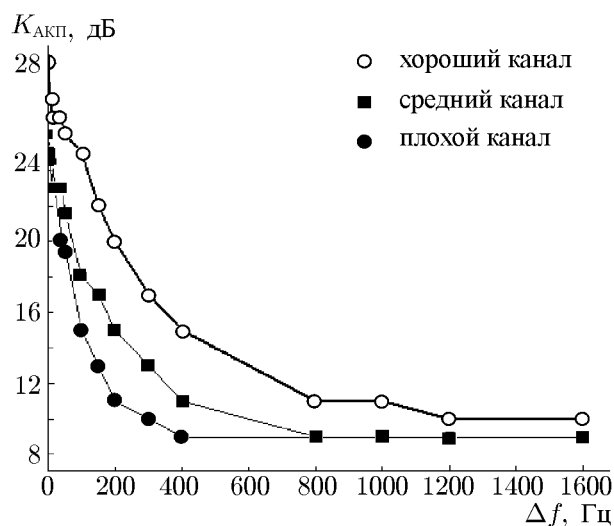


Рис. 6. Зависимость коэффициента подавления частотно-модулированного радиосигнала в квадратурном автокомпенсаторе (АКП), прошедшего через симулятор ионосферного канала с модифицированной моделью Ватерсона, от полосы частот сигнала; в каждом канале использовалась двухлучевая модель, второй луч имеет доплеровское смещение 1 Гц

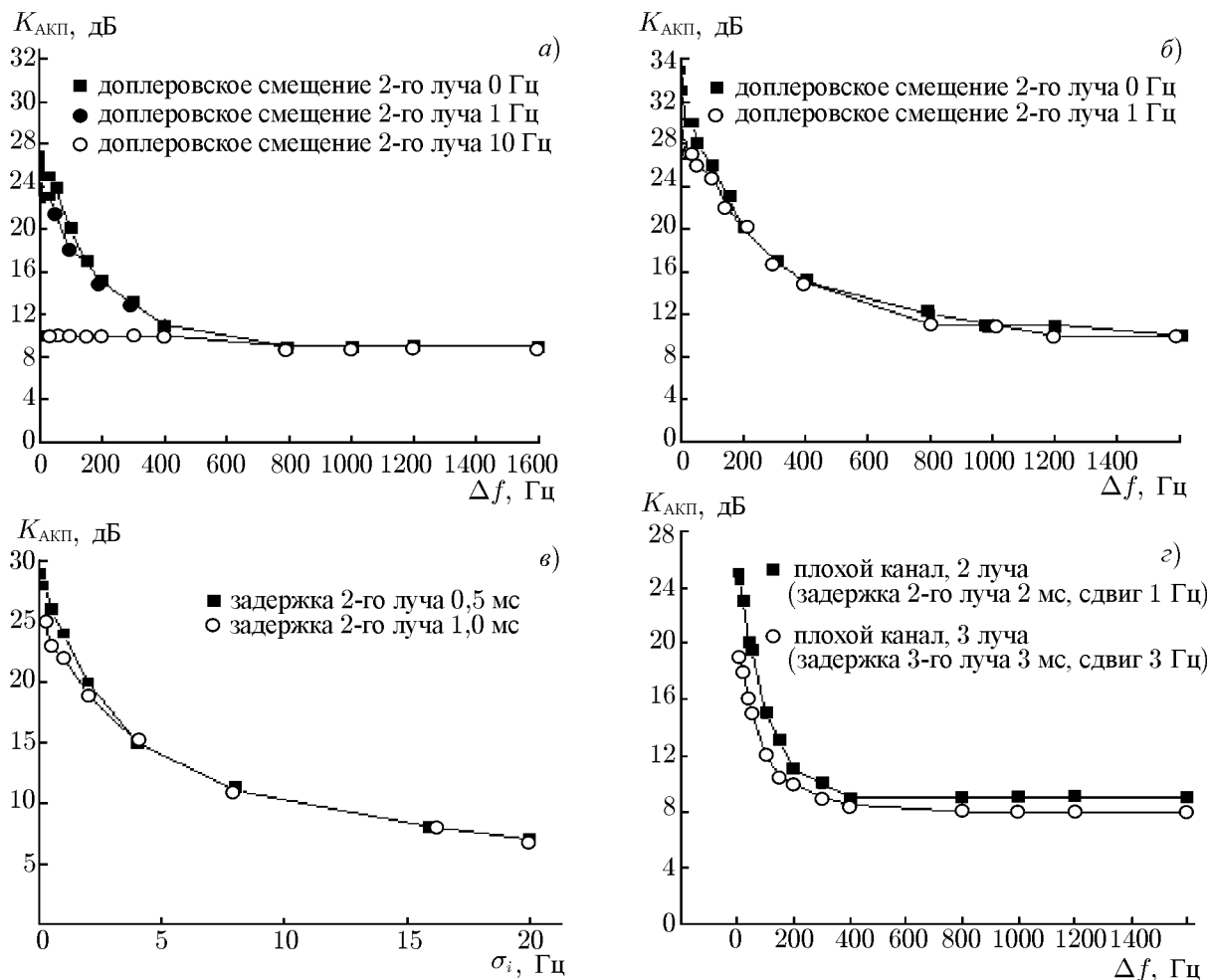


Рис. 7. Влияние доплеровского сдвига частоты на коэффициент подавления в среднем (а) и хорошем (б) каналах (ср. рис. 6). Влияние полосы частотного рассеяния канала на когерентность радиоволны, принимаемой на две разнесённые на половину длины волны антенны для двух двухлучевых каналов с задержками между лучами 0,5 и 1 мс (в). Влияние 3-го луча на коэффициент подавления сигнала с разной шириной полосы частот (з)

обработки такого сигнала. При этом по-прежнему можно обеспечить достаточно высокое подавление сигнала с шириной полосы в несколько десятков герц в пространственном компенсаторе. Следовательно, для построения высокоскоростного цифрового канала радиосвязи с повышенной помехозащищённостью методами пространственно-временной обработки необходимо объединять узкополосные субканалы передачи данных в единую полосу пропускания коротковолновых приёмопередатчиков, каждый из которых на приёме можно защитить своим компенсатором помех [7], а уже после этого субканальные потоки информации мультиплексировать (объединить) в единый высокоскоростной поток.

Разработка сигнально-кодовой конструкции для такой системы связи должна обязательно сопровождаться имитационными испытаниями на помехозащищённость на предложенной в этой работе модифицированной модели Ватерсона, которая должна включать в себя несколько многолучевых радиосигналов (полезный сигнал и помехи, пришедшие своими путями к приёмнику) и несколько приёмных антенн. Модель приёма трёхлучевого полезного сигнала и трёхлучевой помехи на две антенны (две ветви пространственного разнесения) приведена на рис. 8, на которой

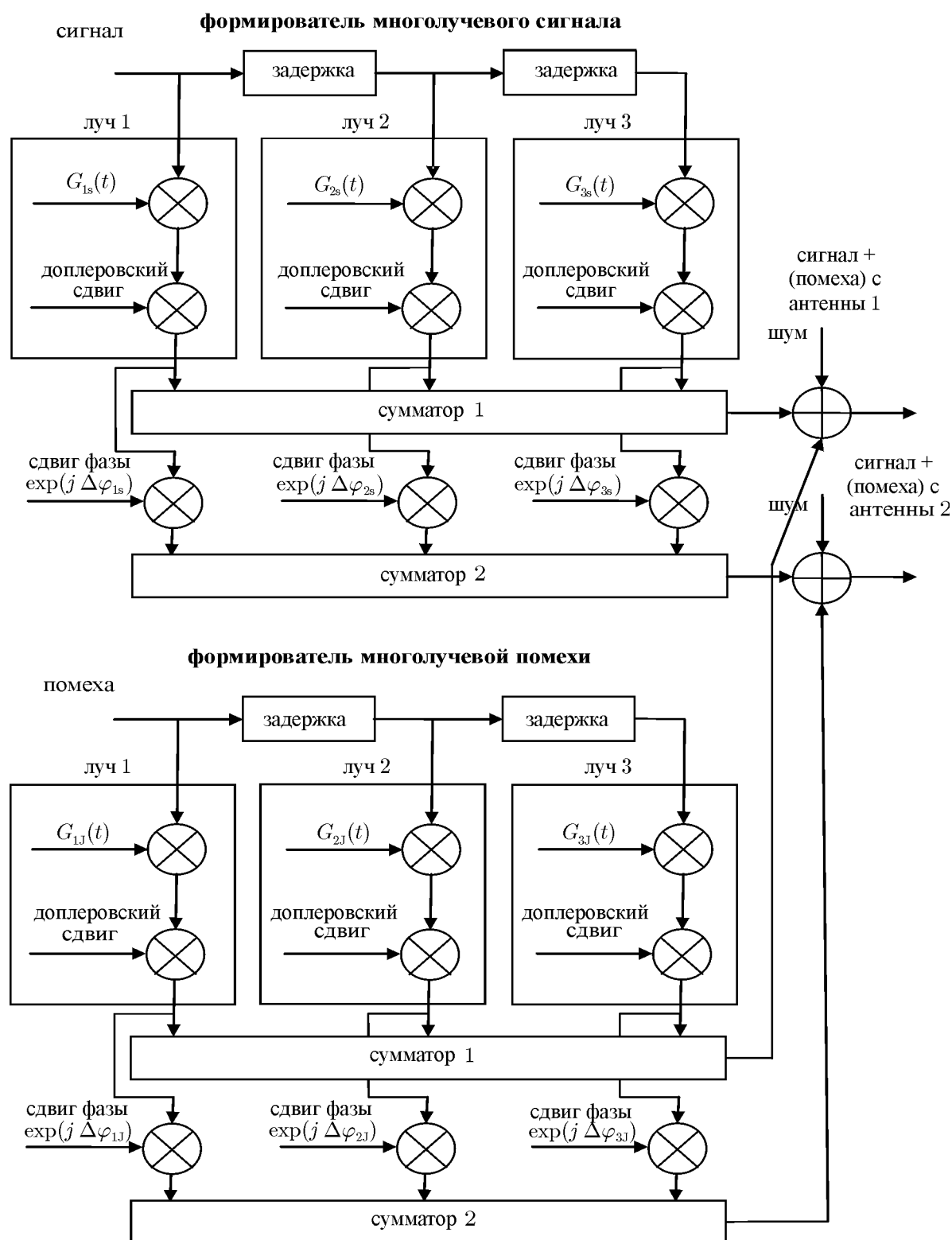


Рис. 8. Модель пространственно разнесённого приёма сигнально-помеховой смеси для трёхлучевых каналов распространения (две ветви пространственного разнесения)

два многолучевых радиосигнала складываются на двух антеннах с учётом разных межантенных набегов фаз по каждому из лучей. После этого к сигнально-помеховым смесям добавляется некоррелированный тепловой шум двух каналов приёма. Именно две такие смеси и должны поступать на входы алгоритма или устройства пространственно-временной обработки сигнала.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена модель имитатора ионосферного канала радиосвязи для пространственно разнесённого приёма, базирующаяся на известной модели Ватерсона. Для обоснования адекватности предложенной модели привлечены физические соображения и проведено сравнение результатов имитационного моделирования с полученными ранее экспериментальными результатами. Показано, что наблюдается хорошее соответствие результатов имитационных и натурных экспериментов для разных типов узкополосных коротковолновых радиосигналов. Предложенная модель правильно описывает уменьшение когерентности радиоволны на расстояниях между антеннами менее длины волны при возникновении многолучёвости в коротковолновом радиоканале, и поэтому может быть предложена к применению в качестве тестовой модели канала при разработке пространственных компенсаторов помех, а также устройств с разнесённым когерентным приёмом сигнала.

Модифицированная модель Ватерсона может использоваться при имитационном моделировании алгоритмов пространственно-временной обработки сигнала и аппаратном тестировании создаваемых устройств, использующих пространственный ресурс коротковолнового канала связи, в следующих целях [8]:

- 1) разработка алгоритмов пространственно-временной обработки сигнала и их тестирование на эффективность подавления помех и борьбы с замираниями;
- 2) определение вероятности ошибки на бит в зависимости от отношения сигнал/шум;
- 3) разработка протокола перезапроса и пакетного протокола;
- 4) разработка помехоустойчивого кодирования;
- 5) разработка алгоритмов выравнивания канала;
- 6) разработка требований к перемежению;
- 7) проверка выполнимости обмена информацией с различными скоростями передачи данных;
- 8) проверка требований к полосе частот и пригодности аппаратной платформы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решётки. Введение в теорию. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
2. Метелёв С. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, №1. С. 45.
3. Watterson C., Juroshek J., Bensema W. // IEEE Trans. Commun. Techn. 1970. V. 18, No. 6. P. 792.
4. CCIR Recommendation 520-1 19821 "Use of High Frequency Ionospheric Channel Simulators", Geneva: Int. Telecom. Union, 1995.
5. ITU-R Rec. F1487 "Testing of HF Modems with Bandwidth of up to about 12 kHz Using Ionospheric Channel Simulator". Geneva: Int. Telecom. Union, 2000.
6. Метелёв С. А., Шишкин Ю. В., Лисов А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 41, № 3. С. 403.
7. Кабаев Д. В., Львов А. В., Метелёв С. А., Шишкин Ю. В. // XVII Межд. научно-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь», 12–14 апреля 2011 г., Воронеж. Т. 2. С. 966.

8. Склад Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом «Вильямс», 2007. 1 104 с.

Поступила в редакцию 27 марта 2012 г.; принята в печать 30 апреля 2012 г.

**MODIFICATION OF THE WATTERSON MODEL OF THE IONOSPHERIC
HF RADIO COMMUNICATION CHANNEL FOR ADAPTIVE SPACED
DIVERSITY RECEPTION**

S. A. Metelev

We propose a model for formation of the signals from spaced antenna to be used as simulated ionospheric high-frequency radio channels for testing of algorithms and devices with spatiotemporal signal processing. Adequacy of the model is demonstrated by comparison of the proposed model and experimental results. The model is used to determine potential capabilities of spatial compensators of interference in a channel with scattering.