

УДК 621.391:621.396

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В ШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОКАНАЛАХ ДИАПАЗОНА УВЧ

О.Н. СКРЫПНИК, О.В. ПАТРИКЕЕВ, Н.Г. АСТРАХАНЦЕВА

Проведена сравнительная оценка эффективности алгоритмов подавления сосредоточенных по спектру помех путём моделирования широкополосного помехозащищённого радиоканала передачи дискретной информации в среде графического программирования LabVIEW.

Ключевые слова: шумоподобные сигналы, сосредоточенные помехи, моделирование, режекция помех, широкополосные системы связи, системы передачи дискретной информации.

Обеспечение эффективного управления воздушным движением невозможно без использования высоконадежных и помехозащищённых каналов связи. В настоящее время в гражданской авиации широко используются средства связи диапазонов ВЧ и ОВЧ. Диапазон ВЧ позволяет организовать дальнюю радиосвязь на расстояние до 10000 км, но скорость передачи дискретной информации ограничена высоким уровнем естественных и межстанционных помех. Диапазон ОВЧ обладает высокой пропускной способностью, обеспечивая устойчивую радиосвязь между объектами в пределах прямой видимости: до 400 км по линии «борт-земля».

Для реализации концепции «открытое небо» и автоматического зависящего наблюдения (АЗН) необходимы помехозащищённые каналы дальней и глобальной радиосвязи. Поэтому для увеличения дальности и качества связи наилучшим решением является использование космических радиолиний.

Создание помехозащищённой радиолинии с высокой пропускной способностью возможно на основе применения перспективных многопозиционных шумоподобных сигналов (ШПС) с использованием оптимальных методов их обработки и защиты от помех [1].

В настоящее время для авиационных систем спутниковой связи по линии «борт-ИСЗ-борт» выделяются частоты 1,5/1,6 ГГц УВЧ диапазона, который также используется различными узкополосными радиотехническими системами. При создании в этом диапазоне высокоскоростного широкополосного канала передачи информации такие системы будут являться источниками сосредоточенных помех, которые необходимо компенсировать (подавить) тем или иным способом.

Для анализа эффективности алгоритмов подавления сосредоточенных по спектру помех в среде графического программирования LabVIEW разработана модель канала передачи информации (рис. 1), позволяющая проводить исследования помехозащищённости широкополосных систем связи на базе платформы NI PXIe-1065 с использованием модуля NI PXIe-5610.

Модель позволяет сформировать ШПС на выбранной рабочей частоте и передать его по линии связи с заданной помеховой обстановкой. На приёмной стороне осуществляется демодуляция сигнала и подавление помех, а также оценивается степень и вероятность искажения сигнала под воздействием помех.

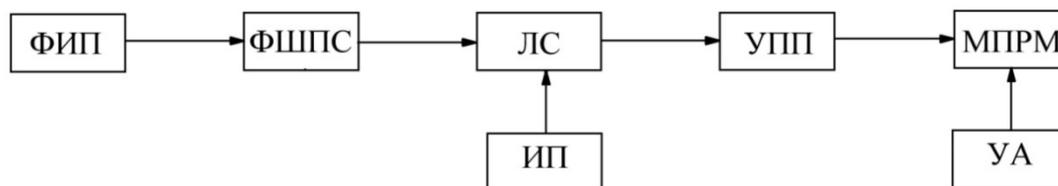


Рис. 1. Модель канала передачи информации

Формирователь информационной последовательности (ФИП) предназначен для генерации двоичных n -разрядных последовательностей, которые представляют собой символы передаваемого сообщения. В простейшем случае используется набор ортогональных последовательностей с фиксированной структурой, а для повышения криптостойкости целесообразно применение случайных циклических кодов [2].

Формирователь ШПС (ФШПС) позволяет сформировать сигнал с частотной или фазовой манипуляцией на заданной рабочей частоте. Структура и спектральные характеристики ШПС определяются видом двоичной последовательности и формой манипулирующих импульсов.

В линии связи (ЛС) на сигнал действуют аддитивные помехи. В качестве моделей источников помех (ИП) используются генератор белого гауссовского шума (естественные помехи) и генераторы квазигармонических колебаний (узкополосные помехи).

Устройство подавления помех (УПП) осуществляет подавление сосредоточенных по спектру помех путём их режекции.

Многоканальный приёмник (МПРМ) предназначен для демодуляции принимаемого сигнала и представляет собой M -канальный корреляционный приёмник. Оптимальный приём осуществляется по методу максимального правдоподобия, обеспечивающего наименьшую вероятность ошибки различения M принимаемых сигналов на фоне шумовых помех с равномерным спектром.

Устройство анализа (УА) позволяет оценивать степень искажения принимаемого сигнала при различной помеховой обстановке в линии связи и определять вероятность ошибочного приёма.

Панель управления виртуального прибора, разработанного в среде графического программирования LabVIEW для моделирования канала передачи информации, представлена на рис. 2.

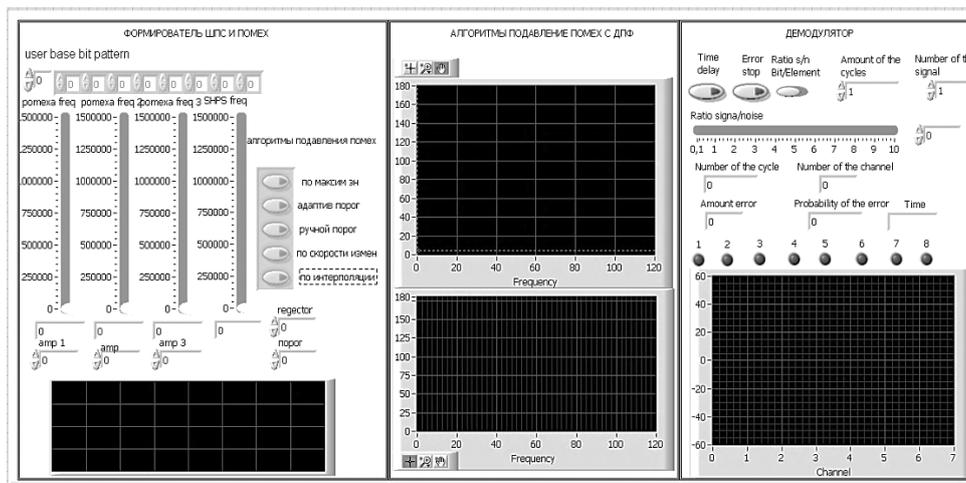


Рис. 2. Панель управления виртуального прибора

Для анализа эффективности алгоритмов подавления сосредоточенных по спектру помех в среде LabVIEW разработано несколько моделей устройства подавления помех. Структура УПП определяется используемым алгоритмом (рис. 3-6). Предполагается, что подавление помех в УПП осуществляется на высокой частоте, превышающей полосу частот, занимаемую ШПС, путём вырезания участка спектра сигнала, пораженного помехой. Для этого в каждом алгоритме осуществляется дискретное прямое преобразование Фурье (ДПФ) для перевода сигнала в частотную область и обратное преобразование Фурье (ДОПФ) для восстановления временной формы принимаемого сигнала. Алгоритмы отличаются между собой только способом обнаружения помехи, который и определяет их эффективность.

Алгоритм с адаптивным порогом. В данном алгоритме подавление помех осуществляется путём удаления спектральных составляющих, превышающих порог (рис. 3а, б).

При формировании порога определяется среднее значение амплитуды огибающей спектра смеси сигнала и помех, а также количество узкополосных помех, которое учитывается переменным поправочным коэффициентом.

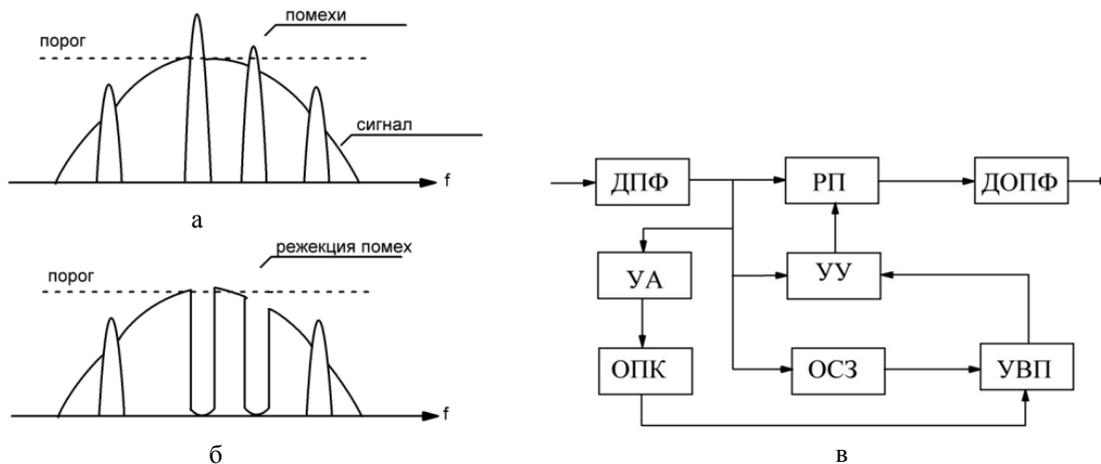


Рис. 3. Структура алгоритма с адаптивным порогом

Структура алгоритма с адаптивным порогом представлена на рис. 3в. С выхода устройства ДПФ спектральные составляющие смеси сигнала и помех поступают на входы устройства анализа (УА), режектора помех (РП) и устройства управления (УУ) режектором помех. УА обнаруживает спектральные составляющие с максимальным амплитудным значением и выдает информацию устройству определения поправочного коэффициента (ОПК) о количестве обнаруженных максимальных спектральных составляющих. Устройство ОПК вычисляет значение поправочного коэффициента. Устройство определения среднего значения (ОСЗ) формирует среднее значение огибающей спектра смеси сигнала и помех, которое поступает на устройство вычисления порога (УВП). УВП с учётом поправочного коэффициента вычисляет текущее значение порога, которое подаётся на вход УУ. В УУ производится сравнение значений амплитуд спектральных составляющих с порогом. Если значение амплитуды спектральных составляющих превышает значение порога, то принимается решение о наличии помехи, и УУ формирует управляющую команду на блок РП, который вырезает спектральные составляющие помех. Спектральные составляющие сигнала с подавленной узкополосной помехой с выхода РП поступают на блок ДОПФ, где восстанавливается исходный вид сигнала.

Алгоритм, учитывающий скорость изменения спектра. Алгоритм позволяет оценивать скорость изменения огибающей спектра смеси сигнала и помех [3]. Если разность между соседними спектральными составляющими превышает максимальное значение скорости изменения огибающей спектра, зависящего от вида ШПС (рис. 4а), то принимается решение о наличии помех и осуществляется их режекция (рис. 4б).

Структура алгоритма по скорости изменения спектра представлена на рис. 4в. На выходе устройства ДПФ формируются спектральные составляющие входной смеси сигнала и помех, которые поступают на устройство вычитания соседних спектральных составляющих (УВСС) и РП. Вычисленная разность подается на вход УУ, на другой вход УУ с выхода устройства формирования порога (УФП) поступает максимальное значение скорости изменения огибающей спектра, определяемое видом ШПС. УУ сравнивает принятые значения: если разность спектральных составляющих больше значения, полученного с УФП, то принимается решение о наличии помехи и УУ формирует команду на подавление помехи для РП. Исходный вид сигнала восстанавливается в ДОПФ.

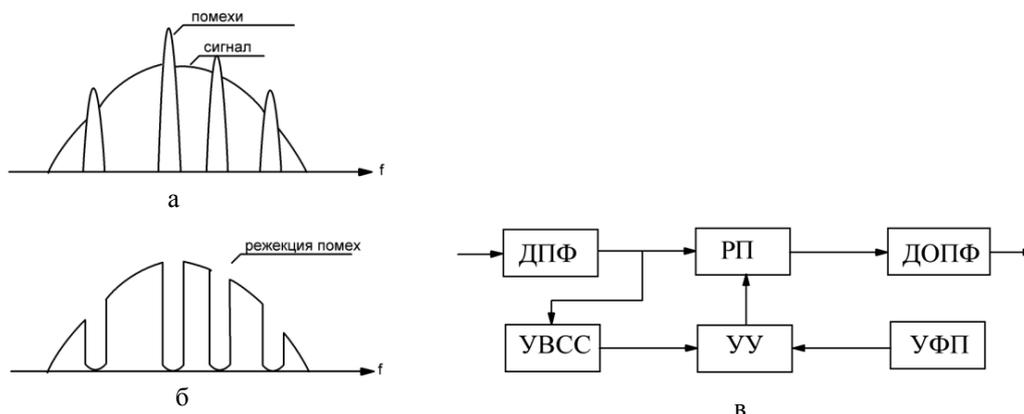


Рис. 4. Структура алгоритма по скорости изменения спектра

Алгоритм с интерполяцией огибающей спектра. При моделировании используется дискретное преобразование Фурье, следовательно, спектр имеет дискретный характер, поэтому частота синусоидальной помехи может попадать между дискретными отсчетами спектра сигнала. Это приводит к тому, что при обнаружении и вырезании помехи не происходит удаление спектральных составляющих сигнала, поражённых помехой, что в реальной ситуации невозможно и результаты моделирования будут недостоверны.

Для устранения этого недостатка используется алгоритм с интерполяцией огибающей спектра. Алгоритм позволяет сформировать разность между спектральными составляющими смеси сигнала и помех и восстановленной огибающей спектра (рис. 5а). Полученная разность спектральных составляющих сравнивается с порогом, определяется интервал зон режекции и вырезается часть спектра, поражённого помехой (рис. 5б). После этого осуществляется обратное дискретное преобразование Фурье и формируется сигнал с подавленной узкополосной помехой.

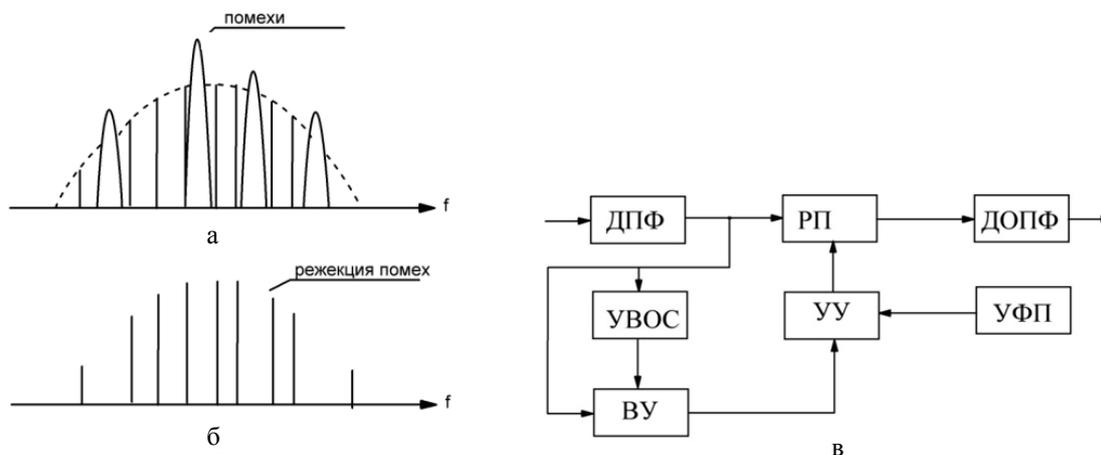


Рис. 5. Структура алгоритма с интерполяцией огибающей

Структура алгоритма с интерполяцией огибающей представлена на рис. 5в. На выходе устройства ДПФ формируется спектр смеси сигнала и помех. Амплитудные значения спектральных составляющих входного сигнала поступают одновременно на РП, устройство восстановления огибающей спектра сигнала (УВОС), которое выполняет интерполяцию спектральных составляющих сигнала, и на вычитающее устройство (ВУ). С выхода ВУ разность между спектральными составляющими смеси сигнала и помех и восстановленной огибающей спектра поступает на УУ, где происходит сравнение полученной разности с порогом, зависящим от формы спектра сигнала. УУ формирует управляющую команду РП, подавляющему спектральные составляющие помех. Далее в ДОПФ восстанавливается исходный вид сигнала.

Алгоритм с определением максимального значения спектральных составляющих. Данный алгоритм определяет максимальные амплитудные значения спектральных составляющих смеси сигнала и помех (рис. 6а). Устройство вторичной обработки формирует управляющую команду об искажении сигнала. На основании этого принимается решение о том, что максимальные спектральные составляющие являются помехами и осуществляется их режекция (рис. 6б), в результате чего формируется сигнал с подавленной узкополосной помехой.

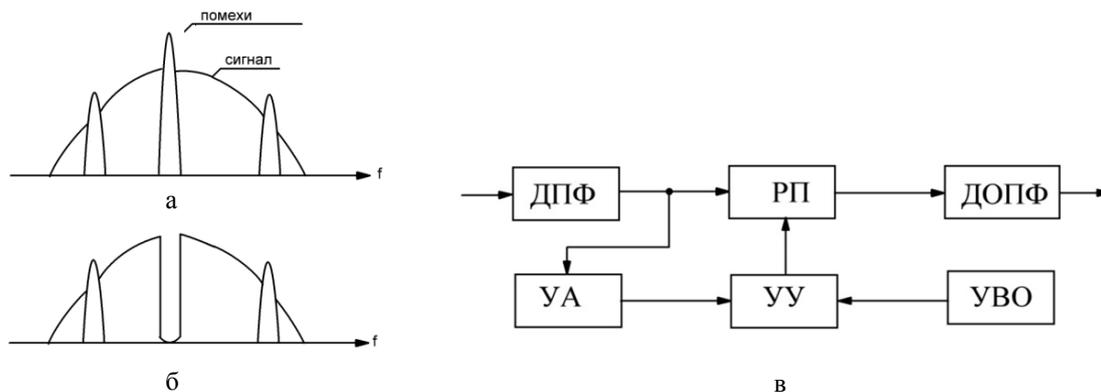


Рис. 6. Структура алгоритма с определением максимального значения спектральных составляющих

Структура алгоритма представлена на рис. 6в. Амплитудные значения спектральных составляющих входной смеси сигнала и помех с выхода ДПФ поступают в устройства анализа (УА) и на вход РП. УА обнаруживает спектральные составляющие с максимальными амплитудными значениями. С УА сигнал подаётся на первый вход УУ, а на его второй вход поступает информация об искажении сигнала от устройства вторичной обработки (УВО). УУ формирует управляющую команду режекции на блок РП, в результате чего формируется сигнал с подавленной узкополосной помехой. Спектральные составляющие с выхода РП поступают на блок ДОПФ, где восстанавливается исходный вид сигнала.

Эффективность алгоритмов исследовалась при разных значениях отношения сигнал/шум и различном количестве узкополосных помех. Результаты исследований представлены в виде зависимости вероятности ошибки принимаемого сигнала от отношения сигнал/шум и при наличии одной помехи (рис. 7). Режекция помех производилась на частотах с отклонением 5% (рис. 7а), 10% (рис. 7б), 15% (рис. 7в), 30% (рис. 7г) относительно несущей частоты сигнала. Для проверки работоспособности модели канала и сравнительного анализа эффективности алгоритмов построены зависимости вероятности ошибки принимаемого сигнала без подавления помех (кривые 6) и при отсутствии помех (кривые 3). Характер изменения вероятности ошибки принимаемого сигнала не противоречит теоретическим данным [1].

Из полученных результатов следует, что наиболее эффективными являются алгоритмы с определением максимального значения спектра (кривые 1) и адаптивным порогом (кривые 5), так как позволяют получить минимальное значение вероятности ошибки.

Худшими характеристиками обладает алгоритм, учитывающий скорость изменения огибающей спектра (кривые 2), так как неравномерный характер изменения огибающей приводит к дополнительным ошибкам при анализе. Повышение точности алгоритма возможно путём сглаживания огибающей спектра.

Для адекватной оценки работы алгоритма с интерполяцией огибающей (кривые 4) необходимо увеличить объём анализируемой информации, что приведёт к существенному усложнению программной модели и требует дополнительных исследований.

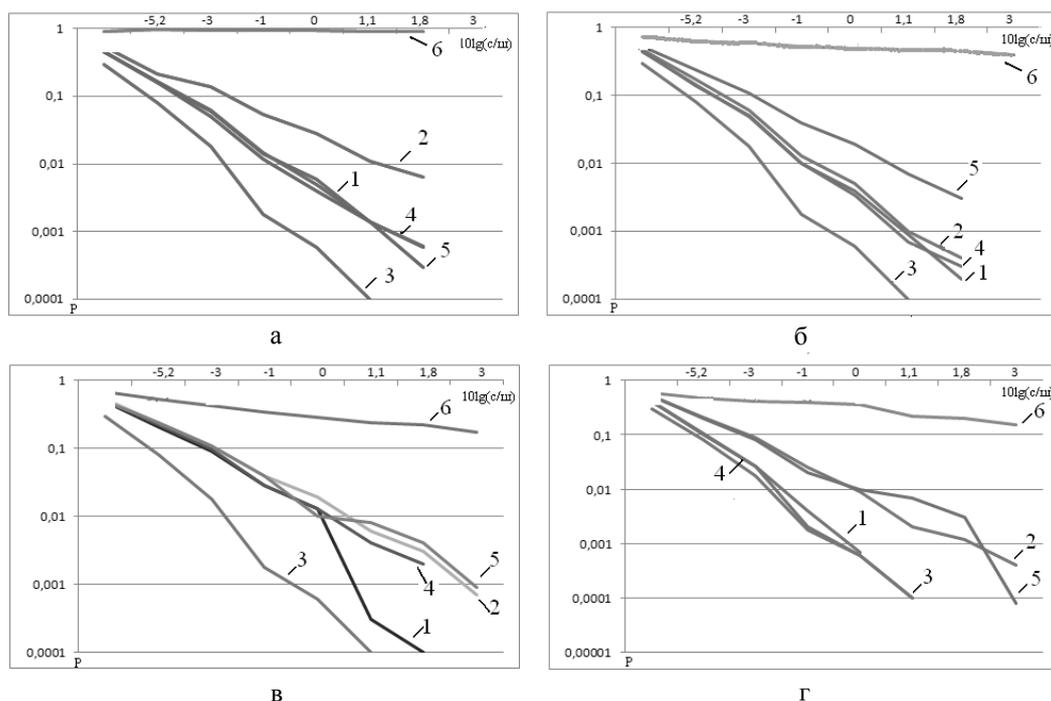


Рис. 7. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум

Эффективность подавления помех можно повысить при использовании данных алгоритмов совместно с каскадным кодированием информации и оценкой качества принимаемого сигнала на внутреннем этапе декодирования каскадного кода. В этом случае в качестве внешнего кода целесообразно использовать код Рида-Соломона над полем $GF(M)$, а в качестве внутреннего – M -ичный ШПС. M -канальный корреляционный приёмник ШПС будет выполнять функцию декодера внутреннего кода. Используя дополнительно оценку качества принимаемого ШПС и алгоритм декодирования внешнего кода с учётом стираний принимаемых символов, можно компенсировать ошибки алгоритмов подавления помех и снижение эффективности работы УПП при большом количестве помех. Также введение обратной связи с детектора качества принимаемого ШПС на устройство управления УПП позволит повысить вероятность обнаружения и подавления помех на этапе первичной обработки сигнала.

Таким образом, применение устройств и эффективных алгоритмов подавления помех позволит обеспечить высокую помехозащищённость каналов передачи информации спутниковых линий связи гражданской авиации и тем самым повысить качество управления воздушным движением по каналам дальней и глобальной радиосвязи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. - М.: Радио и связь, 1985.
2. Патрикеев О.В. Формирование случайных циклических кодов с улучшенными корреляционными свойствами // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. - Новосибирск: Наука, 1995. - Вып. 103. - С. 219 - 224.
3. Пат. 2132592 Российская Федерация, МПК 6Н 04В 1/10 А. Устройство подавления узкополосных помех / Патрикеев О.В., Парахин С.Б., Снигирёв А.Н.; патентообладатель Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище. - № 98106133/09; заявл. 30.03.1998 г.; опубл. 27.06.1999 г.

INTERFERENCE REJECTION IN WIDEBAND RADIO UHF CHANNELS

Skrypnik O.N., Patrikeev O.V., Astrakhantseva N.G.

Comparative evaluation of the effectiveness of suppression algorithms focused on the spectrum of noise by modeling the broadband noise immunity of the radio channel transmission of discrete information in the graphical programming environment LabVIEW was conducted.

Keywords: spread-spectrum signals, concentrated interference, modeling, interference rejection, broadband communication systems, transmission systems discrete information.

Сведения об авторах

Скрыпник Олег Николаевич, 1959 г.р., окончил Киевское ВВАИУ (1981), профессор, доктор технических наук, заместитель директора Иркутского филиала МГТУ ГА по учебно-научной работе, автор более 80 научных работ, область научных интересов – радионавигация, межсамолетная навигация, комплексная обработка навигационной информации.

Патрикеев Олег Викторович, 1959 г.р., окончил Киевское ВВАИУ (1981), доцент, заведующий кафедрой авиационного радиоэлектронного оборудования Иркутского филиала МГТУ ГА, автор более 50 научных работ, область научных интересов – радиосвязь, широкополосные системы связи, повышение помехозащищённости каналов передачи информации.

Астраханцева Наталья Геннадьевна, окончила Иркутский филиал МГТУ ГА (2013), аспирантка МГТУ ГА, автор 7 научных работ, область научных интересов – радиосвязь, широкополосные системы связи, радионавигация, спутниковые системы навигации.