

## К вопросу повышения пропускной способности радиотехнических систем

И.М. Лернер, Г.И. Ильин, Р.Р. Файзуллин, В.В. Кадушкин, А.В. Лопатина

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ  
420111, Российская Федерация, г. Казань  
ул. К. Маркса, 10

В работе произведен анализ фундаментальных и прикладных работ по теории информации, позволяющий оценить ее современное состояние. Выявлено, что для реальных радиотехнических систем передачи информации, пропускная способность при отсутствии шумов ограничена динамическими свойствами линейных избирательных систем, входящих в их состав. Указаны факторы, приводящие к негауссовской сигнально-помеховой обстановке и необходимости эффективно работать в нестационарных параметрических каналах современных систем связи.

*Ключевые слова:* радиотехнические системы, теория информации, пропускная способность,  $m$ -ичные сигналы, вероятностные модели случайных процессов, негауссовские помехи.

### Введение

Одной из важнейших проблем стремительно развивающейся отрасли связи является повышение пропускной способности и помехоустойчивости создаваемых радиотехнических систем передачи информации (РСПИ). Это обусловлено объективно существующей тенденцией экспоненциального возрастания объемов передаваемой информации [1]. Основной причиной такого стремительного роста является переход в ближайшие годы к новой концепции глобальной связи, которая характеризуется следующими аспектами [1]: 1) нарастающим объемом передаваемой и обрабатываемой информации (Big Data); 2) внедрением технологии Интернет вещей (Internet of Things); 3) развитием цифровых сообществ (Digital Societies); 4) распределенной экономикой (Sharing Economy).

Согласно существующей теории информации удельная пропускная способность, приходящаяся на единицу полосы пропускания ограничена только уровнем собственных шумов систем передачи информации. В работах [2–4] показано, что с уменьшением мощности шумов до нуля удельная пропускная способность систем передачи информации стремится к бесконечно большой величине. Подобная проблема также возникает и при использовании  $m$ -ичных сигналов. Однако в реальных системах передачи информации (СПИ) указанные возможности потенциально достижимой пропускной способности пока не реализованы [5; 6].

В то же время, при проектировании современных РСПИ широкое применение получили вероятностные модели случайных явлений, описываемые гауссовскими случайными величинами, векторами и процессами.

Однако, коэффициенты передачи реальных радиолоний нелинейно зависят от многих геометрических и радиофизических параметров, порождая мультипликативные помехи, а наличие многолучевости множества активных источников радиоизлучений приводит к возникновению случайных аддитивных помех. Наблюдаемые в точке приема случайные комбинации суммарных реализаций сигналов и помех, в силу как их природы возникновения, так и из-за случайной природы изменения параметров канала связи, в общем случае имеют разнообразные нестандартные распределения вероятностей, которые не описываются адекватно отдельными стандартными малопараметрическими распределениями вероятностей. Это в свою очередь в совокупности с желанием увеличить пропускную способность современных РСПИ требует поиска новых субоптимальных алгоритмов приема сигналов в сложных помеховых комплексах.

### 1. Постановка задачи

Анализ современных работ [7–10] в области проектирования современных РСПИ, показывает, что их условия работы следующие: 1) большой динамический диапазон сигналов и помех;

2) наличие канала связи с ограниченной полосой пропускания и изменяющимися у него во времени параметрами; 3) съём информации при наличии переходных процессов в линейно избирательных системах радиотракта канала связи; 4) наличие разнохарактерных помех с гауссовским и негауссовским характером распределения.

В связи с этим особую важность приобретает ряд значимых фактов современной теории информации, которые при детальном изучении противоречат друг другу:

1. В работе Р.Л. Добрушина и М.С. Пинскера [11] показано, что канал с памятью, частным случаем которого также является реальный канал с ограниченной полосой пропускания, обладает не меньшей пропускной способностью, чем при отсутствии памяти у канала.

2. Из результатов, полученных И.С. Гоноровским [12] следует, что при прохождении через интегрирующее звено сигнала с наибольшей возможной энтропией (т. е. обладающего свойством белого шума) при заданной полосе частот равной полосе пропускания фильтра, потери информации составляют 40 %. Это хорошо согласуется с результатами работы Г.И. Ильина [13], в которой доказано, что полоса пропускания усилителя системы должна выбираться с учетом ширины спектра сигнала, его динамического диапазона и требуемого качества воспроизведения.

3. Согласно результатам, полученным Ю.П. Пятошиным [14] СПИ с числом сигналов  $m = 2^{20}$  не обеспечивает потенциально лучшие характеристики по сравнению с системой, у которой  $m = 2$ , в том числе и по пропускной способности.

Вышеуказанные противоречия приводят к необходимости разработки новых методов оценки пропускной способности, в особенности каналов с памятью.

К началу 1990-х гг. в теории информации исследования реальных каналов с памятью, обусловленных межсимвольными искажениями, вызванных переходными процессами в линейных избирательных системах, проводились недостаточно активно [15; 16]. Согласно мнению S. Yang, изложенного в диссертации [16], защищенной в Гарварде в 2004 г., это обусловлено большой сложностью исследования таких каналов.

Тем не менее с момента создания теории информации до 1990 г. можно отметить ряд работ [17–23], в которых были получены результаты

по оценке пропускной способности реальных каналов. Однако в работах [18–23] предложенные методы оценки пропускной способности приводят к бесконечно большой величине при уменьшении мощности шума до нуля. При этом ограничения вводимые авторами в ряде работ носят качественный, а не количественный характер.

Единственной работой, где получены аналитические оценки пропускной способности, принимающие конечные значения при отсутствии шума для ряда реальных каналов связи с ограниченной полосой пропускания, при использовании сигналов с амплитудно-импульсной модуляцией является работа [17].

Значительный прогресс в исследовании каналов связи с памятью, в которых присутствуют межсимвольные искажения наблюдается с начала 1990 г. Это обусловлено: во-первых, созданием близких друг к другу численных методов оценки пропускной способности тремя независимыми научными группами [24–26] с последующим их обобщением на каналы с бесконечной памятью [10] и дальнейшим их применением к анализу реальных каналов с памятью различной природы [27–30]. В то же время данные методы не лишены недостатков. Так первый из представленных методов в работе [24] и развитый в последствии в работе [10] ограничен возможностью применения только к каналам, на входе и выходе которых информационные процессы являются стационарными и эргодическими. Однако современные РСПИ работают в явно выраженном динамическом режиме, поскольку информационный процесс на выходе избирательных систем, входящих в их линейные радиотракты, является нестационарным, что следует из анализа результатов работ [7; 31; 32]. Второй из методов является дополнением первого, с указанием на способ достижения полученной оценки первым методом за счет кодирования. Недостатком метода, представленного в работе [25], является возможность его применения только к бинарным сигналам, что не позволяет его использовать для современных РСПИ, применяющих  $m$ -ичные радиосигналы [8]. Представленный в работе [26] метод оценки пропускной способности обладает тем же недостатком, что и работы более раннего периода [18–23], который заключается в том, что пропускная способность стремится к бесконечно большой величине при мощности шума, стремящегося к нулю.

Указанные методы оценки пропускной способности были развиты для случая двумерного ка-

нала [33], с теми же ограничениями, что и для 1-го метода из работы [24].

Наиболее поздней в данном направлении является работа [34], в которой представленный численный метод отличается от тех, что приведены в работах [24–26]. Несмотря на новизну, данный метод обладает тем же недостатком, что [26], который был выявлен при определении пропускной способности канала с памятью в отсутствие шума для передачи информации, использующего  $m$ -ичные сигналы. При этом память источника и памяти являются одинаковыми и представляют цепь Маркова. Авторами особенно подчеркивается наличие разрыва в оценке пропускной способности (проблема описана в [20]) при переходе от ситуации, когда шумы отсутствуют, к ситуации, когда они присутствуют, в этом случае происходит переход от значения оценки, принимающей бесконечно большое значение к оценке, принимающей конечное значение. К таким же результатам приводит работа [16].

Также в этот период рядом исследователей были получены результаты в области аналитических оценок нижней и верхней границы пропускной способности реальных каналов связи [35–37]. Однако их применение приводит к разрывам в оценки пропускной способности.

Хотя в работе [36] и получена одна из оценок, имеющая конечную величину, которая по мнению авторов является наиболее точной при стремлении отношения сигнал – шум ( $C/I$ ) к бесконечности за счет стремления мощности шума к нулю. Но разрывы в оценке пропускной способности также возникают по причине того, что каждая из полученных методик оценки справедлива только для своего диапазона изменений соотношения сигнал-шум, однако при этом количественные рекомендации применения методик оценки в зависимости от диапазона изменения  $C/I$  не представлены. Авторами работы [36], также производится попытка найти решение проблемы, изложенной в [20], что в очередной раз указывает на актуальность ее разрешения.

В связи с этим интересен ряд фактов, изложенных в отечественной литературе, которые относятся к современной теории информации. Так в работе М.В. Литвина [38] указано на неточность доказательства фундаментальной теоремы К. Шеннона для пропускной способности в присутствии шума [2], замеченное А.А. Хар-

кевичем [39], и исправленное им в работе [40]. Однако М.В. Литвин [38] оппонирует доводам, которые использует А.А. Харкевич для обоснования доказательства К. Шеннона о том, что возникшие неточности взаимно компенсируют друг друга, доказывая при этом обратное.

Неотъемлемой частью проблемы повышения пропускной способности РСПИ, является задача повышения их помехоустойчивости. Исходя из условий работы современных РСПИ можно прийти к выводу, что применяемые в настоящее время модели на основе вероятностных смесей распределений [41–43] используют компоненты с постоянными параметрами.

Дальнейшее повышение эффективности широкополосных РСПИ требует использования моделей сигнально-помеховой обстановки (СПО), описывающих реальную негауссовость каналов. Для этих целей представляется конструктивным более широкое использование смесей случайных явлений (процессов).

Так, для описания СПО радиосистем эффективно применяется полигауссова модель общего вида [41]. Ее основным достоинством является инвариантность к линейным преобразованиям при возможности единообразного описания сколь угодно сложных флуктуаций сигналов и помех, ограниченных лишь условием физической реализуемости последних [44], в виде смеси из  $N$  гауссовых компонент.

Платой за столь высокую универсальность является высокая размерность гауссовых компонент и большое число компонент в смеси по показательному закону, зависящее от объема передаваемой информации и количества компонент, требуемых для описания негауссовости канала.

Динамика работы системы в этих моделях описывается за счет задания связей между отдельными гауссовыми компонентами, например, с использованием цепей Маркова в классе марково-смешанных-полигауссовских (МС-ПГ) моделях [45].

Синтез алгоритмов приема на базе таких моделей требует применения большого количества гауссовых компонент для перекрытия всего диапазона изменений амплитуд и фаз. Некоторое упрощение алгоритмов может быть получено путем отказа от учета фазы сигналов. Однако исключение фазы сигнала приведет к замене распределения Гаусса на распределение Райса, которое не является инвариантным к линейным преобразованиям, а также к потере информа-

ции, содержащейся в фазе сигнала, что неизбежно ухудшит эффективность системы в целом [9; 46].

Кроме того, аналитическое описание распределения компонент для движущихся абонентов потребует дополнительного увеличения количества вероятностных компонент для учета изменений энергии лучей. Для оценки параметров сигналов в динамических системах широко используются методы нестационарной фильтрации [8], базирующиеся на теории марковских процессов. При этом параметры сигналов представляются элементами гауссово-марковских нестационарных последовательностей, используемых для описания нестационарности канала связи методы линейного предсказания, основанные на математическом аппарате авторегрессии, в частности, фильтр Калмана [9].

Эффективность применения указанных методов для нелинейных процессов сильно зависит от точности линеаризации реальных характеристик предсказания, которые сильно зависят от интервала наблюдения.

Проведенный в [47; 48] анализ применимости фильтра Калмана для предсказания параметров канала, описанных полигармонической моделью Джейкса для узкополосного беспроводного канала движущегося объекта [49], показывает наличие существенной погрешности оценки, не убывающей в процессе работы алгоритма приема. На основании полученных результатов авторами [47] предлагается новый алгоритм оценки комплексного множителя канала на основе модели Джейкса, параметры которой оцениваются с помощью фильтра Калмана.

Модель позволяет оценить комплексный множитель канала, который является результатом интерференции нескольких лучей, которые для узкополосных систем принципиально неразличимы. Для широкополосных систем измерение параметров проводится для каждого из лучей отдельно.

Модель Джейкса описывает затухания в канале фактически на одной частоте. Для широкополосных сигналов фазы интерферирующих сигналов на разных частотах будут отличаться. Разным будет и результат интерференции. Поэтому влияние интерференции на системы существенно меньше влияния временной задержки, которая моделью Джейкса не учитывается.

Проведенный в [9] анализ показал негауссовость реальных распределений реализаций

сигналов на входе приемных устройств широкополосных РСПИ. Поэтому применяемое в настоящее время описание СПО моногауссовыми вероятностными моделями не позволяет достичь потенциальных характеристик для класса современных беспроводных систем.

## 2. Решение

На основании вышеизложенного возникает необходимость создания объективного метода оценки пропускной способности современных реальных РСПИ, использующих  $m$ -ичные радиосигналы и работающих в условиях канала с памятью, обусловленного наличием межсимвольных искажений в линейных избирательных системах РСПИ.

Решение данной проблемы целесообразно производить с использованием подхода Г.И. Ильина [13; 50], на основании которого был получен ряд оценок пропускной способности реальных радиотехнических и оптоэлектронных измерительных систем, использующих видео импульсные сигналы, а также предложены пути их совершенствования для достижения более высокого значения пропускной способности.

Согласно работам Г.И. Ильина [13; 50] пропускная способность является величиной ограниченной в отсутствии шумов и помех, и определяется динамическими характеристиками радиотехнических систем, а также качеством воспроизведения сигнала на выходе избирательных систем, присутствующих в РСПИ.

Положения данной теории были развиты в работе [31] для ФМн- $n$ -сигналов, в результате были получены аналитические оценки пропускной способности для настроенных  $p$ -каскадных резонансных фильтров.

Снижение размерности гауссовских компонент возможно при переходе к МС-ПГ моделям [51–53]. Оно осуществляется за счет ограничения описания полигауссовской смесью лишь реализаций сигнала в пределах одного кодового символа. Учет взаимосвязи реализаций сигналов различных кодовых символов обеспечивается за счет рассмотрения эффекта памяти. Так как эффект памяти ограничен во времени, то он может быть описан с использованием цепи Маркова.

Предположение о линейности канала связи позволяет представить реализации сигналов на входе приемного устройства, как результат интерференции реализаций случайного набора

элементарных сигналов отдельных источников, и тем самым сократить количество компонент в смеси. Такой метод описания лежит в основе суммарно-смешанной полигауссовкой (ССПГ) модели [54].

Однако во всех этих моделях параметры гауссовских компонент смеси оставались неизменными. В мобильных системах связи, имеющих большой динамический диапазон, это ограничение приводит к тому, что для адекватного описания СПО необходимо описывать распределение каждого элементарного сигнала смесью из большого количества гауссовских компонент. Поскольку это количество является основанием в показательном законе, описывающем количество компонент в итоговой смеси, оно сильно влияет на сложность алгоритмов, синтезируемых на базе любых полигауссовских (ПГ) моделей. Кроме того, для корректного отслеживания взаимосвязей компонент смеси в МС-ПГ моделях необходимо применять цепи Маркова высоких порядков [51]. Полученные МС-ПГ модели имеют большое количество параметров, определение которых, в присутствии мобильных систем связи условиях априорной неопределенности, является отдельной сложной научно-технической задачей.

Другим методом снижения числа компонент смеси является переход к использованию в ПГ модели компонент с переменными параметрами, количество которых соответствует лишь возможным случаям «быстрых» замираний в канале. «Медленные» замирания в этом случае должны учитываться изменением значений параметров самих компонент.

Фактически переход к вероятностным смесям с компонентами, имеющими переменные значения параметров, приводит к переходу на новый качественный уровень смешивания. Действительно, компонента смеси с переменными параметрами может быть представлена, как смесь компонент с фиксированными параметрами или смесь марковских процессов.

Таким образом, основной задачей исследования на этом этапе является разработка методов и алгоритмов оценивания параметров компонент для такого подкласса.

## Заключение

1. В современной теории информации, полученные в процессе многочисленных исследований оценки пропускной способности для каналов

с памятью, должным образом не учитывают реальные ограничения и свойства каналов связи в современных РСПИ.

2. Оценка пропускной способности современных РСПИ должна быть произведена с учетом динамического диапазоны сигналов и помех, а также разрешающего времени линейных избирательных систем, входящих в их состав.

3. Для адекватного аналитического описания произвольных шумов и помех необходимо использовать новый инструментарий смесей вероятностных распределений, намного более полно учитывающий многообразие вероятностных распределений результирующих случайных процессов и полей в параметрических каналах РСПИ.

## Список литературы

1. The mobile economy 2016 / GSM Assosiation. L.: GSMA. 2016. 60 p. URL: <https://www.gsmaintelligence.com/research/?file=97928efe09cdba2864cdcf1ad1a2f58c&download> (дата обращения: 21.11.2016)
2. Shannon C.E. Communication in the presence of noise // Proc. Institute of Radio Engineers. 1949. Vol. 37. № 1. P. 10–21.
3. Shannon C.E. A mathematical theory of communication // Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27. P. 379–423, 623–656.
4. Прелов В.В. Асимптотика пропускной способности непрерывного канала с малым аддитивным шумом // Проблемы передачи информации. 1969. Т. 5. № 2. С. 31–36.
5. Мордвинов А.Е. Исследование возможности повышения частотной эффективности линий связи за счет использования сигналов с взаимной интерференцией символов: дис. ... канд. техн. наук. МЭИ(ТУ). 2008. 151 с.
6. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов. М.: Сов. радио, 1978. 304 с.
7. Золоторев И.Д., Миллер Я.Э. Переходные процессы в колебательных системах и цепях. М.: Радиотехника, 2010. 301 с.
8. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. М.: Радио и связь, 2000. 530 с.
9. Козлов С.В. Новые смесевые подходы к проектированию радиоинтерфейса систем связи. Казань: Новое знание, 2014. 132 с.
10. Simulation-based computation of information rates for channels with memory / D. Arnold [et al.] // IEEE Trans. Inf. Theory. 2006. Vol. 52. № 8. PP. 3498–3508.
11. Добрушин Р.Л., Пинскер М.С. Память увеличивает пропускную способность // Проблемы передачи информации. 1969. Т. 5. № 1. С. 94–95.
12. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. Ч. 1. М.: Советское радио, 1967. 430 с.

13. Ильин Г.И. Информационные потери при прохождении сигналов через систему с ограниченной полосой пропускания // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 1997. № 1. С.83–85.
14. Пятошин Ю.П. Некоторые свойства  $m$ -ичных систем связи с кодированием // Проблемы передачи информации. 1968. Т. 4. № 1. С. 45–51.
15. Verdú S. Fifty years of Shannon theory // IEEE Trans. 1998. V. IT-44. № 6. P. 2057–2078.
16. Yang S. The Capacity of Communication Channels with Memory / A thesis on Doctor of Philosophy in the subject of Engineering Sciences. Harvard University. 2004. 126 p.
17. Sunde E.D. Theoretical fundamentals of pulse transmission II // The Bell System Technical Journal. 1954. P. 987–1010.
18. Gallager R.G. Information Theory and Reliable Communication. N.-Y.: Wiley, 1968. 588 p.
19. Holsinger J.L. Digital communication over fixed time-continuous channel with memory with special application to telephone channels // Tech. Rep. 430 Mit Res. Lab. Electron. 1964. 130 p.
20. Cover T.M., Thomas J.A. Elements of Information Theory. N.-Y.: Wiley, 1991. 542 p.
21. Цыбаков Б.С. О пропускной способности дискретного по времени гауссовского канала с фильтром // ППИ 1970. Т. 6. Вып. 3. С. 78–82.
22. Овсеевич И.А., Пинскер М.С. Оценка пропускной способности канала связи, параметры которого являются случайными функциями времени // Радиотехника. 1957. Т. 12. № 10. С. 40–45.
23. Овсеевич И.А., Пинскер М.С. Оценка пропускной способности некоторых реальных каналов связи // Радиотехника. 1958. Т. 13. № 4. С. 15–25.
24. Pfister H.D., Soriaga J.B., Siegel P.H. On the achievable information rates of finite-state ISI channels // Proc. IEEE GLOBECOM. 2001. P. 2992–2996.
25. Arnold D., Loeliger H.-A. On the information rate of binary-input channels with memory // Proc. IEEE Int. Conf. Communications. 2001. P. 2692–2695.
26. Sharma V., Singh S.K. Entropy and channel capacity in the regenerative setup with applications to Markov channels // Proc. IEEE Int. Symp. Information Theory. 2001. P. 283.
27. Zhang Z., Duman T.M., Kurtas E.M. Information rates of binary-input intersymbol interference channels with signal-dependent media noise // IEEE Trans. Magn. 2003. Vol. 39. № 1. P. 599–607.
28. Zhang Z., Kurtas E.M. Achievable information rates and coding for MIMO systems over ISI channels and frequency-selective fading channels // IEEE Trans. Commun. 2004. Vol. 52. № 10. P. 1698–1710.
29. Optimal code rates for the Lorentzian channel: Shannon codes and LDPC codes / W.E. Ryan [et al.] // IEEE Trans. Magn. 2004. Vol. 40. № 6. P. 3559–3565.
30. Pighi R., Raheli R., Cappelletti F. Information rates of multidimensional front-ends for digital storage channels with data-dependent transition noise // Proc. 2005 IEEE Int. Symp. Information Theory. 2005. P. 1343–1347.
31. Lerner I.M., Il'in G.I. Capacity of  $p$ -cascade tuned filter with an impact PSK- $n$ -signal // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) 39281 Proceedings. Part 1 Vol. 1. P. 443–447.
32. Lerner I.M., Il'in G.I. The analysis of the transient process caused by a jump in the amplitude and phase of radio pulse at the input of narrowband linear system // Journal of Communications Technology and Electronics. 2012. Vol. 57. № 2. P. 174–188.
33. Shental O., Shental N., Shamai (Shitz) S. On the achievable information rates of finite-state input two-dimensional channels with memory // Proc. 2005 IEEE Int. Symp. Information Theory. 2005. P. 2354–2358.
34. A generalization of the Blahut-Arimoto algorithm to finite-state channels / P.O. Vontobel [et al.] // IEEE Trans. Inf. Theory. 2008. Vol. 54. № 5. P. 1887–1917.
35. Shamai (Shitz) S., Ozarow L.H., Wyner A.D. Information rates for a discrete-time Gaussian channel with intersymbol interference and stationary inputs // IEEE Trans. Inf. Theory. 1991. Vol. 37. № 6. P. 1527–1539.
36. Shamai (Shitz) S., Laroia R. The intersymbol interference channel: Lower bounds on capacity and channel precoding loss // IEEE Trans. Inf. Theory. 1996. Vol. 42. № 5. P. 1388–1404.
37. Xiang W., Pietrobon S.S. On the capacity and normalization of ISI channels // IEEE Trans. Inf. Theory. 2003. Vol. 49. № 9. P. 2263–2268.
38. Литвин М.В. О пропускной способности канала связи и его геометрическом представлении // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2012. № 1 (1). С. 49–55.
39. Шеннон К. Связь при наличии шума // Сб. переводов «Теория информации и ее приложения» / под ред. А.А. Харкевича М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1959. С. 82–113.
40. Блох Э.Л., Харкевич А.А. К вопросу о геометрическом доказательстве теоремы Шеннона // Радиотехника. 1956. Т. 11. № 11. С. 5–16
41. Чабдаров Ш.М. О полигауссовом приближении в задачах теории связи // V Конференция по теории кодирования и передачи информации. Тез. док. Всесоюзной конференции. Москва – Горький. 1972. С. 137–141.
42. Дороднов А.А., Чабдаров Ш.М. О полноте системы гауссовых функций и полигауссовых приближениях в радиотехнике // Радиотехника. 1975. № 7. С. 1–8.
43. Чабдаров Ш.М., Трофимов А.Т. Полигауссовы представления произвольных помех и прием дискретных сиг-

- налов // Радиотехника и электроника. 1975. Т. 20. № 4. С. 734–735.
44. Айвазян С.А., Бежанова З.И., Староверов О.В. Классификация многомерных наблюдений. М.: Статистика, 1974. 238 с.
45. Надеев А.Ф. Марково-смешанные полигауссовы вероятностные модели случайных процессов // Телекоммуникации. 2000. № 1. С. 2–5.
46. Устройство для декодирования импульсно-временных сигналов / С.В. Козлов [и др.]. Патент РФ на изобретение № 2028732 от 09.02.95.
47. Кондрашова С.Ф., Крейнделина В.Б. Полигармоническая фильтрация комплексного множителя канала в системах подвижной радиосвязи // Электросвязь. 2007. № 5. С. 49–51.
48. Крейнделин В.Б. Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи. М.: «Линк», 2009. 272 с.
49. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / под ред. У.К. Джейкса; пер. с англ. под ред. М.С. Ярлыкова, М.В. Черникова. М.: Связь, 1979. 520 с.
50. Ильин Г.И., Польский Ю.Е. Динамический диапазон и точность радиотехнических и оптоэлектронных измерительных систем // Итоги науки и техники. Сер. Радиотехника. 1989. Т. 39. С. 67–114.
51. Надеев А.Ф. Марково-смешанные модели в теории обработки многоэлементных сигналов при комплексе помех: автореф. дис. ... доктора физ.-мат. наук. КГУ, 2000. 31 с.
52. Поликорреляционная обработка сигналов перспективных систем подвижной радиосвязи / Ш.М. Чабдаров [и др.] // Телекоммуникации. 2005. № 1. С. 27–31.
53. Алгоритмы и спецпроцессоры обработки сигналов в радиоприемниках САЭО / Ш.М. Чабдаров [и др.] // Радиотехнические устройства и системы. Межвузовский сб. научных трудов КГТУ им. А.Н. Туполева. Казань: КГТУ им. А.Н. Туполева, 1996. С. 4–16.
54. Чабдаров Ш.М., Надев А.Ф. Об алгоритмическом обеспечении радиотехнических систем при мультипликативно-аддитивных помехах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2007. Т. 10. № 5. С. 39–41.

---

## The problem of capacity increase for radioengineering systems

*I.M. Lerner, G.I. Il'in, R.R. Fayzullin, V.V. Kadushkin, A.V. Lopatina*

The article provides analysis of fundamental and applied studies that allows to evaluate the present-day state of information theory. It is revealed that the capacity of real radio-engineering data transmission systems in the absence of noise is limited by the dynamic properties of its linear selective chains. It is also shown what leads to non-Gaussian signal-plus-interference radioenvironment and necessity of effective operation in nonstationary parametric channels of the contemporary telecommunication systems.

*Keywords:* radio-engineering systems, information theory, capacity, m-ary signals, probabilistic models of random process, non-Gaussian interference.

---