

цифровым преобразованием // Технология машиностроения. 2002. № 5. С. 33–39.

24. Оптические характеристики Al_2O_3 (сапфир — искусственный корунд) // Сайт ARD-Optics. URL: <http://rus.ardoptics.com/material/sapphire-artificial-corundum.html> (дата обращения: 18.02.2018).

25. Баходдин С. И., Галактионов Е. В., Тропп Э. А. Расчет термических напряжений в профилированных монокристаллах при учете температурной зависимости теплового расширения // Журнал технической физики. 2010. Т. 80, вып. 11. С. 1–5.

ЛЕУН Евгений Владимирович, кандидат технических наук, ведущий инженер АО «НПО Лавочкина».

ЛЕУН Владимир Исидорович, доктор технических наук, профессор секции «Метрология и приборо-

строение» кафедры «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология» Омского государственного технического университета.

ШАХАНОВ Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, начальник отдела АО «НПО Лавочкина».

Адрес для переписки: stankin1999@mail.ru

Для цитирования

Леун Е. В., Леун В. И., Шаханов А. Е. Метрологический анализ лазерных приборов активного контроля размеров изделий с использованием корундовых наконечников // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 98–104. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-98-104.

Статья поступила в редакцию 19.02.2018 г.

© Е. В. Леун, В. И. Леун, А. Е. Шаханов

УДК 621.391.8

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-104-109

Г. М. СИДЕЛЬНИКОВ
Д. В. ОГНЕВ

Сибирский
государственный университет
телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ РАЗНЕСЕННОГО ПРИЕМА СИГНАЛОВ С ФАЗОВОЙ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ В КАНАЛАХ С МНОГОЛУЧЕВОСТЬЮ

Рассматривается помехоустойчивость разнесенного приема сигналов с фазовой (ФМ) и относительной фазовой модуляцией (ОФМ) в каналах с многолучевостью при действии аддитивной гауссовской помехой. В основу анализа помехоустойчивости положено рассмотрение деформации сигнальных расстояний из-за многолучевости, где второй луч представлял совокупность многих других лучей. Подробный анализ необходим для определения предельной помехоустойчивости, разных видов модуляции в системах с разнесением. Полученные зависимости сигнальных расстояний от тонкой структуры многолучевого поля позволяют определить эффективность разнесенного приема сигналов с ФМ и ОФМ в каналах со многолучевостью при действии аддитивной гауссовской помехи.

Ключевые слова: многолучевое поле, сигнальное расстояние, потенциальная помехоустойчивость, вероятность ошибок.

Введение. Системы передачи информации с пространственным разнесением сигналов рассматривались как в отечественной [1], так и в зарубежной литературе [2]. Свое дальнейшее развитие они получили после работ Аламоути [3], где предложена была схема разнесения сигналов на передающей стороне, которая возможна при математической обработке сигналов в реальном времени [4].

При анализе эффективности систем с пространственным разнесением на приемной стороне рассматривалось сложение, максимизирующее отношение сигнал — шум сигналов, автовыбор и сло-

жение с равными весам [5]. Обработка в схеме сложения сигналов производилась на основе анализа принимаемого сигнала.

Для систем передачи информации помехоустойчивость выбранного ансамбля сигналов полностью определялась сигнальным расстоянием, которое характеризовало помехоустойчивость системы в целом [6].

С увеличением кратности модуляции и использовании каналов с селективными замираниями повышение помехоустойчивости требовало использование пилот-сигналов [7], что позволяло

увеличивать количество информации о сигнале и достичь минимальной вероятности ошибки.

Анализ помехоустойчивости сигналов с дискретными видами модуляции в каналах с селективными замираниями рассмотрен в работе [8]. Более подробный анализ помехоустойчивости разнесенного приема сигналов с дифференциальной фазовой и частотной модуляции приведен в работе [9]. В этих работах анализ производился на основе системных функций, которые не позволяют учесть тонкую структуру многолучевого поля, с другой стороны, они не позволяют получить предельно возможную помехоустойчивость демодуляторов сигналов.

Иной подход рассмотрен в [10], где на основе векторной алгебры анализируется деформация сигнальных созвездий в канале с многолучевостью, что даёт возможность получить кривые потенциальной помехоустойчивости для любых задержек и амплитуд отраженных сигналов с учетом их фаз в месте приема. Это позволяет провести анализ систем с разнесением при когерентном сложении лучей.

Сигналы с ФМ требуют специальных пилот-сигналов, несущих информацию о передаче «1» символа, или кодов, устраняющих обратную работу опорных генераторов на приеме. Сигналы с ОФМ за счет перекодирования на передаче и на приеме сигналов не зависят от обратной работы генераторов. Их объединяет тот факт, что решающее устройство принимает решение о передаче того или иного символа в результате обработки на одном тактовом интервале. Сигналы с дифференциальной фазовой модуляцией (ДФМ) отличаются от ОФМ методом приема, где решение о передаче символов производится при обработке на двух тактовых интервалах до решающего устройства. Перечисленные особенности формирования и определяют деформацию сигнальных расстояний в системах с разнесением в многолучевых каналах [11].

Целью данной работы является определение эффективности применения сигналов ФМ, ОФМ, ДФМ в системах с разнесением на основе рас-

смотрения изменения сигнальных расстояний в каналах с предельной многолучевостью.

1. Деформация сигнальных созвездий для системы с разнесением. Рассмотрим преобразование сигнального расстояния системы с пространственным разнесением на приеме для сигналов с фазовой модуляцией.

Для фазовой модуляции (рис. 1) сигнальное расстояние для разнесенного приема (когерентным сложением лучей от двух антенн (порядок разнесения $M=2$) [3], определенное как расстояние от конца суммарного вектора до границы принятия решения, равно:

$$\Delta S_n = A_n^\Sigma \cos(\Delta Q_n), \quad (1)$$

где на основе векторной алгебры [10] амплитуды A_n^Σ , дополнительный сдвиг фаз ΔQ_n для различных комбинаций посылок, рассчитываются на основании выражений (2) – (4).

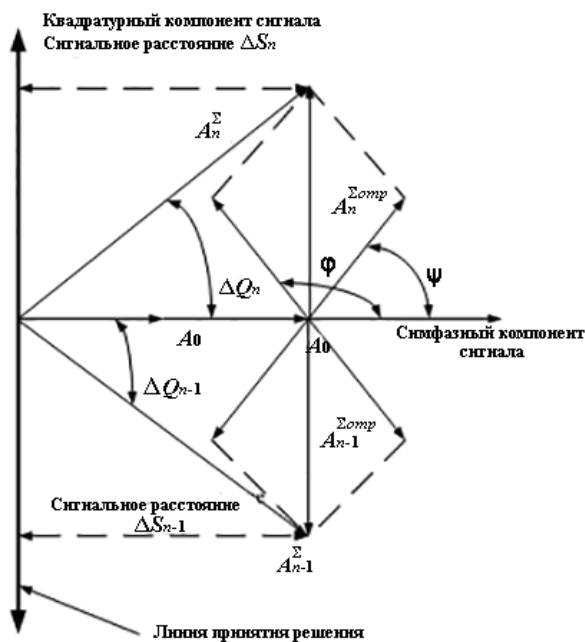
Суммарный вектор на n -ой посылке рассчитывается:

$$A_n^\Sigma = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2}, \quad \Delta Q_n = \arctg \frac{X_n}{Y_n}. \quad (2)$$

Синфазные X_n квадратурные Y_n составляющие сигнала:

$$\begin{aligned} X_n = & 2 \sin \varphi_n + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T}\right) \sin(\varphi_n + \varphi_0) + \\ & + \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T}\right) \sin(\varphi_{n-1} + \varphi_0) + \\ & + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T}\right) \sin(\varphi_n + \psi) + \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T}\right) \sin(\varphi_{n-1} + \psi). \quad (3) \end{aligned}$$

$$Y_n = 2 \cos \varphi_n + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T}\right) \cos(\varphi_n + \varphi_0) +$$



$$+ \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T} \right) \cos(\varphi_{n-1} + \varphi_0) + \\ + \frac{A_3}{A_0} \left(1 - \frac{\tau_3}{T} \right) \cos(\varphi_n + \psi) + \frac{A_3}{A_0} \left(\frac{\tau_3}{T} \right) \cos(\varphi_{n-1} + \psi), \quad (4)$$

где τ_3 — величина задержки запаздывающего сигнала; φ_n — информационная фаза сигнала на n -ой посылке; ψ — фаза задержанного сигнала на первой антенне; φ_i — фаза задержанного сигнала на второй антенне.

Таким образом, сигнальное расстояние зависит от параметров, входящих в выражения (3, 4), при этом амплитуды и задержки отраженных лучей принимаются равными по величине.

Как видно из формул (2)–(4), сигнальное расстояние (1) определено как относительное сигнальное расстояние, то есть, по отношению к однолучевому каналу: $\Delta S_n = \frac{\Delta S_n^\Sigma}{\Delta S_n^0}$, где ΔS_n^Σ — сигнальное расстояние для двухлучевого канала, а ΔS_n^0 — для однолучевого канала.

Для ОФМ (рис. 1) сигнальным расстоянием является наименьшее расстояние на соседних посылках, так как вероятность ошибки на этом расстоянии максимальна:

$$\min(\Delta S_n, \Delta S_{n-1}). \quad (5)$$

Для ДОФМ дифференциальной фазовой модуляции (рис. 2) относительное сигнальное расстояние, которое определено в [10], представляется как:

$$\Delta S = \frac{A_n^\Sigma A_{n-1}^\Sigma \cos \Delta Q}{\sqrt{(A_n^\Sigma)^2 + (A_{n-1}^\Sigma)^2 + 2A_n^\Sigma A_{n-1}^\Sigma \sin \Delta Q}}, \quad (6)$$

где $\Delta Q = \Delta Q_n - \Delta Q_{n-1}$, A_n^Σ , A_{n-1}^Σ рассчитываются на основе (2)–(4) для разных тактовых интервалов ($n, n-1$).

При когерентном сложении лучей от двух приемных антенн, относительное сигнальное расстояние зависит от амплитуд задержанных лучей A_3 , их длительности задержки τ_3 , величин фаз задержанных лучей φ, ψ и значений интерферирующих посылок $\varphi_{n-1}, \varphi_n, \varphi_{n+1}$.

2. Сравнительный анализ сигнальных расстояний системы с разнесением для бинарной фазовой и дифференциальной фазовой модуляции с учетом параметров многолучевости. Рассмотрение помехоустойчивости системы с разнесением требует математического моделирования сигнальных расстояний для различных видов модуляции, представляющих функционал:

$$\Delta S = \Phi \left(\frac{A_3}{A_0}, \frac{\tau_3}{T}, \varphi_{n-1}, \varphi_n, \varphi_{n+1}, \psi, \varphi \right), \quad (7)$$

где $\frac{A_3}{A_0}$ — относительная величина запаздывающих лучей, $\frac{\tau_3}{T}$ — относительная задержка запаздывающих лучей, $\varphi_{n-1}, \varphi_n, \varphi_{n+1}$ — информационное значение фаз соседних посылок, ψ — значение фазы первого запаздывающего луча, φ — значение фазы второго запаздывающего луча.

Как показано в [10], основную роль в деформации сигнального расстояния для фазовой модуляции играет амплитуда задержанного луча, для дифференциальной фазовой модуляции амплитуда и задержка дополнительного луча. Ранее рассматривалась слабая многолучевость, поэтому особый интерес представляет сильная многолучевость, которая позволяет определить потенциальные возможности демодуляторов.

На рис. 3 показаны зависимости относительных сигнальных расстояний от фазы первого луча для наихудшего случая, когда фаза второго задержанного луча $\psi = 180^\circ$. Система с разнесением для дифференциальной фазовой модуляции (ДОФМ)

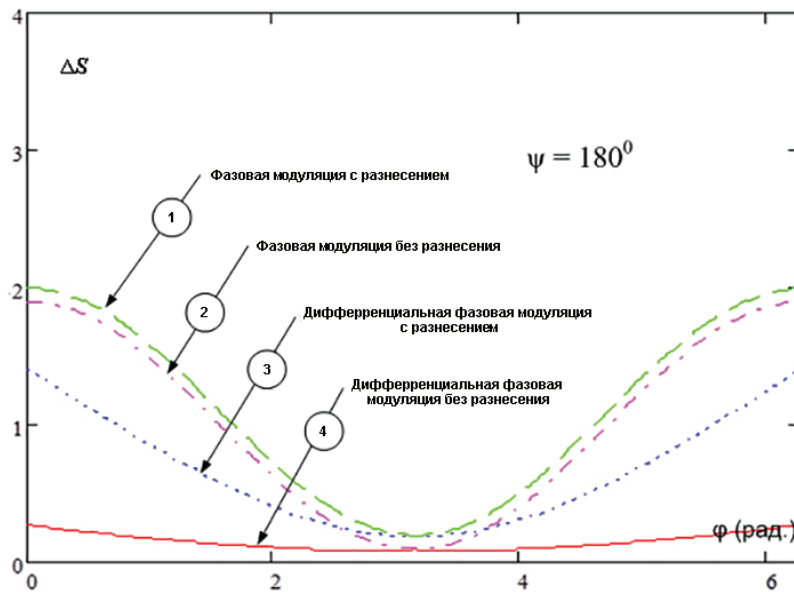


Рис. 3. Зависимость относительного сигнального расстояния для комбинации $(0, 0, \pi)$ от фазы задержанного луча первого сигнала, при фазе второго задержанного луча, равного 180° для $\frac{A_3}{A_0} = 0,9$ и $\frac{\tau_3}{T} = 0,9$ при фазовой и дифференциальной фазовой модуляции в системе с разнесением и без разнесения

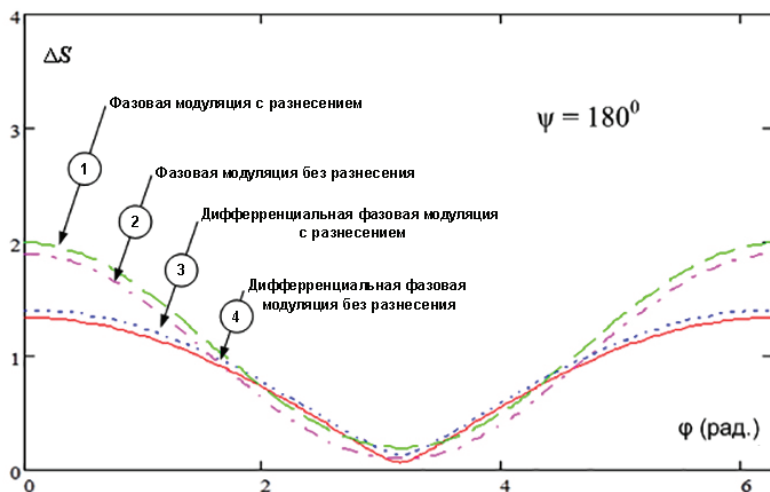


Рис. 4. Зависимость относительного сигнала расстояния для комбинации $(0, 0, \pi)$ от фазы задержанного луча первого сигнала, при фазе второго задержанного луча, равного 180° для $\frac{A_3}{A_0} = 0,9$ и $\frac{\tau_3}{T} = 0$ при фазовой и дифференциальной фазовой модуляции в системе с разнесением и без разнесения

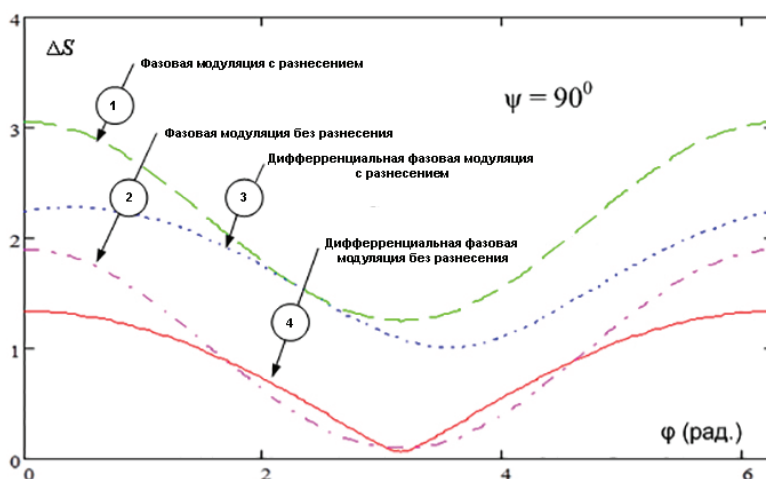


Рис. 5. Зависимость относительного сигнала расстояния для комбинации $(0, 0, \pi)$ от фазы задержанного луча первого сигнала, при фазе второго задержанного луча, равного 90° для $\frac{A_3}{A_0} = 0,9$ и $\frac{\tau_3}{T} = 0$ при фазовой и дифференциальной фазовой модуляции в системе с разнесением и без разнесения

значительно увеличивает сигналное расстояние, нежели чем для фазовой модуляции.

На рис. 4 приведены подобные зависимости для нулевой задержки, где в области малых сигналных расстояний ДОФМ превосходит ФМ.

Разнообразное моделирование деформации сигналных расстояний от параметров многолучевости для системы с разнесением при когерентном сложении лучей на приеме показало, что для фазовой модуляции определяющими являются амплитуда и фаза задержанных лучей, в то время как задержка перераспределяет изменения по фазовой плоскости [11]. Дифференциальная фазовая модуляция очень чувствительна как к амплитуде, так и к задержке дополнительного луча (рис. 4), при этом фаза луча играет второстепенную роль.

На рис. 5 и 6 представлены результаты исследования деформации сигналных расстояний для предельных амплитуд запаздывающих лучей

для более благоприятного значения фазы второго запаздывающего луча.

Пример результатов исследования деформации сигналного расстояния при больших амплитудах и задержках дополнительных лучей показан на рис. 6, где при изменении фазы второго задержанного луча в системе с разнесением благоприятно сказывается для фазовой модуляции и очень незначительно — для дифференциальной фазовой модуляции, изменяя лишь минимум по фазовой плоскости.

3. Помехоустойчивость системы с разнесением сигналов с бинарной фазовой и дифференциальной фазовой модуляцией в канале с многолучевостью. Рассмотренные выше результаты деформации сигналных расстояний для систем с разнесением на приеме для сигналов с фазовой и дифференциальной фазовой модуляцией в каналах с многолучевостью позволяют получить кривые помехо-

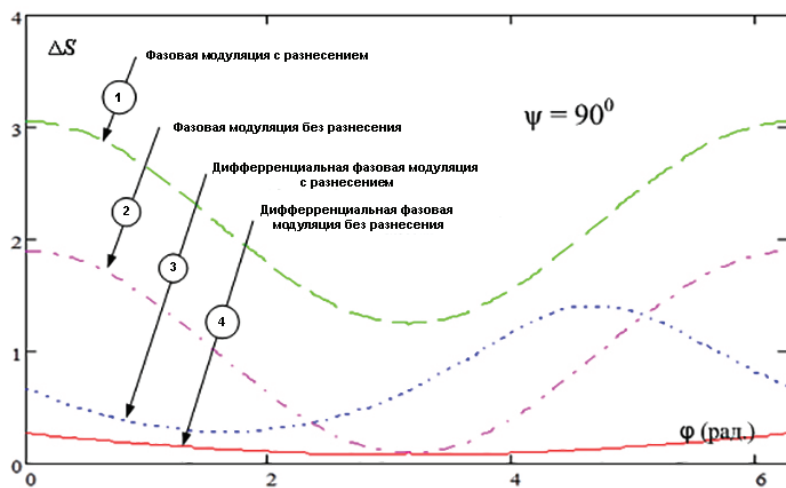


Рис. 6. Зависимость относительного сигнала расстояния для комбинации $(0, 0, \pi)$ от фазы задержанного луча первого сигнала, при фазе второго задержанного луча, равного 90° для $\frac{A_3}{A_0} = 0,9$ и $\frac{\tau_3}{T} = 0$ при фазовой и дифференциальной фазовой модуляции в системе с разнесением и без разнесения

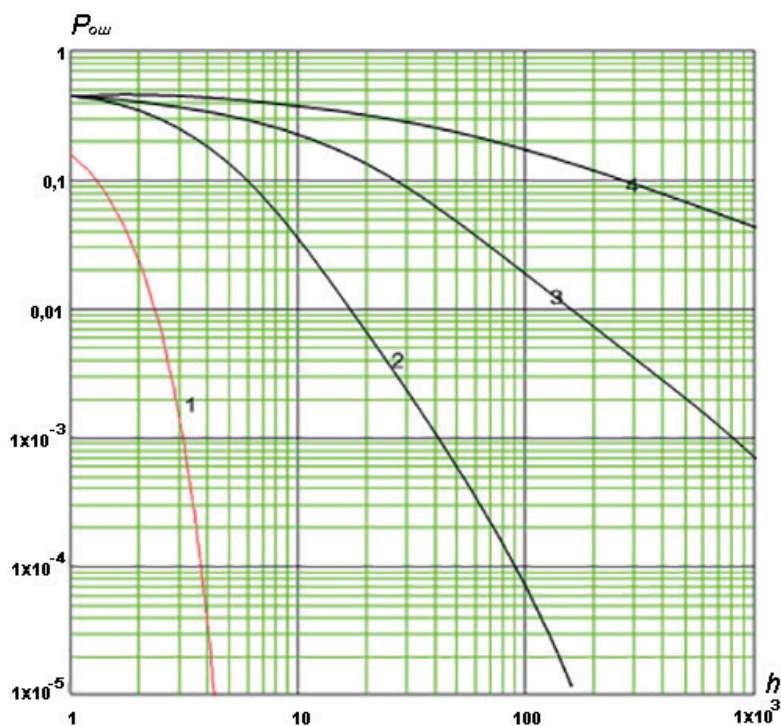


Рис. 7. Зависимость средней вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для фазовой модуляции (1) при $A_3=0$, дифференциальной фазовой модуляции (4) при $A_3=0,99A_0$, для фазовой модуляции с разнесением (2) при $A_3=0,99A_0$, для фазовой модуляции без разнесения (3) и дифференциальной фазовой модуляции с разнесением (3) при $A_3=0,99A_0$

устойчивости при действии аддитивной гауссовской помехой.

Для расчета средней вероятности ошибки систем с разнесением при различных условиях многолучевости от уровня аддитивной помехи необходимо задать плотности распределения вероятностей фаз, задержек и амплитуд запаздывающих сигналов, а также задать статистические характеристики чередования информационных символов.

Для определения потенциальной помехоустойчивости демодуляторов в системе с разнесением и без разнесения зададим равномерное распреде-

ление вероятностей фаз, задержек при предельном значении амплитуды запаздывающих лучей.

На рис. 7 представлены кривые предельной помехоустойчивости рассматриваемых сигналов для систем с разнесением и без разнесения, для равномерного распределения плотности вероятностей фаз и задержек при случайном чередовании информационных символов и $A_3=0,99A_0$. Результаты исследования помехоустойчивости показали, что демодуляторы фазовой модуляции значительно выигрывают у демодуляторов с дифференциальной фазовой модуляцией, при этом разнесение с $M=2$

сигналов ДОФМ эквивалентно ФМ без разнесения, что и показано на рис. 7 (кривая 3). При уменьшении амплитуды запаздывающего сигнала разница в помехоустойчивости уменьшается, что справедливо и при уменьшении задержки запаздывающих сигналов для DPSK.

Заключение. Проведенный анализ помехоустойчивости систем с разнесением для канала с многолучевостью на основе математического моделирования на ЭВМ показал:

— применение разнесенного приема в каналах с многолучевостью для сигналов с фазовой модуляцией ФМ более эффективно, чем для сигналов с DPSK;

— в области больших амплитуд и задержек дополнительного луча система с разнесением сигналов с ОДФМ значительно проигрывает сигналам с PSK, при этом разница уменьшается, но незначительно, при слабой многолучевости;

— выигрыш системы с разнесением для сигналов с ФМ объясняется слабой зависимостью от задержки дополнительных лучей и последовательности чередования информационных символов;

— в каналах с многолучевостью при действии аддитивных помех для систем с разнесением уменьшается разница в помехоустойчивости между фазовой модуляцией и относительной фазовой модуляцией за счет того, что основной вклад вносят области с малым сигнальным расстоянием, а они у них не отличаются;

— полученные результаты полезны для анализа систем с разнесением на передаче [3], так как рассмотренная методика деформации сигнальных расстояний позволит определить эффективность систем с разнесением для многолучевого поля;

— предложенный в работе метод анализа помехоустойчивости систем с разнесением позволяет разработчикам цифровых систем передачи информации учесть погрешности фазирования, ведущие к снижению эффективности разнесения; а также выбрать параметры пространственного разнесения с учетом тонкой структуры поля.

Библиографический список

1. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. М.: Советское радио, 1970. 727 с.
2. Связь с подвижными объектами в диапазоне СВЧ / Под ред. У. К. Джейкса; пер. с англ. под ред. М. С. Ярыкова, М. В. Чернякова. М.: Связь, 1979. 520 с.
3. Alamouti S. M. A simple diversity technique for wireless communication // IEEE Journal. On select areas in communications. 1998. Vol. 16, no 8. P. 1451 – 1458.

4. Ахо Дж., Хопкрафт Дж., Ульман Дж. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / пер. с англ. А. О. Слысенко под ред. Ю. В. Матиасевича. М.: Мир, 1979. 536 с.

5. Уильям К. Ли. Техника подвижных систем связи. М.: Радио и связь. 1985, 292 с.

6. Прокис Джон. Цифровая связь / пер. с англ. под ред. Д. Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000. 800 с. ISBN 5-256-01434-X.

7. Крейнделин В. Б. Итерационный метод совместной демодуляции и фильтрации параметров канала связи в цифровых системах передачи информации // Радиотехника и электроника. 2010. Т. 55, № 8. С. 961 – 967.

8. Кириллов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам со случайно изменяющимися параметрами. М.: Связь, 1971. 256 с.

9. Bello P. A., Nelin B. D. The effect of frequency selective fading on the Binary error probabilities of incoherent and differentially coherent matched filter receivers // IEEE Trans on communications system. 1963. Vol. CS-11. P. 170 – 186.

10. Сидельников Г. М. Помехоустойчивость демодуляторов сигналов с фазовой и относительной фазовой модуляцией в каналах с многолучевостью // Омский научный вестник. 2017. № 5 (155). С. 146 – 152.

11. Сидельников Г. М. Сравнительный анализ помехоустойчивости алгоритмов разнесенного приема в каналах с дискретной многолучевостью // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы конф. / Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. Новосибирск, 2015. С. 556 – 565.

СИДЕЛЬНИКОВ Геннадий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические системы».

Адрес для переписки: sid53@ngs.ru

ОГНЕВ Даниил Викторович, студент гр. ММ-53 факультета мультисервисных телекоммуникационных систем.

Адрес для переписки: www.gupi@yandex.ru

Для цитирования

Сидельников Г. М., Огнев Д. В. Помехоустойчивость разнесенного приема сигналов с фазовой и относительной фазовой модуляцией в каналах с многолучевостью // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 104 – 109. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-104-109.

Статья поступила в редакцию 18.01.2018 г.

© Г. М. Сидельников, Д. В. Огнев