

УДК 621.391.072
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Использование пространственно-распределенной синфазной антенны для повышения помехоустойчивости приема сигналов

Г.В. Куликов,
Ю.А. Полевода[®],
М.С. Костин

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
[®] Автор для переписки, e-mail: polevoda@mirea.ru

Резюме

Цели. Радиотехнические системы передачи информации находят широкое применение в различных отраслях нашей жизни не только для обеспечения телекоммуникаций и бытовых потребностей человека, но и для функционирования различных спецслужб, например, служб МЧС, которые в своей работе применяют роботизированные комплексы. В случае чрезвычайного происшествия возможно попадание такого робота под завал, в железобетонные трубы или другие коммунальные объекты, в результате чего условия распространения радиоволн резко ухудшаются. В этой связи остро стоит вопрос обеспечения надежной связи с роботизированным комплексом. Цель работы – снижение влияния эффекта многолучевого распространения радиоволн в канале связи в сложных помеховых условиях.

Методы. Используются методы статистической радиотехники, теории оптимального приема сигналов и математического моделирования.

Результаты. Приведена модель приемной многоэлементной пространственно-распределенной синфазной антенны разных конфигураций с электронно-регулируемой диаграммой направленности, предназначенной для борьбы с многолучевым характером распространения сигнала. Проведено моделирование многолучевого канала связи при наличии одного основного и трех отраженных лучей распространения радиоволн, а также с гармонической помехой при двух углах ее прихода и разной частотной расстройкой относительно частоты полезного сигнала. Оценена вероятность битовой ошибки при приеме дискретной информации с применением предложенной антенны.

Выводы. Применение предложенного алгоритма обработки сигналов на приемной стороне позволяет частично скомпенсировать влияние эффекта многолучевости. В результате помехоустойчивость приема информации по сравнению с приемом на всенаправленную антенну с одним антенным элементом повышается: для вероятности битовой ошибки 10^{-3} энергетический выигрыш составляет от 2 дБ при 2 лучах до 7–10 дБ при 3–4 лучах. При наличии в радиоканале сосредоточенной гармонической помехи также наблюдается ее одновременная пространственная (с использованием антенны) и спектральная (с использованием демодулятора) фильтрация, эффективность которой зависит от направления прихода и частотной расстройки помехи, что также приводит к существенному снижению вероятности ошибки.

Ключевые слова: пространственно-распределенная синфазная антенна, электронное регулирование диаграммы направленности, многолучевое распространение радиоволн, гармоническая помеха, помехоустойчивость, вероятность битовой ошибки

• Поступила: 14.04.2023 • Доработана: 02.05.2023 • Принята к опубликованию: 04.09.2023

Для цитирования: Куликов Г.В., Полевода Ю.А., Костин М.С. Использование пространственно-распределенной синфазной антенны для повышения помехоустойчивости приема сигналов. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):39–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Use of a spatially distributed in-phase antenna to increase the noise immunity of signal reception

Gennady V. Kulikov,
Yuriy A. Polevoda[@],
Mikhail S. Kostin

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] Corresponding author, e-mail: polevoda@mirea.ru

Abstract

Objectives. Radio-technical information transmission systems are widely used in various sectors of our life, not only for telecommunications and associated domestic needs, but also for the functioning of various special services, such as emergency response units, which increasingly use robotic complexes in the course of their work. In the event of an emergency, robot devices can be used to get in under rubble, in concrete pipes or other municipal facilities, which typically result in a sharp deterioration of the necessary conditions for the propagation of radio waves. In this regard, the problem of ensuring reliable communication with the robotic complex becomes rather acute. The aim of the present work is to reduce the effect of multipath propagation of radio waves in the communication channel under complex interference conditions.

Methods. The methods of statistical radio engineering and mathematical modeling are used according to optimal signal reception theory.

Results. The presented model for a multi-element, spatially-distributed, in-phase receiving antenna of various configurations, featuring an electronically adjustable radiation pattern, is designed to ameliorate the multipath nature of signal propagation. A simulation of a multipath communication channel was carried out in the presence of one main and three reflected beams of radio wave propagation, as well as with harmonic interference at two angles of its arrival and different frequency detuning relative to the frequency of the useful signal. The probability of a bit error when receiving discrete information using the proposed antenna is estimated.

Conclusions. The proposed signal processing algorithm on the receiving side can be used to partially compensate for the influence of the multipath effect. As a result, the noise immunity of information reception in comparison with reception on an omnidirectional antenna with one antenna element increases: for a bit error probability of 10^{-3} , the energy gain ranges from 2 dB for two beams to 7–10 dB for three or four beams. In the presence of concentrated harmonic interference in the radio channel, its simultaneous spatial (by the antenna) and spectral (by the demodulator) filtering is also observed, the effectiveness of which depends on the direction of arrival and the frequency detuning of the interference, which also leads to a significant decrease in the error probability.

Keywords: spatially distributed in-phase antenna, electronic beam control, multipath propagation of radio waves, harmonic interference, noise immunity, bit error rate

• Submitted: 14.04.2023 • Revised: 02.05.2023 • Accepted: 04.09.2023

For citation: Kulikov G.V., Polevoda Yu.A., Kostin M.S. Use of a spatially distributed in-phase antenna to increase the noise immunity of signal reception. *Russ. Technol. J.* 2023;11(6):39–46. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-6-39-46>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Радиотехнические системы передачи информации находят широкое применение в различных отраслях нашей жизни не только для обеспечения телекоммуникаций и бытовых потребностей человека, но и для функционирования различных спецслужб, например, служб МЧС, которые в своей работе применяют роботизированные комплексы. В случае чрезвычайного происшествия возможно попадание такого робота под завал, в железобетонные трубы или другие коммунальные объекты, в результате чего условия распространения радиоволн резко ухудшаются. В этой связи остро стоит вопрос обеспечения надежной связи с роботизированным комплексом в сложных помеховых условиях.

Среда распространения радиоволн существенно влияет на проходящие через нее сигналы. Помимо аддитивных шумовых помех в канале связи наблюдаются сосредоточенные помехи от других радиосредств и ретранслированные помехи, которые вызваны многолучевостью распространения радиоволн при их отражении от препятствий и преломлении [1–3]. Формирование такого многолучевого канала связи приводит к искажению параметров полезного радиосигнала: наблюдается изменение его амплитуды, фазы, угла прибытия, что в результате приводит к существенному снижению помехоустойчивости приема информации [4–10].

Существуют различные методы борьбы с многолучевостью в канале связи – это применение канальных эквалайзеров, управление диаграммой направленности (ДН) антенны, увеличение интервалов в передаваемой последовательности импульсов и применение систем разнесенного приема. Одной из таких систем, например, является система ММО (multiple input – multiple output) [11], широко используемая в системах беспроводных локальных сетей различных стандартов, а также в беспроводных системах мобильной связи.

Другим эффективным способом борьбы с многолучевостью в каналах связи является использование направленных антенн и антенных систем, позволяющих осуществлять пространственную

фильтрацию принимаемых сигналов. При этом ДН таких антенн формируются либо конструктивными методами, либо специальными методами обработки принимаемых сигналов [12].

Синфазная антенная решетка представляет собой сложную направленную антенную систему, состоящую из отдельных слабонаправленных антенн, разнесенных в пространстве и расположенных таким образом, что фазы наведенных в них сигналов оказываются одинаковыми. В итоге сигналы, поступающие от каждой антенны в нагрузку, складываются синфазно.

Это, в конечном итоге, приводит к увеличению уровня сигнала на выходе антенной системы, сужению ДН и в результате – к увеличению коэффициента усиления по сравнению с коэффициентом усиления одиночной антенны, входящей в состав решетки.

МОДЕЛЬ СИНФАЗНОЙ АНТЕННЫ С ЭЛЕКТРОННО-РЕГУЛИРУЕМОЙ ДН

Для снижения влияния эффекта многолучевого распространения радиоволн в канале связи с роботизированным комплексом в сложных помеховых условиях можно использовать пространственно распределенную антенную систему, содержащую от $N = 2$ до 8 антенных элементов [13].

Такая синфазная антенная система (рис. 1) состоит из антенных элементов – резонаторов 1–8, электронно-регулируемых элементов задержки 9–16 и синфазного сумматора 17. Антенные элементы – резонаторы расположены равномерно с угловым шагом $2\pi/N$ по кругу диаметра, равного половине длины волны принимаемого сигнала $\lambda/2$. Сигналы с антенных элементов поступают через регулируемые элементы задержки на синфазный сумматор, формирующий результирующий сигнал $S_{\text{вых}}$. Задачей регулируемых элементов задержки является обеспечение синфазности принимаемых колебаний и формирование суммарной ДН антенны.

Временные задержки прихода принимаемых колебаний от антенных элементов на синфазный сумматор с учетом требуемого поворота ДН на угол φ определяются следующим образом:

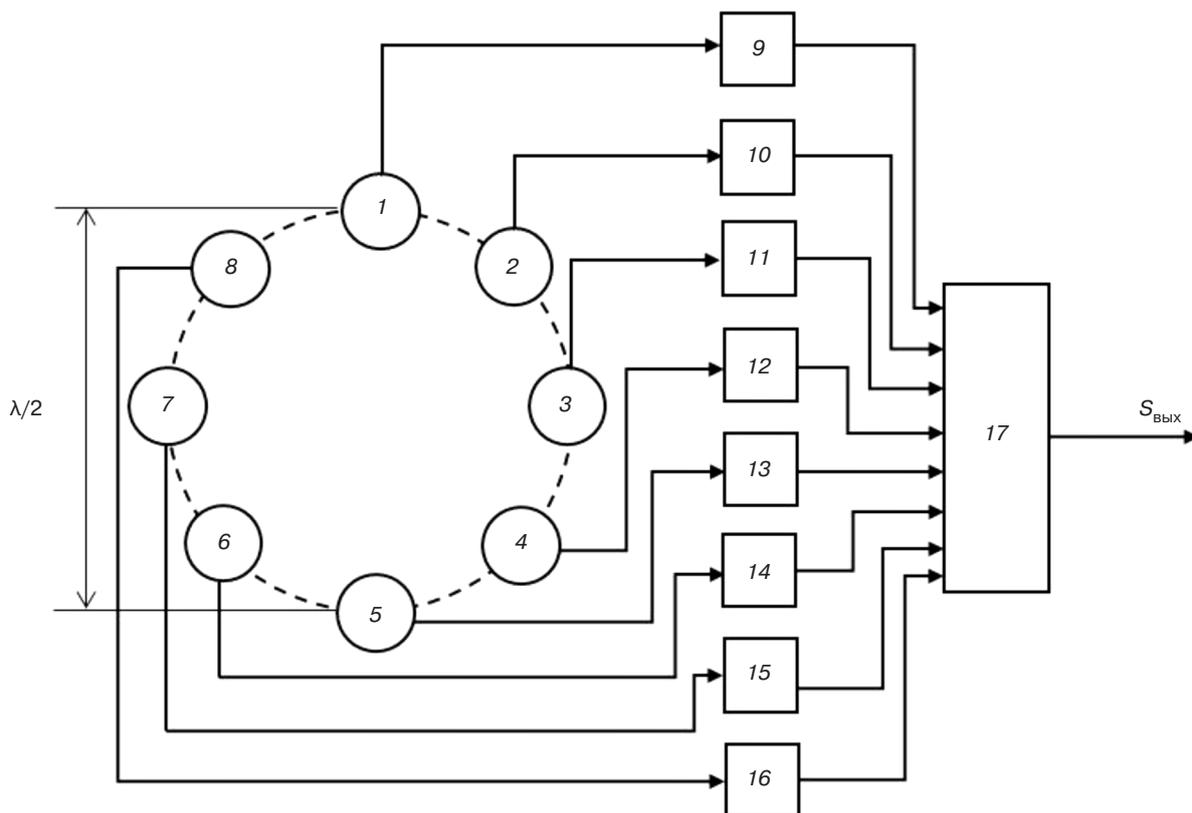


Рис. 1. Структурная схема синфазной антенной решетки с электронно-регулируемой ДН

$$\tau_i = \frac{T}{4} \left\{ 1 + \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} - \frac{i\pi}{4} \right) + \varphi \right] \right\}, \quad (1)$$

где $i = \overline{1,8}$ – номер антенного элемента системы, T – период волны принимаемого сигнала.

В [14, 15] рассчитаны ДН рассматриваемой синфазной антенны для трех случаев: номинальная частота принимаемого сигнала, уменьшенная или увеличенная частота. Показано, как при изменении частоты меняется ширина ДН и уровень боковых лепестков. Из полученных графиков следует, что конструктивно простые двухэлементные антенны

имеют довольно широкую ДН и очень большой уровень боковых лепестков. Четырехэлементная и восьмиэлементная антенны имеют хорошие, весьма близкие показатели и могут быть использованы для пространственной фильтрации в каналах с многолучевым распространением волн. Можно отметить, что при отклонении частоты сигнала от номинальной даже на 10% селективные свойства этих антенн остаются в норме.

Возможность электронного регулирования ДН антенны демонстрируется на рис. 2, где показаны характеристики направленности при различных величинах угла φ , задаваемого в элементах

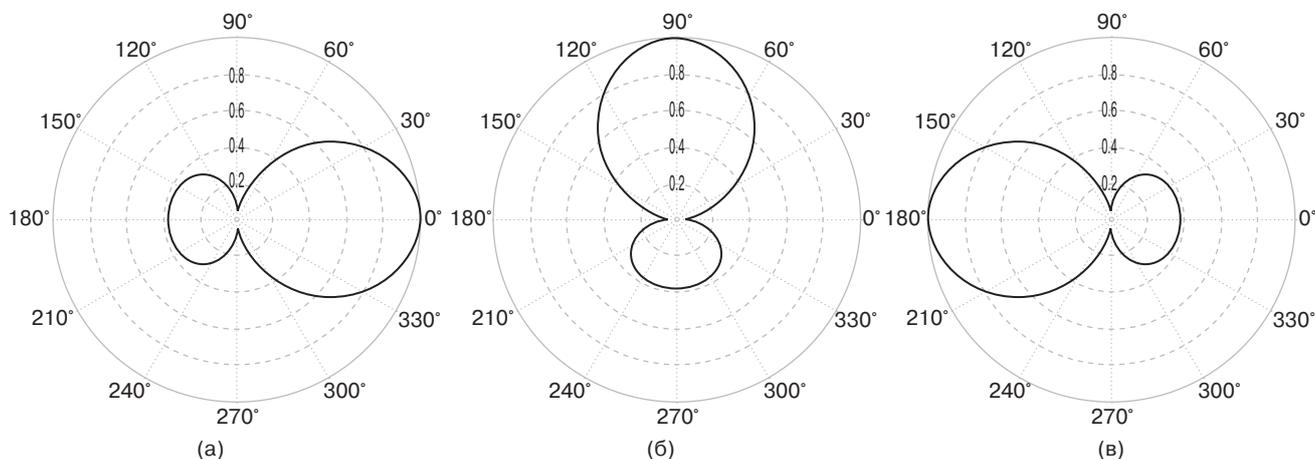


Рис. 2. ДН синфазной антенны: (а) $\varphi = 0$, (б) $\varphi = \pi/2$, (в) $\varphi = \pi$

задержки (1). Стоит отметить, что при различных углах поворота сама форма диаграммы, а следовательно, и избирательные свойства остаются без изменений.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки помехоустойчивости системы связи с предлагаемой синфазной антенной на приемной стороне в сложных помеховых условиях проведено математическое моделирование.

А. Модели сигнала и помех. В качестве тестового использован сигнал с бинарной фазовой манипуляцией $s(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + C_k \pi)$, где $A_0 = \sqrt{2E/T_s}$ – его амплитуда, ω_0 – несущая частота, t – время, $C_k = \pm 1$ – информационный символ, E – энергия сигнала, T_s – длительность посылки. Был использован когерентный демодулятор. В качестве флуктуационной помехи использовался гауссовский шум с равномерной спектральной плотностью N_0 . Канал связи полагался многолучевым с одним основным и несколькими ($M = 1, 2, 3$) ретранслированными лучами

$$s_r(t) = \mu_r s(t - \tau_r)$$

с разной относительной интенсивностью μ_r , временной задержкой τ_r и углами прихода θ_r . Кроме этого, в качестве сосредоточенной помехи использовалось гармоническое колебание $s_h(t) = \mu_h A_0 \cos(\omega_h t + \phi_h)$ со случайной фазой ϕ_h , относительной интенсивностью μ_h и частотой ω_h , близкой к частоте полезного сигнала, с разными углами прихода θ_h .

Б. Многолучевой канал связи. При моделировании многолучевого канала связи использовались один основной (угол прихода $\theta_r = 0$) и 3 отраженных луча: для первого отраженного луча $\theta_r = \pi/4$, $\mu_r = 0.5$, $\tau_r = 0.5T_s$; для второго отраженного луча $\theta_r = \pi/3$, $\mu_r = 0.3$, $\tau_r = 0.1T_s$; для третьего отраженного луча $\theta_r = \pi/5$, $\mu_r = 0.4$, $\tau_r = 0.7T_s$. Отношение сигнал/шум E/N_0 изменялось в интервале от 1 до 13 дБ.

На рис. 3 показаны полученные зависимости вероятности битовой ошибки P_e от отношения сигнал/шум (С/Ш) при разном количестве принимаемых лучей, включая основной. Кривые 1 соответствуют синфазной антенне с четырьмя антенными элементами; кривые 2 – с восемью антенными элементами; кривые 3 – простой всенаправленной антенне с одним антенным элементом; кривые 4 – простой всенаправленной антенне с одним антенным элементом и одним основным принимаемым лучом (классический случай приведен для сравнения). Видно, что наличие отраженных лучей при приеме существенно увеличивает вероятность битовой ошибки по сравнению с классическим случаем, но применение предложенной синфазной антенны позволяет

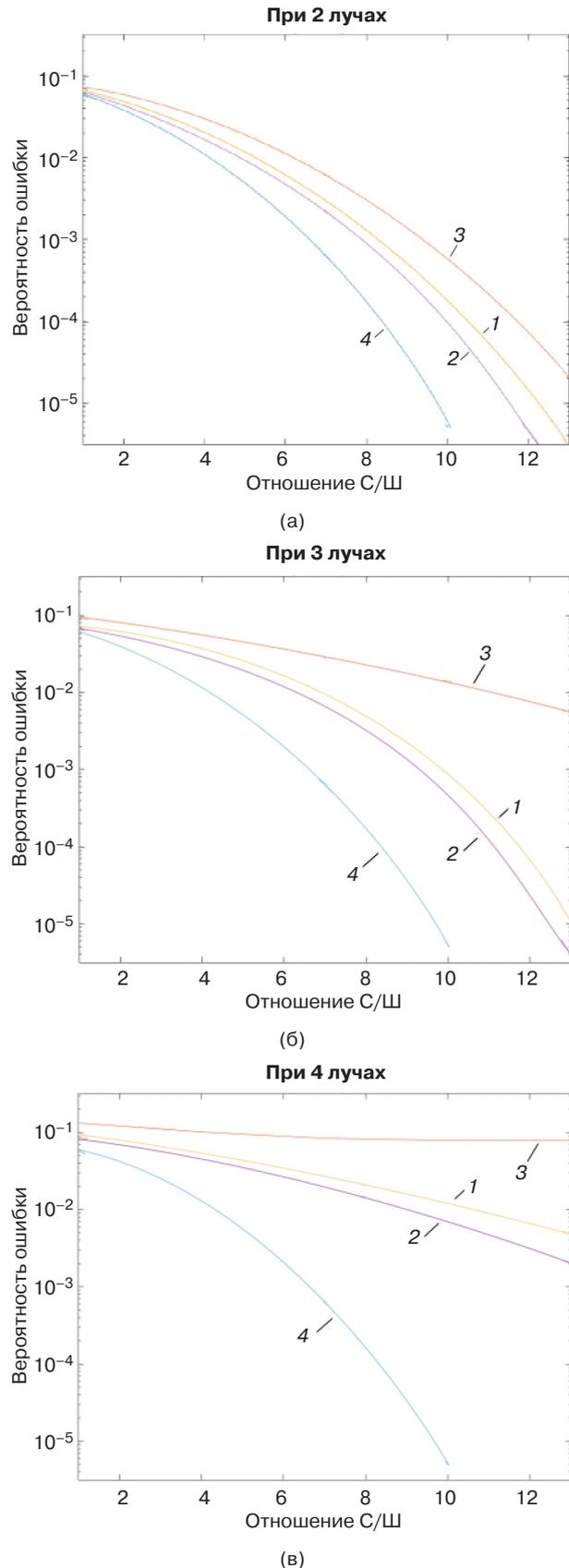


Рис. 3. Зависимости вероятности битовой ошибки от отношения С/Ш для: (а) двухлучевого канала связи, (б) трехлучевого канала связи, (в) четырехлучевого канала связи

частично скомпенсировать их влияние. В результате помехоустойчивость приема информации по сравнению с приемом на всенаправленную антенну с одним антенным элементом повышается. Для вероятности ошибки $P_e = 10^{-3}$ энергетический выигрыш составляет от 1.5–2 дБ при 2 лучах до 7–10 дБ при 3–4 лучах, причем заметно, что разница для четырехэлементной и восьмиэлементной антенн небольшая, что говорит о возможности упрощения ее конструкции.

В. Канал связи с гармонической помехой. При моделировании канала связи использовались следующие параметры гармонической помехи: относительная интенсивность $\mu_h = 0.5$, случайная начальная фаза φ_h равномерно распределена на интервале $(-\pi, \pi]$, приведенная частотная расстройка $\Delta\omega T_s = (\omega_h - \omega_0)T_s$ находится в интервале $(-12, +12)$. Синфазная антенна содержит 8 антенных элементов.

На рис. 4 показаны зависимости вероятности битовой ошибки P_e от расстройки помехи $\Delta\omega T_s$ при $E/N_0 = 7$ дБ и двух углах ее прихода: $\theta_h = 0$ (направление максимума ДН) и $\pi/3$. Наблюдается одновременная пространственная (с использованием антенны) и спектральная (с использованием демодулятора) фильтрация помехи, что приводит к существенному снижению вероятности ошибки – более чем на порядок при $\theta_h = 0$. Можно считать, что при $\Delta\omega T_s \geq 5$ влиянием такой гармонической помехи можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построена математическая модель многоэлементной пространственно-распределенной синфазной антенны, предназначенной для борьбы с многолучевым характером распространения сигнала. Показана возможность электронной регулировки ДН.

Применение предложенного алгоритма обработки сигналов на приемной стороне позволяет частично скомпенсировать влияние эффекта многолучевости. В результате помехоустойчивость приема информации по сравнению с приемом на всенаправленную

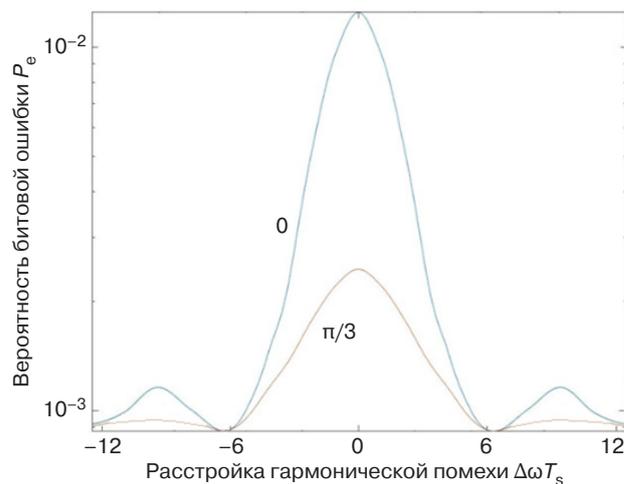


Рис. 4. Зависимости вероятности битовой ошибки от расстройки гармонической помехи

антенну с одним антенным элементом повышается: для вероятности ошибки $P_e = 10^{-3}$ энергетический выигрыш составляет от 2 дБ при 2 лучах до 7–10 дБ при 3–4 лучах.

При наличии в радиоканале сосредоточенной гармонической помехи также наблюдается ее одновременная пространственная (с использованием антенны) и спектральная (с использованием демодулятора) фильтрация, эффективность которой зависит от направления прихода и частотной расстройки помехи, что также приводит к существенному снижению вероятности ошибки.

Вклад авторов

Г.В. Куликов – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

Ю.А. Полевода – проведение компьютерного моделирования, обработка результатов.

М.С. Костин – разработка модели синфазной антенны.

Authors' contributions

G.V. Kulikov – the research idea, consultations on the issues of conducting all stages of the study.

Yu.A. Polevoda – computer simulation, processing of results.

M.S. Kostin – development of an antenna model.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перфилов О.Ю. *Радиопомехи*. М.: Горячая линия – Телеком; 2017. 110 с. ISBN 978-5-9912-0491-0
2. Поляков П.Ф. *Прием сигналов в многолучевых каналах*. М.: Радио и связь; 1986. 248 с.
3. Яковлев О.И., Якубов В.П., Урядов В.П., Павельев А.Г. *Распространение радиоволн*. М.: ЛЕНАНД; 2009. 486 с. ISBN 978-5-9710-0183-6

REFERENCES

1. Perfilov O.Yu. *Radiopomekhi (Radio Interference)*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2017. 110 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0491-0
2. Polyakov P.F. *Priem signalov v mnogoluchevykh kanalakh (Signal Reception in Multipath Channels)*. Moscow: Radio i svyaz'; 1986. 248 p. (in Russ.).

4. Куликов Г.В., Лелюх А.А., Граченко Е.Н. Помехоустойчивость когерентного приемника сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(8):804–808. <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>
5. Куликов Г.В., Данг С.Х. Помехоустойчивость приема сигналов с амплитудно-фазовой манипуляцией в двухлучевом канале связи. *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2022;2:43–49.
6. Нгуен В.З. Помехоустойчивость корреляционного приемника сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при наличии ретранслированной помехи. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
7. Зеленецкий В.В., Попов А.В., Зеленецкий Ю.В., Наконечный А.Б. Статистическая оценка качества райсовского радиоканала метрового диапазона. *Известия Института инженерной физики*. 2023;1(67):56–58. URL: <https://iifrf.ru/wp-content/uploads/2023/01/izvestiyaiif-67.pdf>
8. Красносельский И.Н., Канев С.А. Исследование помехоустойчивости системы DVB-T на модели канала с многолучевым распространением. *Электросвязь*. 2010;7:28–30.
9. 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):104–109. <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-104-109>
10. Сидельников Г.М., Синявская А.С. Межсимвольная интерференция сигналов с ФРМ и ФМ в каналах с дискретной многолучевостью. *Омский научный вестник*. 2014;1(127):205–210.
11. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. *Технология MIMO: принципы и алгоритмы*. М.: Горячая линия – Телеком; 2022. 242 с. ISBN 978-5-9912-0457-6
12. Гончаренко И.В. *Антенны КВ и УКВ. Направленные КВ антенны. Синфазные и продольного излучения*. М.: РадиоСофт; Радио; 2010. 256 с. ISBN 5-93037-144-X
13. Куликов Г.В., Костин М.С., Замуруев С.Н., Ярлыков А.Д., Полевода Ю.А. *Синфазная антенная решетка с электронно-регулируемой диаграммой направленности*: пат. RU 217728 U1. Заявка № RU 2023 102 773 U; заявл. 07.02.2023; опубл. 14.04.2023.
14. Полевода Ю.А., Куликов Г.В., Коняшкин Г.В., Кузленков П.И. Исследование диаграммы направленности пространственно-распределенной приемной антенны. В сб.: *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сборник трудов Национальной научно-практической конференции*; под ред. С.У. Увайсова. М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 272–277.
15. Куликов Г.В., Кузленков П.И. Математическое моделирование системы антенн для борьбы с многолучевым характером распространения сигнала в гидроакустическом канале связи. В сб.: *VI Международная НПК «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» (РАДИОИНФОКОМ – 2022)*. М.: РТУ МИРЭА; 2022. С. 164–167.
3. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Pavel'ev A.G. *Rasprostranenie radiovoln (Radio-Wave Propagation)*. Moscow: LENAND; 2009. 486 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9710-0183-6
4. Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *J. Commun. Technol. Electron.* 2020;65(8):934–938. <https://doi.org/10.1134/S1064226920070074> [Original Russian Text: Kulikov G.V., Lelyukh A.A., Grachenko E.N. Noise immunity of coherent signal receiver with quadrature amplitude modulation in the presence of relayed interference. *Radiotekhnika i Elektronika*. 2020;65(8):804–808 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0033849420070074>]
5. Kulikov G.V., Dang X.H. Noise immunity of reception of signal with amplitude-phase shift keying in a two-path communication channel. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya = Questions of Radio Electronics. Series: TV Technique*. 2022;2:43–49 (in Russ.).
6. Nguyen V.D. Noise immunity of correlation receiver of signal with multi-position phase shift keying in the presence of retransmitted interference. *Zhurnal radioelektroniki = J. Radio Electronics*. 2019;3 (in Russ.). <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.3.4>
7. Zelenevskii V.V., Popov A.V., Zelenevskii Yu.V., Nakonechnyi A.B. Statistical quality assessment Rice radio channel of meter band. *Izvestiya Instituta Inzhenernoi Fiziki*. 2023;1(67):56–58 (in Russ.). Available from URL: <https://iifrf.ru/wp-content/uploads/2023/01/izvestiyaiif-67.pdf>
8. Krasnoselsky I.N., Kanev S.A. Analyzing DVB-T system's interference immunity in a multipath fading channel as a model. *Elektrosvyaz' = Telecommunications and Radio Engineering*. 2010;7:28–30 (in Russ.).
9. Sidelnikov G.M., Ognev D.V. Noise stability of diversity system for signals PSK and DPSK in multipath channels. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;2(158):104–109 (in Russ.). <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2018-158-104-109>
10. Sidelnikov G.M., Sinyavskaya A.S. Intersymbol interference of signal PSK and DPSK for discrete channels. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2014;1(127):205–210 (in Russ.).
11. Bakulin M.G., Varukina L.A., Kreindelin V.B. *Tekhnologiya MIMO: printsipy i algoritmy (MIMO Technology: Principles and Algorithms)*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom; 2022. 242 p. (in Russ.). ISBN 978-5-9912-0457-6
12. Goncharenko I.V. *Antenny KV i UKV. Napravlennye KV anteny. Sinfaznye i prodol'nogo izlucheniya (Antennas of SW and VHF. Directional SW Antennas. In-phase and Longitudinal Radiation)*. Moscow: RadioSoft: Radio; 2010. 256 p. (in Russ.). ISBN 5-93037-144-X
13. Kulikov G.V., Kostin M.S., Zamuruev S.N., Yarlykov A.D., Polevoda Yu.A. *In-phase antenna array with an electronically adjustable directional pattern*: RF Pat. RU 217728 U1. Publ. 14.04.2023 (in Russ.).

14. Polevoda Yu.A., Kulikov G.V., Konyashkin G.V., Kuzelenkov P.I. Research of the directional pattern of the spatially distributed receiving antenna. In: *Fundamental, Exploratory, Applied Research and Innovation Projects: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 272–277 (in Russ.).
15. Kulikov G.V., Kuzelenkov P.I. Mathematical Modelling of Antenna System for Combating Multi-Beam Character of Signal Propagation in Hydroacoustic Communication Channel. In: *Actual Problems and Prospects of Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems (RADIOINFOCOM 2022): Proceedings VI International Conference*. Moscow: RTU MIREA; 2022. P. 164–167 (in Russ.).

Об авторах

Куликов Геннадий Валентинович, д.т.н., профессор, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, SPIN-код РИНЦ 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Полехова Юрий Александрович, аспирант, кафедра радиоэлектронных систем и комплексов Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Костин Михаил Сергеевич, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой радиоволновых процессов и технологий кафедры Института радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, SPIN-код РИНЦ 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>

About the authors

Gennady V. Kulikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kulikov@mirea.ru. Scopus Author ID 36930533000, RSCI SPIN-code 2844-8073, <http://orcid.org/0000-0001-7964-6653>

Yuriy A. Polevoda, Postgraduate Student, Department of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: polevoda@mirea.ru. <https://orcid.org/0009-0007-6327-9685>

Mikhail S. Kostin, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Radio Wave Processes and Technologies, Institute of Radio Electronics and Informatics, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: kostin_m@mirea.ru. Scopus Author ID 57208434671, RSCI SPIN-code 5819-2178, <http://orcid.org/0000-0002-5232-5478>