

УДК 621.391

СИНТЕЗ ГИБРИДНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

С.С. Дворников, кандидат технических наук.

Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного

Представлены процедуры синтеза гибридных сигналов, состоящих из фрагментов гармоник и вейвлетов на основе ключевой схемы. Приведены результаты исследования свойств гибридных сигналов, в частности, параметрической мимикрии. Рассмотрены особенности обработки гибридных сигналов в шумах. Продемонстрированы их достоинства и недостатки.

Ключевые слова: алгоритм синтеза гибридных сигналов, параметрическая мимикрия, фильтрация сигналов, когерентная обработка

SYNTHESIS OF HYBRID SIGNALS FOR INFORMATION TRANSMISSION SYSTEMS

S.S. Dvornikov.

Military academy of communications of Marshal of Soviet Union S.M. Budenny

The synthesis procedures for hybrid signals consisting of fragments of harmonics and wavelets based on a key scheme are presented. The results of a study of the properties of hybrid signals, in particular, parametric mimicry, are presented. The features of processing hybrid signals in noise are considered. Their advantages and disadvantages are demonstrated.

Keywords: hybrid signal synthesis algorithm, parametric mimicry, signal filtering, coherent processing

В науке под понятием «гибрид» (от лат. hybrida, hybrida – помесь) понимают результат, полученный вследствие скрещивания различающихся форм (структур). Первоначально данное понятие появилось в ботанике [1] для описания новых видов растений. Но в настоящее время данный термин активно используется в технике для того, чтобы подчеркнуть преемственность форм или свойств, полученных от различных структур.

В частности, широко данный термин используется в машиностроении [2], где под гибридными силовыми установками понимают устройства, полученные путем конструктивного совмещения разных типов приводов с целью объединения их наиболее сильных сторон. А в работе [3] понятие «гибридное» применено к распределениям энергии, являющимся обобщенными представлениями по отношению к частотно-временным распределениям класса Коэна и масштабно-временным распределениям аффинного класса. В рассматриваемом контексте, к классу аффинных распределений относятся масштабно-временные распределения на основе вейвлетов [4, 5]. В соответствии с рассмотренными подходами, понятие «гибридные» в работе [6] было применено и к сигналам, сформированным в различных функциональных базисах. Указанные сигналы характеризуются параметрической скрытностью или мимикрией с позиций несанкционированного определения их параметров, существенных для последующей обработки. Но если сигналы, непосредственно сформированные в базисах вейвлетов, достаточно полно исследованы научной общественностью [7–12], то гибридные сигналы, представленные в работе [13], еще не получили должной оценки. В связи с указанными обстоятельствами в настоящей статье представлены результаты исследования свойств гибридных сигналов и особенности их синтеза.

Физические особенности гибридных сигналов

Вопросы обеспечения конфиденциальности передачи сообщений достаточно часто затрагиваются в различных изданиях [14, 15], что определяет их актуальность. В настоящее время разработано достаточно много различных эффективных подходов в рамках данного аспекта [15]. Однако факт применения технических средств защиты легко идентифицируется по демаскирующим признакам [16], что является нежелательным явлением. Более перспективным в этом плане видится подход, рассмотренный в работе [6], основанный на структурной скрытности. Свойство мимикрии гибридных сигналов основано на том, что их обработка в отсутствие априорной информации об их структуре приведет к неправильной идентификации, то есть распознаванию [17]. И, как результат, к неправильному выбору устройств демодуляции и декодирования [18]. При этом использование гибридных сигналов не приводит к существенному снижению информационной скорости в ограниченном частотном канале. Поскольку гибридный сигнал синтезируется из фрагментов радиоимпульсов, сформированных в различных структурных базисах [19], то учитывая разнообразие модуляционных форматов, количество возможных видов гибридных сигналов тоже будет значительным. В настоящей статье рассмотрим особенности синтеза фазоманипулированных гибридных сигналов бинарного типа. Наиболее помехоустойчивым видом манипуляции является двойная фазовая манипуляция (ФМ-2) [20]. Принцип ее реализации состоит в инверсии фазы при смене позиции. Классический синтез сигналов ФМ-2 основан на инверсии фазы гармонического несущего колебания под воздействием информационных импульсов [21], но к гибридным сигналам он неприменим. Гибридный сигнал состоит из фрагментов радиоимпульсов гармонического колебания (рис. 1):

$$s(t) = \cos(2\pi ft + \varphi),$$

и вейвлета Гаусса первого порядка:

$$\psi(t) = -t \exp(-t^2 / 2). \quad (1)$$

Анализ выражения (1) указывает на локализованный характер функции $\psi(t)$, то есть синтез непрерывного колебания на его основе, в принципе, невозможен. Но вейвлет на основе функции Гаусса может быть использован как формирующий элемент для синтеза сигналов методом последовательной конкатенации, предложенным в работах [11, 22].

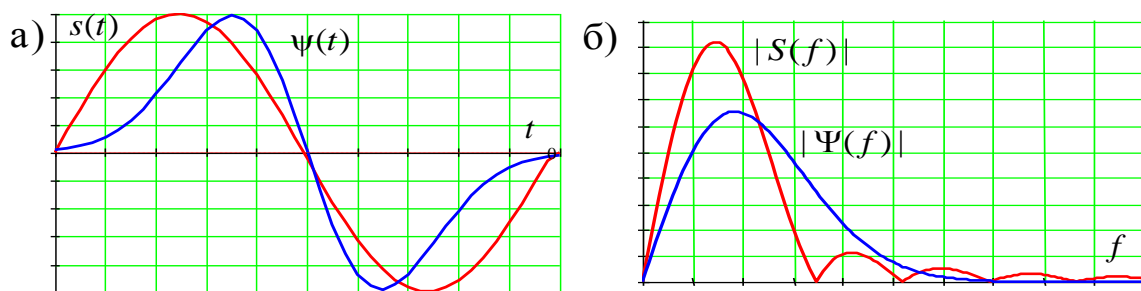


Рис. 1. Формирующие фрагменты гибридного сигнала:
а) во временной области; б) в частотной области

С позиций синтеза сигналов методом конкатенации (рис. 2) предпочтительным видится использование именно вейвлетов, ввиду уникальности их свойств локализации энергии в частотно-временном континууме, что продемонстрировано на рис. 1. Если спектр вейвлета $|\Psi(f)|$ фактически полностью локализован, то для спектра фрагмента гармоники $|S(f)|$ характерны биения в частотной области.

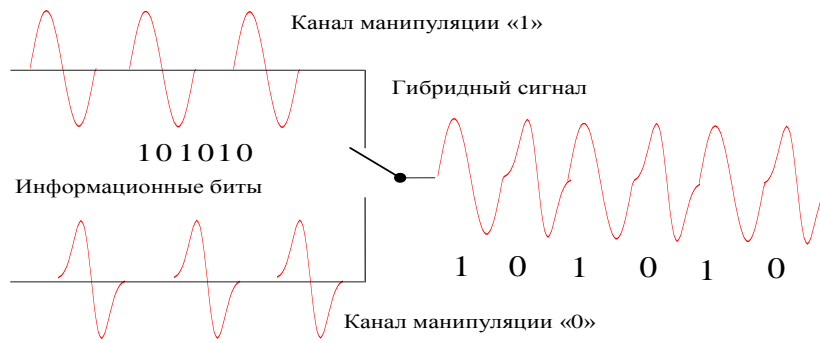


Рис. 2. Принцип синтеза гибридного сигнала

На рис. 2 представлен принцип синтеза гибридного сигнала на основе ключевой схемы с последующей конкатенацией формирующих фрагментов, порядок следования которых определен информационной последовательностью. Более подробно реализация указанных процедур описана в работе [13].

Особенности приема гибридных сигналов

Интересной особенностью гибридных сигналов является необязательность смены полярности фазы при условии корреляционной обработки на приеме. Дело в том, что для снижения пик-фактора результирующего сигнала [23] в работе [13] обоснована необходимость выравнивания амплитуд формирующих фрагментов. Однако из-за различий распределений энергии на длительности импульса гармоника и вейвлета [24] (рис. 3) при несанкционированном приеме гибридного сигнала могут возникнуть проблемы его демодуляции методом корреляционной обработки [25].

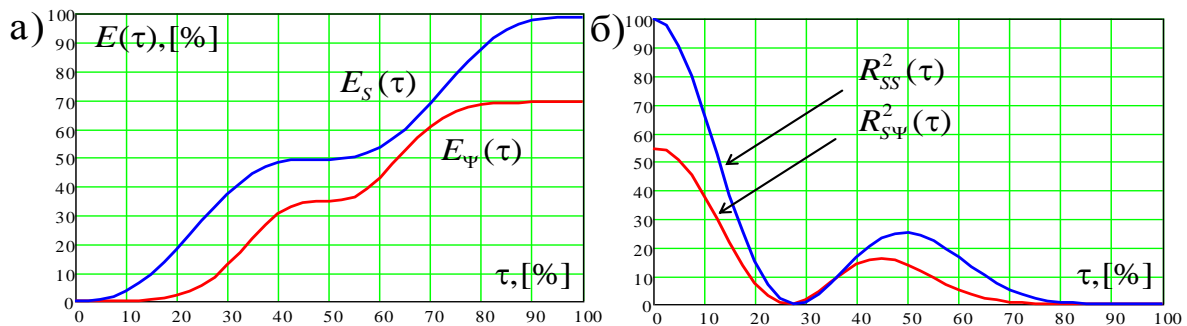


Рис. 3. Распределение энергии фрагментов гибридного сигнала:
а) по времени; б) распределение энергии функции корреляции

Так, на рис. 3 а представлены нормированные распределения энергии фрагментов гибридного сигнала, описываемые следующим выражением:

$$E_s(\tau) = \int_0^{\tau} s^2(t) dt, \quad E_{\psi}(\tau) = \int_0^{\tau} \psi^2(t) dt.$$

Анализ результата показывает, что скорость нарастания энергии различна. При этом у вейвлета в течение первых и последних 20 % времени изменений энергии не происходит в принципе. Причем минимальные различия (в 10 %) наблюдаются на длительности элемента сигнала в 70 %, а максимальные (в 30 %) на длительности – 100 %. Указанные физические различия оказывают существенное влияние на значения корреляционной функции, определяемой выражением:

$$R_{SS}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T-\tau} s(t)s(t+\tau) dt, \quad R_{S\Psi}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{T-\tau} \psi(t)s(t+\tau) dt.$$

На рис. 3 б представлены нормированные значения мощности функций взаимной $R_{S\Psi}(\tau)$ и автокорреляции $R_{SS}(\tau)$ фрагментов сигналов $\psi(t)$ и $s(t)$. Анализ результатов показывает, что физические различия скорости нарастания энергии приводят к существенным изменениям и функций корреляций (фактически в два раза), что обеспечивает возможность их разделения на приеме при условии априорной информации о параметрах гибридного сигнала.

Мимикрия гибридных сигналов

Для систем с ограниченным доступом к информации наиболее интересным свойством является свойство параметрической мимикрии [6], которое проявляется в том, что в условиях отсутствия априорной информации о структуре сигнала его параметры могут быть неправильно идентифицированы. В частности, на рис. 4 показаны фрагменты временных реализаций гибридного сигнала без шумов $g(t)$ и в шумах $\tilde{g}(t)$ при уровне отношения сигнал/шум порядка 15 дБ (характерно для радиоканала декаметрового диапазона [23]).

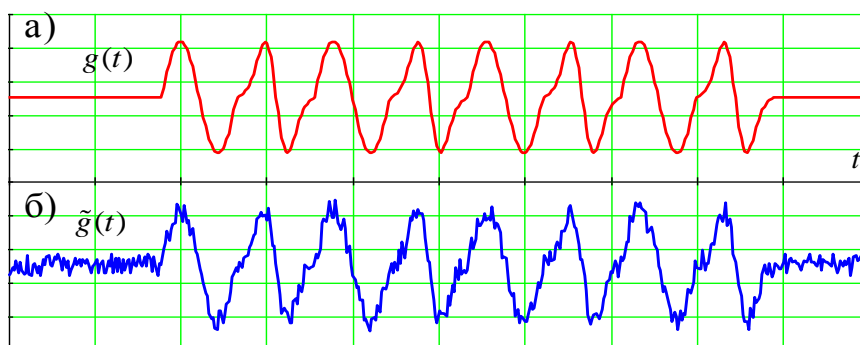


Рис. 4. Временное представление гибридного сигнала:
а) без шумов; б) в шумах

В ходе эксперимента синтез шумов осуществлялся в соответствии с рекомендациями, представленными в работе [26]. На рис. 5 представлены спектры сигналов $g(t)$ и $\tilde{g}(t)$.

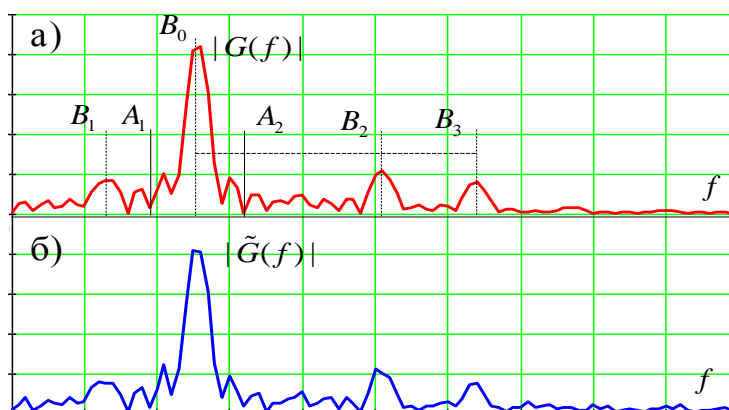


Рис. 5. Спектры фрагментов гибридных сигналов:
а) без шумов; б) в шумах

На рис. 5 изображены спектры реализаций гибридного сигнала без шумов $G(f)$ и в шумах $\tilde{G}(f)$. На рис. 5 а B_1, B_2, B_3 значимые спектральные компоненты, характеризующие вейвлет-элементы гибридного сигнала, а A_1, A_2 – ширина спектра основного лепестка.

Анализ полученных результатов показывает, что амплитудные значения главного спектрального компонента B_0 более чем в четыре раза превышают величину остальных. При том, что значимые спектральные компоненты B_1, B_2, B_3 удалены от B_0 на величину, более чем в три раза превышающую ширину спектра основного лепестка. Поэтому в условиях шумов, при отсутствии априорных сведений о структуре гибридного сигнала, фильтрацию логично проводить в пределах третьей гармоники основного лепестка (на рис. 5 границы основного лепестка по третьей гармонике обозначены как A_1, A_2). Но после такой фильтрации обрабатываемый сигнал теряет свойства гибридности (рис. 6).

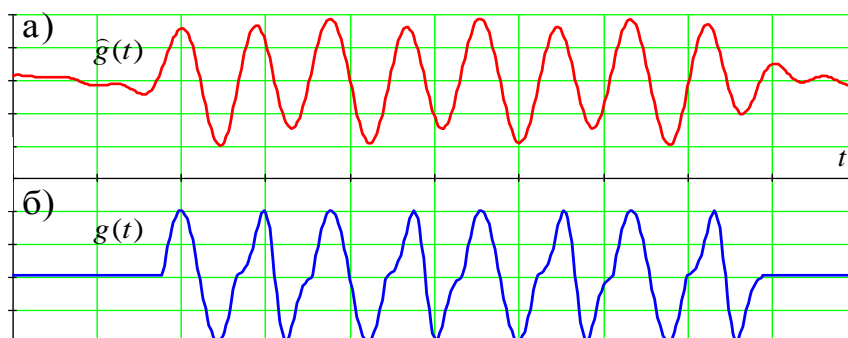


Рис. 6. Фрагменты гибридных сигналов:
а) после фильтрации; б) исходного

Результаты эксперимента, представленные на рис. 6, подтверждают правомерность сделанного предположения. Действительно, фильтрованный сигнал $\hat{g}(t)$ полностью потерял признаки гибридности. По своей структуре он стал близок к сигналам с минимальными частотными сдвигами. Поскольку фильтрация приводит к потере модуляционной информации, то недостатком гибридных сигналов является частотная избыточность.

Полученные результаты исследования гибридных сигналов подтвердили их свойство параметрической мимикрии, что делает их интересными для систем передачи конфиденциальной информации. Представленные в статье процедуры их синтеза подтверждены патентом на изобретение [13], указывают на их практическую реализуемость. Предварительная оценка показала возможность их когерентной демодуляции на уровне 10 дБ, но данный результат требует более детального исследования.

Литература

1. Щербакова А.А. История ботаники в России до 60-х годов XIX века (додравиновский период). Новосибирск: Наука, 1979. 368 с.
2. Наука о гибридах от 24 окт. 2013 г. URL: Autonews: <https://www.autonews.ru/news/58259e599a7947474311fef6> (дата обращения: 12.06.2020).
3. Дворников С.В. Обобщенные гибридные масштабно-частотно-временные распределения в частотно-временном пространстве: продолжение обзора // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 4. С. 20–35.
4. Flandrin P., Gonsalves P. Geometry of affine distributions // Proceedings of IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 25-28 October 1994. Philadelphia, PA, USA, 1994. PP. 80–83.

5. Дворников С.В., Сауков А.М. Модификация частотно-временных описаний нестационарных процессов на основе показательных и степенных функций // Научное приборостроение. 2004. Т. 14. № 3. С. 76–85.
6. Дворников С.В., Манаенко С.С., Дворников С.С. Параметрическая мимикрия сигналов, модулированных колебаниями и сформированных в различных функциональных базисах // Информационные технологии. 2015. Т. 21. № 4. С. 259–263.
7. Анжина В.А., Клушин А.А. Исследование методов повышения помехозащищенности сигналов в системах радиосвязи // Исследования наукограда. 2012. № 1 (1). С. 9–12.
8. Дворников С.С. Формирование широкополосных сигналов на основе вейвлетов для передачи сигналов диагностики // Контроль. Диагностика. 2015. № 6. С. 54–60.
9. Дворников С.С., Рашич А.В., Булаева Ю.Е. Фазоманипулированные вейвлет-сигналы // Научная мысль. 2016. № 1. С. 56–61.
10. Хеин М.З. Современное состояние проблемы обработки, анализа и синтеза речевых сигналов // Computational Nanotechnology. 2018. № 2. С. 28–32.
11. Дворников С.С., Пшеничников А.В. Предложения по формированию сигналов методом последовательной конкатенации вейвлет-функций // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 2. С. 48–54.
12. Мазуркин П.М. Асимметричные вейвлет-сигналы гравитационных волн // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 5. С. 11–18.
13. Способ формирования гибридных фазоманипулированных сигналов посредством последовательной конкатенации радиоимпульсов: пат. RU 2702750 С1; Крячко А.Ф. [и др.]; заявл. 27.11.2018; опубл. 11.10.2019, Бюл. № 29. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41182703_55246865.PDF.
14. Финько О.А., Соколовский Е.П. Алгоритм оценки риска информационной безопасности в системах защиты информации на основе логико-вероятностного метода И.А. Рябинина // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 12 (149). С. 172–180.
15. Брюхомицкий Ю.А., Макаревич О.Б. Обзор исследований и разработок по информационной безопасности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. № 12 (137). С. 8–21.
16. Кичук Д.Я. Исследование особенностей проявления технических демаскирующих признаков и применение средств защиты информации для автоматизированных систем // Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем: сб. материалов ВНИПК. Воронеж: Воронежский ин-т МВД России. 2017. С. 127–130.
17. Дворников С.В., Дворников С.С., Коноплев М.А. Алгоритм распознавания сигналов радиосвязи на основе симметрических матриц // Информационные технологии. 2010. № 9. С. 75–77.
18. Способ демодуляции сигналов с относительной фазовой модуляцией на основе адаптивного порога: пат. Рос. Федерация. № 2454014; Дворников С.В. [и др.]; заявл. 16.12.2010; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37493609_99179818.pdf.
19. Агиевич С.Н., Дворников С.В., Гусельников А.С. Описание сигналов в базисах функций сплайн-Виленкина-Кристенсона // Контроль. Диагностика. 2009. № 3. С. 52–57.
20. Дворников С.С. Спектрально-эффективные формы сигналов с непрерывной фазой для передачи дискретной информации // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2016. № 1. С. 86–93.
21. Теория передачи сигналов / А.Г. Зюко [и др.]. М.: Радио и связь, 1986. 304 с.
22. Дворников С.С. Обоснование параметров фазамодулированных сигналов для высокоскоростных систем передачи информации // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2016. № 3. С. 43–48.

23. Теоретическое обоснование синтеза ансамбля биортогональных сигналов с повышенной помехоустойчивостью / С.В. Дворников [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2015. № 5. С. 16–20.

24. Дворников С.В. Цифровой синтез спектрально-эффективных сигналов телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. 2015. № 6. С. 168–173.

25. Способ демодуляции сигналов с относительной фазовой модуляцией (варианты): пат. RU 2454014 С1; Аверьянов А.В., Бобровский В.И. [и др.]; заявл. 16.12.2010; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37493609_81701943.pdf.

26. Компактные алгоритмы синтеза манипулированных сигналов в MathCAD / С.В. Дворников [и др.] // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2020. № 2. С. 42–50.

References

1. Shcherbakova A.A. Istoriya botaniki v Rossii do 60-h godov XIX veka (dodravinovskij period). Novosibirsk: Nauka, 1979. 368 s.

2. Nauka o gibridah ot 24 okt. 2013 g. URL: Autonews: <https://www.autonews.ru/news/58259e599a7947474311fef6> (data obrashcheniya: 12.06.2020).

3. Dvornikov S.V. Obobshchennye gibridnye masshtabno-chastotno-vremennye raspredeleniya v chastotno-vremennom prostranstve: prodolzhenie obzora // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2018. T. 4. № 4. S. 20–35.

4. Flandrin P., Gonsalves P. Geometry of affine distributions // Proceedings of IEEE-SP International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis, 25-28 October 1994. Philadelphia, PA, USA, 1994. PR. 80–83.

5. Dvornikov S.V., Saukov A.M. Modifikaciya chastotno-vremennyh opisaniy nestacionarnyh processov na osnove pokazatel'nyh i stepennyh funkcij // Nauchnoe priborostroenie. 2004. T. 14. № 3. S. 76–85.

6. Dvornikov S.V., Manaenko S.S., Dvornikov S.S. Parametricheskaya mimikriya signalov, modulirovannyh kolebaniyami i sformirovannyh v razlichnyh funkcional'nyh bazisah // Informacionnye tekhnologii. 2015. T. 21. № 4. S. 259–263.

7. Anzhina V.A., Klushin A.A. Issledovanie metodov povysheniya pomekhozashchishchennosti signalov v sistemah radiosvyazi // Issledovaniya naukograda. 2012. № 1 (1). S. 9–12.

8. Dvornikov S.S. Formirovanie shirokopolosnyh signalov na osnove vejjvletov dlya peredachi signalov diagnostiki // Kontrol'. Diagnostika. 2015. № 6. S. 54–60.

9. Dvornikov S.S., Rashich A.V., Bulaeva Yu.E. Fazomanipulirovannye vejjvlet-signaly // Nauchnaya mysl'. 2016. № 1. S. 56–61.

10. Hein M.Z. Sovremennoe sostoyanie problemy obrabotki, analiza i sinteza rechevyh signalov // Computational Nanotechnology. 2018. № 2. S. 28–32.

11. Dvornikov S.S., Pshenichnikov A.V. Predlozheniya po formirovaniyu signalov metodom posledovatel'noj konkatencii vejjvlet-funkcij // Trudy uchebnyh zavedenij svyazi. 2016. T. 2. № 2. S. 48–54.

12. Mazurkin P.M. Asimmetrichnye vejjvlet-signaly gravitacionnyh voln // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. 2013. № 5. S. 11–18.

13. Sposob formirovaniya gibridnyh fazomanipulirovannyh signalov posredstvom posledovatel'noj konkatencii radioimpul'sov: pat. RU 2702750 С1; Kryachko A.F. [и др.]; заявл. 27.11.2018; опубл. 11.10.2019, Бул. № 29. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41182703_55246865.PDF.

14. Fin'ko O.A., Sokolovskij E.P. Algoritm ocenki riska informacionnoj bezopasnosti v sistemah zashchity informacii na osnove logiko-veroyatnostnogo metoda I.A. Ryabinina // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 12 (149). S. 172–180.

15. Bryuhomickij Yu.A., Makarevich O.B. Obzor issledovanij i razrabotok po informacionnoj bezopasnosti // Izvestiya YUFU. Tekhnicheskie nauki. 2012. № 12 (137). S. 8–21.
16. Kichuk D.Ya. Issledovanie osobennostej proyavleniya tekhnicheskikh demaskiruyushchih priznakov i primenenie sredstv zashchity informacii dlya avtomatizirovannyh sistem // Aktual'nye voprosy ekspluatatsii sistem ohrany i zashchishchennyh telekommunikacionnyh sistem: sb. materialov VNPk. Voronezh: Voronezhskij in-t MVD Rossii. 2017. S. 127–130.
17. Dvornikov S.V., Dvornikov S.S., Konoplev M.A. Algoritm raspoznavaniya signalov radiosvyazi na osnove simmetricheskikh matric // Informacionnye tekhnologii. 2010. № 9. S. 75–77.
18. Sposob demodulyacii signalov s odnositel'noj fazovoj modulyaciej na osnove adaptivnogo poroga: pat. Ros. Federaciya. № 2454014; Dvornikov S.V. [i dr.]; zayavl. 16.12.2010; opubl. 20.06.2012, Byul. № 17. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37493609_99179818.pdf.
19. Agievich S.N., Dvornikov S.V., Gusel'nikov A.S. Opisanie signalov v bazisah funkcij splajn-Vilenkina-Kristensona // Kontrol'. Diagnostika. 2009. № 3. S. 52–57.
20. Dvornikov S.S. Spektral'no-effektivnye formy signalov s nepreryvnoj fazoj dlya peredachi diskretnoj informacii // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2016. № 1. S. 86–93.
21. Teoriya peredachi signalov / A.G. Zyuko [i dr.]. M.: Radio i svyaz', 1986. 304 s.
22. Dvornikov S.S. Obosnovanie parametrov fazamodulirovannyh signalov dlya vysokoskorostnyh sistem peredachi informacii // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2016. № 3. S. 43–48.
23. Teoreticheskoe obosnovanie sinteza ansamblya biortogonal'nyh signalov s povyshennoj pomexoustojchivost'yu / S.V. Dvornikov [i dr.] // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2015. № 5. S. 16–20.
24. Dvornikov S.V. Cifrovoy sintez spektral'no-effektivnyh signalov televideniya // Voprosy radioelektroniki. Ser.: Tekhnika televideniya. 2015. № 6. S. 168–173.
25. Sposob demodulyacii signalov s odnositel'noj fazovoj modulyaciej (varianty): pat. RU 2454014 C1; Aver'yanov A.V., Bobrovskij V.I. [i dr.]; zayavl. 16.12.2010; opubl. 20.06.2012, Byul. № 17. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_37493609_81701943.pdf.
26. Kompaktnye algoritmy sinteza manipulirovannyh signalov v MathCAD / S.V. Dvornikov [i dr.] // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2020. № 2. S. 42–50.