Способ тестирования радиоканалов в режиме с программной перестройкой рабочей частоты

Method for testing radio channels in the mode with frch

Дворников / Dvornikov S.
Сергей Викторович
(practicdsv@yandex.ru)
доктор технических наук, профессор.
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», профессор кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
г. Санкт-Петербург

Жеглов / Zheglov K.
Кирилл Дмитриевич
(zheglov.k@gmail.com)
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», аспирант кафедры радиотехнических и оптоэлектронных комплексов.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: эффективность режима с программной перестройки рабочей частоты – efficiency of the mode with software tuning of the operating frequency; оценка пригодности радиоканала – assessment of the suitability of the radio channel; декаметровый диапазон – decameter range; повышение своевременности передачи – increase in the timeliness of transmission.

Представлены результаты разработки способа активного контроля рабочих частот для режима ППРЧ. Проведен анализ их основных достоинств и недостатков. Представлен аналитический аппарат, позволяющий оценить временные показатели, характеризующие оперативность передачи битовой информации в режиме с ППРЧ. Предложен показатель, характеризующий эффективность разработанного способа с позиций сокращения времени, необходимого для реализации процедур контроля. Демонстрируются результаты моделирования для различных условий.

The results of the development of a method for active control of operating frequencies for the frequency hopping mode are presented. The analysis of their main advantages and disadvantages is carried out. An analytical apparatus is presented that makes it possible to evaluate the time indicators characterizing the efficiency of bit information transmission in the frequency hopping mode. An indicator characterizing the effectiveness of the developed method from the standpoint of reducing the time required for the implementation of control procedures is proposed. Simulation results for various conditions are demonstrated.

Введение

Режим с программной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) находит широкое применение в системах радиосвязи различных диапазонов [1, 2]. Сущность режима заключается в том, что в ходе сеанса связи в соответствии с заданным алгоритмом происходит выбор рабочих частот из заранее подготовленного списка или заданного участка частотного диапазона [3–5].

При достаточно высокой скорости перестройки с частоты на частоту, даже в случае непригодности части назначаемых рабочих каналов, не исключается возможность в конечном итоге передать информацию с заданным качеством [6, 7]. Однако это ведет к увеличению общего времени, необходимого для сеанса связи, поскольку возникает необходимость повторной передачи той части информации, которая передавалась на непригодных для работы каналах [8, 9].

В настоящее время разработано достаточно много различных методик и алгоритмов практической реализации режима с ППРЧ. Анализ их сущности показал, что для большинства из них характерна общая проблема, которая связана с организацией выбора рабочих частот для сеанса связи и последующего контроля в процессе передачи информации их соответствия предъявляемым требованиям [10, 11].

Учитывая указанные обстоятельства, предлагаются результаты разработки способа, направленного на снижение времени, затрачиваемого на контроль пригодности радиоканалов непосредственно в ходе передачи информации в режиме с ППРЧ.

Основные этапы методики контроля пригодности радиоканалов

Согласно [10, 12], существует два основных подхода к выбору рабочих частот для организации режима с ППРЧ. Первый подход, широко используемый в радиостанциях декаметрового диапазона, основан на предварительном подборе рабочих частот, в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями, из набора потенциально возможных. И хотя на этапе предварительного тестирования удается из формируемого рабочего списка исключить однозначно непригодные для работы частоты [13], оставшиеся, в силу особенностей ионосферного распространения радио-

волн, являются условно пригодными. Поскольку в любой момент их качество может ухудшиться, достоверная передача по ним становится невозможной.

Другой подход, в большей степени используемый в УКВ и ОВЧ диапазонах [14], изначально предполагает наличие непригодных радиоканалов, поскольку основан на случайном (т.е. бесконтрольном) выборе рабочих частот без контроля соответствия их устанавливаемым требованиям.

Следует отметить, что оба подхода предполагают существенные затраты различных ресурсов. В первом случае – временного ресурса, во-втором – частотного ресурса. При этом первый подход видится более рациональным, поскольку изначально позволяет исключить из режима с ППРЧ заведомо непригодные рабочие частоты. Поэтому его целесообразно выбрать за основу для разработки нового способа.

Вместе с тем в большинстве случаев известные методы контроля пригодности рабочих каналов базируются на предположении о наличии обратного канала с высокими техническими характеристиками [14, 15], что очень сложно реализуется на практике.

В общем случае исходными данными для разработки способа контроля выступают: диапазон частот, объем передаваемых сообщений, требования по своевременности и скорость перестройки с одной рабочей частоты на другую в режиме с ППРЧ.

Рассмотрим подробнее особенности выбора диапазона рабочих частот.

Диапазон частот, из которого допускается формирование рабочего списка, емкость которого можно определить посредством выражения (1)

$$N_F = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\Delta f_{\text{С}}}, \qquad (1)$$

где $F_{\max}$ – максимально разрешенное значение частоты; $F_{\min}$ – минимально разрешенное значение частоты; Δ_{fC} – ширина рабочего канала.

Несколько сложнее ситуация складывается для линий радиосвязи декаметрового диапазона. Это связано с особенностью ионосферного распространения радиоволн, когда изначально ширина допустимого частотного диапазона определяется номиналом оптимальной рабочей частоты $f_{\text{ОРЧ}}$. В этом случае допустимый диапазон можно рассчитать по формуле

$$\Delta F = [f_{\text{ОРЧ}} - 0{,}1 f_{\text{ОРЧ}};\ f_{\text{ОРЧ}} + 0{,}05 f_{\text{ОРЧ}}]. \qquad (2)$$

А канальная емкость может быть рассчитана следующим образом:

$$N_F = \frac{(f_{\text{ОРЧ}} + 0{,}05 f_{\text{ОРЧ}}) - (f_{\text{ОРЧ}} - 0{,}1 f_{\text{ОРЧ}})}{\Delta f_{\text{С}}} = \frac{0{,}15 f_{\text{ОРЧ}}}{\Delta f_{\text{С}}}. \qquad (3)$$

В качестве допущений и накладываемых ограничений при разработке способа определим следующие:

время контроля пригодности рабочего канала не должно превышать времени передачи сообщений на рабочей частоте, которое определяется в соответствии со скоростью ППРЧ;

наличие запасных частот, определяемое списком рабочих частот, должно позволять проводить их своевременную замену в случае выявления непригодности канала;

время, отводимое для реализации процедур модуляции/демодуляции, а также для настройки возбудителя и коммутации приемно-передающих трактов, пренебрежительно мало по отношению к времени работы радиолинии на рабочей частоте (далее по тексту – субчастоте) в режиме с ППРЧ.

В основу разработки способа положен подход, представленный в [10], где процедуры контроля пригодности рабочих частот осуществлялись перед непосредственной передачей сообщений. При этом тестируемый радиоканал использовался в качестве обратного, по которому передавались результаты контроля о его пригодности. Это позволило изначально исключить необходимость наличия в организуемой радиолинии обратного высококачественного канала.

Вместе с тем анализ реализации такого подхода показал избыточность используемых в нем процедур. Это связано с применением в нем предварительного этапа тестирования, поскольку он хотя и минимизирует, но не исключает факт необходимости смены рабочей частоты ввиду непригодности канала в ходе сеанса передачи сообщений.

С учетом представленных доводов и сделанных допущений основные этапы разработанного способа определим в следующей редакции.

Этап 1. В зависимости от используемого типа канала радиолинии, формируется список рабочих частот согласно формуле (1) (для ионосферного канала используется выражение (3)). Затем с учетом имеющихся радиоданных определяется адресная группа частот и порядок их замены ввиду непригодных радиоканалов, выявленных в ходе сеанса.

Этап 2. По результатам проведенных расчетов параметров линии радиосвязи (ЛРС) определяется скорость перестройки рабочих частот. Задается код идентификации сети и номер частоты из адресной группы, с которой начинается работа ЛРС в режиме с ППРЧ. Задается время работы ЛРС в режиме с ППРЧ.

Этап 3. Последовательно на каждой частоте из адресной группы передается априори известный тестовый блок данных, который после его приема на приемной стороне ЛРС передается обратно. Передача осуществляется на той же частоте, на которой он был принят. При этом обратную передачу производится в тот момент времени, когда передающая сторона передает тестовый блок уже на следующей частоте

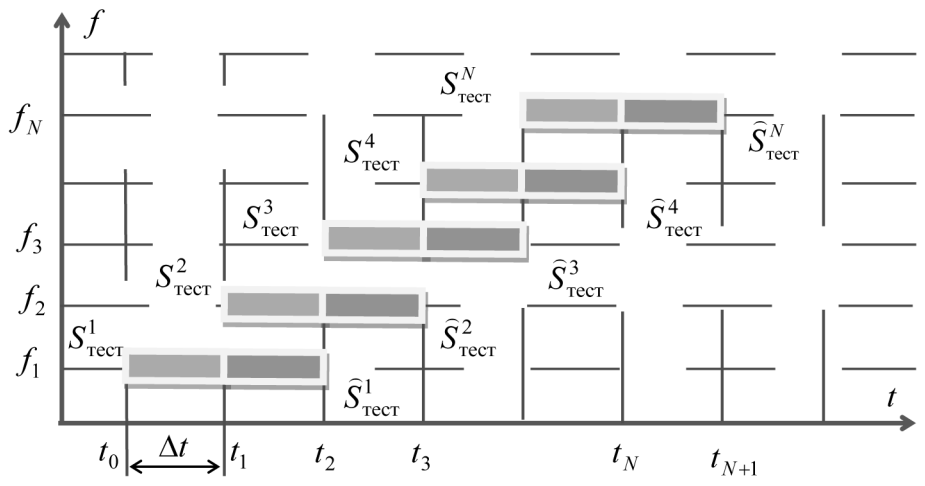

Рис. 1. Принцип тестирования рабочих частот в предлагаемой методике

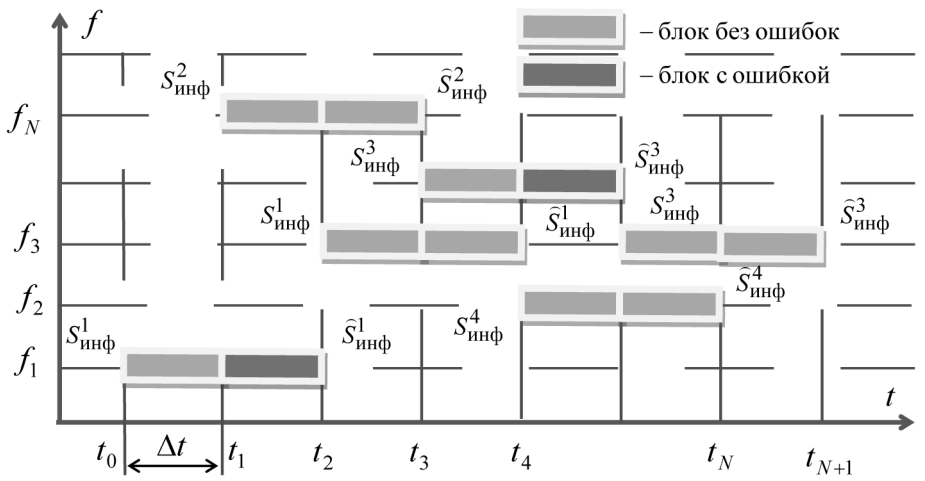

Рис. 2. Принцип совместной передачи и текущего контроля пригодности рабочих частот

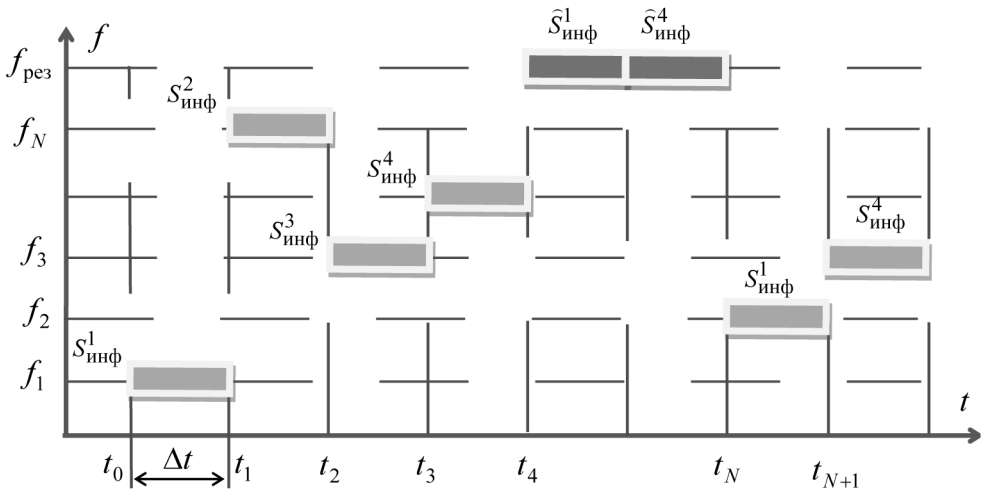

Рис. 3. Принцип традиционной передачи сообщений в режиме с ППРЧ

из адресной группы. Такой порядок двусторонней передачи тестовых блоков последовательно производится на всех частотах из адресной группы. Для повышения репрезентативности результатов тестирования передача тестовых блоков осуществляется со скоростью, на которой планируется передавать информационные блоки.

Этап 4. На передающей стороне производится сравнение принятого тестового блока с исходной копией. И уже по результатам сравнения принимается итоговое решение о целесообразности дальнейшего использования данной рабочей частоты для сеанса связи:

$$\begin{cases} \widehat{S}^*_{\text{тест}} = S^*_{\text{тест}} & \text{канал пригоден;} \\ \widehat{S}^*_{\text{тест}} \neq S^*_{\text{тест}} & \text{канал непригоден.} \end{cases} \quad (4)$$

Принцип тестирования рабочих каналов из адресной группы частот представлен на рис. 1.

В предлагаемом варианте для тестирования потребуется время, определяемое как

$$T_{\Sigma} = (N+1) \times \Delta t \quad (5)$$

где N – количество частот в адресной группе; Δt – длительность временного интервала, определяемого скоростью перестройки с одной рабочей частоты на другую в режиме с ППРЧ.

Этап 5. После подбора адресной группы рабочих частот осуществляется передача сообщения посредством информационных блоков длительностью Δt. При этом передача осуществляется только на тех частотах, которые были отобраны в ходе этапа 4.

Сам процесс передачи осуществляется аналогично процессу тестирования, т.е. на приемной стороне принятый информационный блок передают обратно на той же частоте, на которой он был принят. При этом на передающей стороне принятый обратно информационный блок сравнивается с исходным блоком, аналогично условию (4)

$$\begin{cases} \widehat{S}^*_{\text{инф}} = S^*_{\text{инф}} & \text{канал пригоден;} \\ \widehat{S}^*_{\text{инф}} \neq S^*_{\text{инф}} & \text{канал непригоден.} \end{cases} \quad (6)$$

Этап 6. В случае непригодности канал $\widehat{S}^*_{\text{инф}} \neq S^*_{\text{инф}}$ производится смена рабочей частоты из адресной группы, а информационный блок повторно передается на следующей рабочей частоте.

Принцип такой передачи показан на рис. 2

Анализ представленных этапов показывает, что в случае непригодного канала произойдет задержка в передачи сообщения только на длительности одного информационного блока, поскольку уже на следующем этапе эта частота будет исключена из рабочего списка.

Для оценки прагматичности предложенного способа необходима разработка научно-методического аппарата.

Оценка эффективности разработанного способа

Согласно представленному способу общее время, необходимое для сеанса связи, с учетом повторной передачи блоков, возникающей в связи с непригодностью каналов, будет определяться как

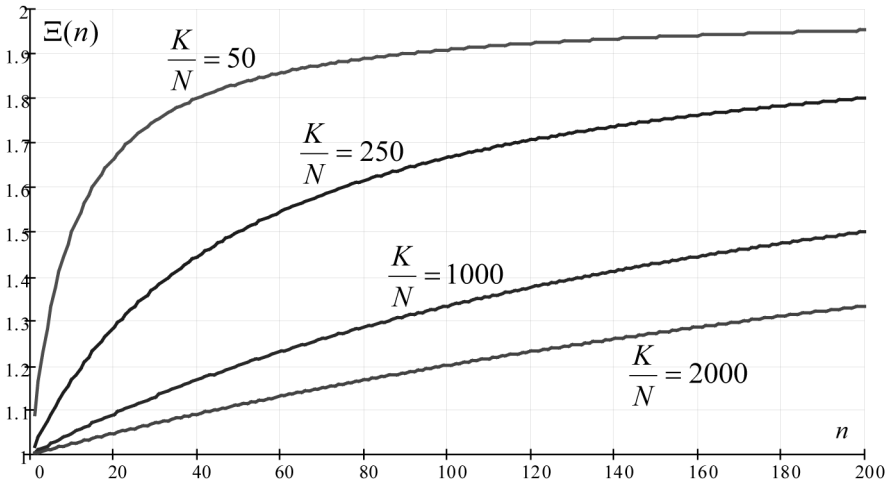

Рис. 4. Зависимость коэффициента Ξ от числа непригодных частот n

$$\widetilde{T}_{\Sigma} = T_1 + T_2 = (K+1)\Delta t + K\Delta t N / n = \\ = (K + 1 + KN / n)\Delta t. \quad (7)$$

Здесь K – число передаваемых информационных блоков; N – число рабочих частот, используемых для реализации режима с ППРЧ; n – число рабочих частот, оказавшихся непригодными в ходе сеанса связи, при реализации режима с ППРЧ.

В выражении (7) $T_1 = (K + 1)\Delta t$ характеризует время, необходимое для передачи информационного сообщения объемом K-блоков, при условии, что все каналы в ходе сеанса оказались пригодными. А $T_2 = (K\,N/n)\Delta t$ – это время, необходимое для повторной передачи тех информационных блоков, которые первоначально передавались по каналам, оказавшихся непригодными.

Заметим, что традиционный подход к организации режима с ППРЧ подразумевает, что повторная передача информационных блоков принятых с ошибками будет осуществляться только лишь после уведомления об этом передающей стороны по резервному обратному каналу [16], которое будет осуществляться по окончанию передачи всех информационных блоков. Здесь и далее под традиционным полагаем способ, исключающий контроль пригодности каналов непосредственно в процессе передачи информации от передающей стороны ЛРС на приемную.

С таких позиций общее время, затрачиваемое на передачу, можно описать следующим выражением:

$$\widehat{T}_{\Sigma} = T_1 + T_2 = K\Delta t + 2K\Delta t N / n = (1 + 2N / n)K\Delta t. \quad (8)$$

На рис. 3 представлен традиционный подход к передаче информационных блоков, в условиях непригодных каналов, для ситуации, изображенной на рис. 2.

Для получения количественной оценки воспользуемся показателем, характеризующим превышение потребного времени [10, 17], необходимого для передачи заданного объема информационных блоков в традиционном подходе, по отношению к предлагаемому:

$$\Xi = \frac{\widehat{T}_{\Sigma}}{\widetilde{T}_{\Sigma}} = \frac{(1 + 2N / n)K}{(K + 1 + KN / n)}. \quad (9)$$

Коэффициент Ξ можно рассматривать как показатель, характеризующий эффективность разработанного способа с позиций сокращения времени, необходимого для реализации процедур контроля в условиях, когда первоначально отобранные рабочие частоты становятся непригодными в ходе сеанса связи по различным причинам [18].

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента Ξ от числа непригодных каналов, при различных соотношениях K/N.

Отметим, что нелинейный характер функции $\Xi(n)$ определяется видом уравнения (9). Для рассматриваемой ситуации, увеличение числа непригодных частот, асимптотически ведет к повышению эффективности разработанного способа по отношению к традиционному подходу. При этом, чем меньше соотношение K/N, тем более продуктивным будет разработанный способ.

Заключение

Разработанный способ позволяет сократить общее время, необходимое для передачи информационных блоков, в условиях непригодности каналов, возникающих в ходе сеанса.

Предложенный коэффициент, характеризующий снижение потребного времени, необходимого для передачи заданного информационного сообщения по отношению к рассматриваемому подходу, может выступать как показатель эффективности методики управления частотно-временным ресурсом радиолинии. По данному показателю предлагаемый способ в условиях непригодных частот однозначно превосходит традиционный способ. Направление дальнейших исследований авторы связывают с использованием совместного частотно-временного подхода [19] в интересах анализа пригодности радиоканалов.

Литература

1. Агеев, А. В. Исследование и разработка алгоритмов приема сигналов ППРЧ в каналах с памятью : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : специальность 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» / Агеев Александр Владимирович ; Поволжский Государственный Университет Телекоммуникаций и Информатики. – Самара, 2009. – 122 с.

2. Макаренко, С. И. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты : монография / С.И. Макаренко, М.С. Иванов, С.А. Попов. – Санкт-Петербург : Свое издательство, 2013. – 166 с.

3. Хвостунов, Ю. С. Предложения по построению аналоговой части sdr радиоприёмных устройств декаметрового диапазона системы радиосвязи с ППРЧ / Ю.С. Хвостунов // Техника средств связи. – 2022. – № 1 (157). – С. 35–44.

4. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи с медленной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / С.В. Дворников, Я.А. Домбровский, М.А. Семисошенко [и др.] // Информация и Космос. – 2016. – № 4. – С. 11–14.

5. Использование турбо-кодов в радиосигналах с ППРЧ / С.А. Якушенко, А.Н. Забело, В.В. Антонов [и др.] // Colloquium-Journal. – 2020. – № 1–1 (53). – С. 37–42.

6. Помехоустойчивость канала передачи данных с ППРЧ при мягком декодировании с использованием оценок спектральной плотности мощности помехи / В.П. Бердышев, А.А. Близнюк, С.Б. Жиронкин [и др.] // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2020. – Т. 13, № 7. – С. 843–854.

7. Захаров, В. Л. Методы построения помехозащищенных ППРЧ-сигналов / В.Л. Захаров, Е.В. Витомский // Известия Института инженерной физики. – 2019. – № 4 (54). – С. 50–54.

8. Дворников, С. В. Модель деструктивного воздействия когнитивного характера / С.В. Дворников, А.В. Пшеничников, М.Ю. Аванесов // Информация и Космос. – 2018. – № 2. – С. 22–29.

9. Иванов, М. С. Повышение пропускной способности объединенной воздушно-космической сети связи. Часть 1. модели и методика повышения пропускной способности объединенной сети связи на основе использования mesh-технологий / М.С. Иванов, А.В. Аганесов, С.И. Макаренко // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 3. – С. 183–259.

10. Дворников, С. В. Аппарат анализа частотного ресурса для режима псевдослучайной перестройки рабочей частоты / С.В. Дворников, С.С. Дворников, А.В. Пшеничников // Информационно-управляющие системы. – 2019. – № 4 (101). – С. 62–68.

11. Прохоров, В. Е. Обоснование требований к числу частотных каналов систем радиосвязи с ППРЧ / В.Е. Прохоров // Теория и техника радиосвязи. – 2018. – № 3. – С. 66–77.

12. Запорожец, Г. В. Использование геометрического подхода для оценки эффективности функционирования радиоэлектронных систем РТК с ППРЧ в условиях радиоэлектронного конфликта / Г.В. Запорожец, В.Л. Руденко, К.К. Скогорев // Радиотехника. – 2018. – № 12. – С. 103–110.

13. Ржаных, А. В. Оценка временных характеристик процесса синхронизации модема с ППРЧ в условиях воздействия помех / А.В. Ржаных, А.В. Лещинский, С.Н. Иванов // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2017. – Т. 7, № 2. – С. 242–244.

14. Натурные испытания макета комплекса местоопределения ИРИ с ППРЧ ОВЧ-диапазона / Д.Л. Бережных, А.И. Вагин, А.В. Левша, А.М. Сауков // Наукоемкие технологии. – 2009. – Т. 10, № 12. – С. 35–39.

15. Тихонов, С. С. Обобщенная математическая модель сигналов с ППРЧ в базисах функций сплайн-характеров / С.С. Тихонов // Информация и Космос. – 2016. – № 3. – С. 47–51.

15. Оценка помехозащищенности линий радиосвязи в режиме с медленной программной перестройкой рабочей частоты / А.Ю. Гордейчук, С.В. Дворников, В.А. Иванов [и др.] // Труды учебных заведений связи. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 36–42.

16. Быстров, Д. А. Оценка возможности совершенствования систем передачи данных специального назначения на основе когнитивной псевдослучайной перестройки рабочих частот / Д.А. Быстров // Стратегическая стабильность. – 2022. – № 3 (100). – С. 84–86.

17. Парамонов, А. А. Некогерентный прием сигналов с внутрисимвольной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты с мажоритарным сложением субсимволов / А.А. Парамонов, Ю.И. Худак, Ван З. Хоанг // Радиотехника и электроника. – 2021. – Т. 66, № 9. – С. 884–890.

18. Пшеничников, А. В. Управление частотно-временным ресурсом помехозащищенных линий радиосвязи с программной перестройкой рабочей частоты / А.В. Пшеничников, А.Ю. Гордейчук // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2020. – № 1. – С. 104–108.

19. Частотно-временное оценивание параметров сигналов на основе функций огибающих плотности распределения их энергии / С.В. Дворников, Е.Ю. Бородин, Х. Маджар, Ю.Х. Махлуф // Информация и Космос. – 2007. – № 4. – С. 41–45.