

## Технология управления помехоустойчивостью на основе частотно-модулированных сигналов

### Павликов Сергей Николаевич

кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники и радиосвязи Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, psn1953@mail.ru

### Крючков Андрей Николаевич,

кандидат технических наук., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и радиосвязи Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, 10\_10\_53@mail.ru

### Копеева Екатерина Юрьевна

аспирант кафедры радиоэлектроники и радиосвязи Морского государственного университета имени адмирала Г.И. Невельского, г. Владивосток, Россия, kateya.kopayeva.97@mail.ru

### АННОТАЦИЯ

**Введение:** Объектом исследования является частотно модулированный сигнал, предметом - технологии управления помехоустойчивостью. В работе проанализированы проблемы применения частотно модулированных сигналов с большой базой. **Проблема:** требуется обеспечить качественные характеристики радиосистем в условиях помех. Ключевой технологией в этом процессе является помехоустойчивость. Задача состоит в не только увеличении помехоустойчивости, а управлении на правах коллективного использования связного ресурса. В результате исследований был определен вид сигнала, потенциал которого значительно превышает сложившееся представление. В роли которого, принят сигнал с гиперболической частотной модуляцией. **Цель работы:** состоит в формировании новой математической модели сигнала с управляемой помехоустойчивостью канала за счет выбора параметров. Критерием оценки эффективности принято отношения сигнал/помеха на выходе согласованного с сигналом фильтра. Экспериментальные исследования системы: сигнала и процессов обработки показали предпочтительные: форму сигнала, параметры, процедуры обработки сигналов и рекомендации по повышению работоспособности средств связи не зависимо от скоростей перемещения абонентов в диапазоне от 0 до  $10^9$  м/сек и при значительном уровне помех. Технология управления помехоустойчивостью каналов позволяет повысить эффективность метода многомерной многопараметрической маршрутизации в системах связи с пакетной передачей данных, метода построения виртуальных временных сетей, а также расширит возможности по применению радио ресурсов для совместимости задач: связи, навигации и мониторинга среды. **Обсуждение:** новизна состоит в управлении помехоустойчивостью за счет мониторинга отношения сигнал помеха на выходе согласованного фильтра и алгоритма назначения формы и параметров сигнала.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** помехоустойчивость; доплеровская трансформация; отношение сигнал-помеха.

## Введение

Среди множества направлений исследований эффективности систем связи актуально повышением управления помехоустойчивостью сигнала (символа) канала связи. Ключевая проблема связана с помехоустойчивостью импульсного сигнала с гиперболической частотной модуляцией (СГЧМ), что позволит при их групповом кодировании получить еще больший эффект в управлении помехоустойчивостью канала связи. В области кодирования сделано многое, однако, решение задачи управления ПУ единичного сигнала (символа) позволит получить системный эффект, который превзойдет достигнутое в кодировании и модуляции.

Известно определение: «помехоустойчивость - способность радиоэлектронной системы функционировать в режиме и с требуемыми параметрами при воздействии преднамеренных и непреднамеренных помех.

Количественный показатель помехоустойчивости – точность воспроизведения сигналов по месту приёма в условиях помех или отношение мощностей сигнала и помехи (ОСП). Под помехоустойчивостью понимается соотношение по уровню сигнала и помехи, обеспечивающее требуемые параметры приёма данных.

Помехоустойчивость также можно оценивать вероятностями ложной тревоги и пропуска цели, помехами при передаче дискретных данных и т.п. Для сведения к минимуму воздействия помех на радиоэлектронную систему используют оптимизируемые способы приема сигнала и самонастраивающиеся адаптивные системы».

«Способность системы передачи противостоять вредному влиянию помех называется помехоустойчивостью» [1]. В работе В.А. Котельникова [2] среди способов борьбы с помехами указаны: изменение формы сигналов и применение согласованного с ним приемника. Что и использовано в работе применительно к аддитивной модели канала сигнала со стационарной помехой [2]. Критерием повышения помехоустойчивости принято минимально допустимое отношение уровней сигнал-помеха на входе согласованного фильтра (СФ или коррелятора) для обеспечения устойчивой работы системы связи при заданных параметрах и ограничениях.

Задача решается для импульсного сигнала с выбранной формой и параметрами, соответствующие определенному символу, согласованного заблаговременно участниками сеанса связи алфавита.

Исследование темы направлено на – управление помехоустойчивостью при передаче информации применительно к системам связи независимо от динамики относительного перемещения с заданными условиями и ограничениями, путем применения сигнала с изменением частотной модуляцией по гиперболической функции (ГЧМ) с расширенным спектром управляемых параметров для увеличения объема алфавита с улучшенными авто- и взаимно-корреляционными свойствами. Объектом исследования выбран СГЧМ. Предмет - управления помехоустойчивостью. Целью работы - разработка метода управления помехоустойчивостью.

Основным критерием является степень снижения допустимого значения отношения сигнала к уровню помех на входе корреляционного приемника [2, стр.30-31]. Для этого обоснован выбор формы и управляемых параметров сигнала с ГЧМ, определен характер преобразований в канале, процедуры обработки принятого сигнала-символа, а также разработан метод управления параметрами сеанса связи с целью адаптации по критерию минимально допустимого ОСП на входе СФ, при котором, обеспечивается необходимое увеличение ОСП на выходе СФ до уровня, требуемого для устойчивого решения функциональных задач системы связи в заданных условиях.

Иначе говоря, предлагаемая технология, обеспечивающая при минимуме ОСП на входе СФ гарантированное увеличение до необходимого и достаточного ОСП на выходе СФ, при минимуме используемых связных ресурсов.

В работе решаются следующие задачи.

1. Анализ и обоснование выбора направления развития;
2. Анализ методов передачи информации с использованием сигналов с ГЧМ
3. Метод управления ПУ.

**Обоснование выбора направления управления помехоустойчивостью.**

В результате анализа работ [1 - 9] по повышению помехоустойчивости можно выделить следующие принципы повышения помехоустойчивости:

1. - повышение значимости параметров управляющих фазой низкочастотных компонентов, которая «будет меньше искажена при распространении сигнала» [3];
2. - расширение математической модели (ММ) сигнала, увеличивая количество управляемых параметров, окрашивающих сигнал отлично от аддитивных шумов окружающих источников излучений;
3. - повышение «помехоустойчивости без увеличения энергии, длительности и ширины спектра» [2].

В работе предложено решить проблему ПУ не за счет кодирования длинными кодами, т.к. они не соответствуют современным требованиям по временной задержке (для 5 и 6 G реакция должна быть менее 0.1 мс) [10] для мобильных абонентов на скоростях относительного перемещения до тысяч км/час, при ОСП меньше 1 в точке приема. Предложено решить проблему помехоустойчивости для одного модулированного импульса.

В [11] на стр. 276 показано определение помехоустойчивости для произвольного сигнала в виде

$$ОСП_{\text{вых}} = ОСП_{\text{вх}} \times 2 \times (F \times T), \tag{1}$$

где F – полоса сигнала; T- длительность. Принято считать F×T базой сигнала или количество степеней свободы. Увеличивая базу можно повышать: ПУ, пропускную способность, достоверность передачи и др. В то же время количество степеней свободы сигнала постоянно возрастает и уже используется. По теореме Шеннона объем информации, передаваемой по каналу, прямо пропорционально зависит от объема связного ресурса [12,13]:

$$I = F \times T \times \text{Log}(1 + \text{ОСП}), \tag{2}$$

где: F – полоса сигнала; T – длительность сигнала.

Дополнив формулу (2) уже используемыми технологиями получим [14]:

$$I = (F/\delta f) \times (T/\delta t) \times (DD/\delta dd) \times (Sv/\delta sv) \times (Sg/\delta sg) \tag{3}$$

где  $\delta f$  - ширина выделенного ресурса по частоте одному каналу;

$\delta t$  – ширина выделенного ресурса по времени одному каналу;

$\delta$  – размер измеряемого ресурса в многомерном пространстве разделения каналов (с учетом защитного интервала);

DD – динамический диапазон мощности сигнала;

Sg – сектор в горизонтальной плоскости;

Sv – сектор в вертикальной плоскости;

$\delta sg$  - ширина характеристики направленности в горизонт плоскости;

$\delta sv$  - ширина характеристики направленности в вертикальной плоскости.

При поиске направления по расширению методов повышения помехоустойчивости был найден ближайший аналог в [11]. В главе XII приведен математический аппарат выражения XII.41 и XII.42 по расчету ПУ. В формулах присутствуют сомножитель с параметром доплеровского искажения. Далее на рис. XII.6 показан выигрыш в помехоустойчивости за счет применения частотно-модулированных (ЧМ) сигналов в виде функции

$$\text{ОСП}_{\text{вых}} = \text{ОСП}_{\text{вх}} [ \text{Log}(F \times T), (1-\alpha) ], \text{ дБ}, \tag{4}$$

где  $\alpha = (1 - V/C)$  - масштабный коэффициент доплеровской трансформации;

V – скорость радиального перемещения абонентов;

C – скорость распространения сигнала в среде канала.

В диапазоне  $\text{Log}(F \times T)$  от 0 до 6 дБ и параметра  $(1-\alpha)$  в диапазоне  $10^{-2}$  до  $10^{-5}$ . Выигрыш достигает 50 дБ, что показывает потенциал ЧМ сигналов. Приведенные данные соответствуют результатам экспериментальных исследований по внедрению СГЧМ.

Предложено использовать данный подход к построению, анализу и управлению ПУ. Выбор сигнала связан с требованиями, как чувствительности, так и независимости к доплеровской деформации в канале [15. - 17].

**Анализ методов передачи информации с использованием сигналов с ГЧМ.**

Недостатком известных технических решений на основе СГЧМ является ограниченность потенциала управляемых параметров [16,17].

В известных методах [16, 18] использован сигнал вида:

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t-\tau}{T}\right) \sin(\Omega \ln(t-\tau))(t-\tau)^{-\gamma} \tag{5}$$

где  $\Omega$  – начальная частота сигнала с ГЧМ;  $\gamma = \text{const}$  ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ),  $\tau$  – смещение сигнала ГЧМ относительно начала его отсчета; t – время.

Увеличение управляемых параметров приведено в описании способа [19], основанный на операциях сдвига и изменения основания логарифма.

В работе [15] приведена другая форма СГЧМ, используемая для компенсации Доплеровского эффекта, описываемая выражением:

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \sin(2\pi F \cdot \ln(1 - \kappa \cdot t)) \tag{6}$$

где обозначены:  $F$  и  $\kappa$  постоянные;  $T$  – аддитивная длительность сигнала;  $t$  – параметр сигнала, соответствующий изменению его во времени.

Сравнительный анализ рассмотренных сигналов приведен в табл.1.

С целью использования достоинств известных двух сигналов, предложено применить сигнал вида [20]:

$$S(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \sin(\Omega \ln(e + k \cdot t)) \tag{7}$$

где  $e$  – регулируемый параметр сдвига в области высокой крутизны логарифмической функции, а  $k$  – регулируемый масштаб.

Величина  $e$  – лежит в пределах малых значений, например 0,1, в отличие от выражения 6, для которой рабочая точка смещается от  $t = 1$  влево по пологому склону логарифмической функции, в то время как для (7) рабочая точка от малого значения в районе 0 сдвигается вправо по участку функции с наибольшей крутизной.

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики сигналов (5), (6) и требуемого

Характеристики	Сигнал (5)	Сигнал (6) [35]	Требуемый
Область определения $t$	$T > \tau$ , От $T$ до $\infty$	От 0 до $\infty$	От 0 до $\infty$
Управление сдвигом	Да	Нет	Да
Управление масштабом	Нет	Да	Да
Крутизна участка преобразования	высокая	низкая	высокая
Относительный объем ансамбля сигналов	Большой	Малый	Большой

Крутизна преобразования аргумента логарифмической функции закладывают в сигнал (5 - 7) для оригинальных изменений связей элементов ММ структуры сигнала под воздействием доплеровской деформации, когда каждая компонента фазы трансформируется под воздействием Доплера с изменением масштаба в  $\alpha$  раз, где  $\alpha = 1 \pm V/C$  – доплеровский параметр для связи между подвижными абонентами [16,17];  $V$  – радиальная составляющая скорости между излучателем и приемником;  $C$  – скорость распространения сигнала в среде;  $\tau_a$  - временной сдвиг отклика при наличии доплеровских искажений [16].

$$\tau_\alpha = \frac{1-\alpha}{\alpha} \approx \frac{V}{C} \tag{8}$$

В результате сигнал на приемник поступает в виде [20]

$$S_{\Pi}(t) = \text{rect}\left(\frac{\alpha t}{T}\right) \frac{\sqrt{\alpha}}{(\alpha t)} \sin[\Omega \ln(\alpha(e + k(t - \tau' - \tau_\alpha)))] \tag{9}$$

где  $\tau'$  – задержка за счет конечности скорости распространения электромагнитных волн между абонентами. Для обработки используют ортогональные ожидаемому сигналу эталоны известные на приемной стороне, например косинусного вида:

$$S_c(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \cos(\Omega \log(e + kt)) \tag{10}$$

В результате корреляционной обработки входного сигнала (9) в сумме с помехами канала с ортогональной парой синусного и косинусного (10) эталонов получают два корреляционных отклика, которые в момент компенсации задержек ( $\tau' - \tau_\alpha = 0$ ) и замены вырезающей функции  $\text{rect}(\cdot)$  введением пределов интегрирования, соответствующих началу и концу излучаемого сигнала ( $t_1 = \tau_i - T/2$ ;  $t_2 = T/2 + \tau_i$ ) примут вид [16 -18]:

$$R_s(e) = \cos(\Omega \log \alpha) \{E\} \tag{11}$$

$$R_s(e) = \sin(\Omega \log \alpha) \{E\} \tag{12}$$

Возводя в квадрат (11) и (12) и просуммировав получим откли не зависящий от доплеровского эффекта.

Этот результат сможет получить только легитимный абонент с известными заранее квадратурными эталонами. А для нелегитимного абонента выделение такого сигнала сопряжено с неизвестной доплеровской деформацией за счет неопределенности курса и скорости излучающей стороны.

Для передачи информации предлагается преобразование, когда каждый символ алфавита, соответствующий паре параметров: временному сдвигу  $e_i$  и масштабу  $k_j$  аргумента сигнала:  $a_{i,j} = a_{i,j}(e_i, k_j)$ .

Таким образом, предлагается использовать, кроме сдвига  $e_i$  фазы мультипликативного сигнала в (7), дополнительно изменяемое от символа к символу значение коэффициента  $k_j$  модулирующей функции. Кроме того, операция сравнения заменена на операцию накопления, что позволило уйти от ограничения  $t$  и сместить рабочий участок аргумента в область высокой крутизны логарифмической функции, отличающейся в 10 и более раз по сравнению с используемым участком у А. Рихачека [15]. Чем выше крутизна преобразования аргумента логарифмической функции тем чувствительнее сигнал к доплеровскому преобразованию. Которая в свою очередь определяется регулируемым масштабом времени. Сочетание внесенных процедур дает системный эффект в повышении контрастности корреляционных свойств такого сигнала.

Следовательно, происходит расширение объема ансамбля сигналов по сравнению с прототипом без ухудшения помехоустойчивости, при контролируемом изменении его внутренней фазовой структуры и выбором на передающей и приемной сторонах согласованных параметров сигналов. При таком способе возрастает объем алфавита не менее чем в  $S$  – раз, где  $S$  количество сочетаний пар параметров  $(e_i, k_j)$  сигналов, одновременно работающих и не мешающих друг другу каналов связи между абонентами.

Применение двух и более параметров сигнала (7), в качестве признака распознавания сигнала квадратурным коррелятором, выделяет соответствующий символ излученный передающей стороной.

Количество сочетаний из  $n$  по  $k$  определяется известным выражением.

В таблице 2 показан диапазон увеличения алфавита сигналов, например, для  $n = i+j$  рассмотрим значения: 100, 200 и 300. При этом, количество значений по параметрам сдвига и масштаба лежат в пределах нескольких сотен каждый, а объем ансамбля – десятки тысяч. Их объем связан с базой используемых сигналов, которая определяет элемент разрешения, например по скорости и дальности по угловым координатам и др.

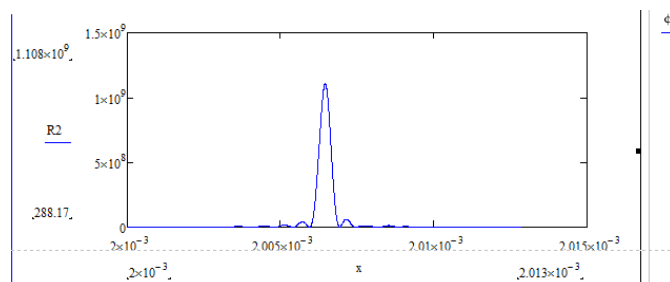
**Таблица 2.** Объем алфавита, как количество сочетаний параметров.

	n=100	n=200	n=300	n=400
k=2	4950	19900	44850	79800

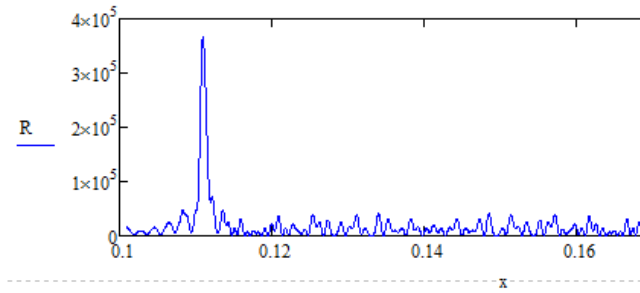
Экспериментальное исследование метода для радиосигналов путем моделирования в среде MathCAD позволил определить допустимые области регулируемых параметров. Результаты моделирования метода приведены в табл. 3. Формы отклика СФ при различных вариантах параметров приведены на рисунках 1 - 4. Рисунок 1 - 2 демонстрируют хорошие контрасты при обнаружении символа сообщения. Отклик работы метода на рисунках 3 и 4 демонстрирует отсутствие контраста, варианты исключаются из рекомендованного списка сигналов.

**Таблица 3.** Диапазон параметров

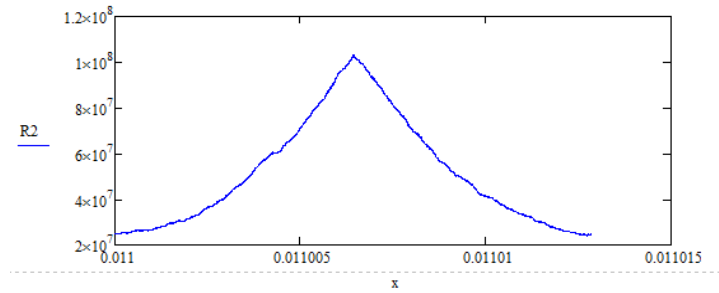
№	Объем	Частота, МГц	Радиальная скорость, км/ч	Сдвиг, с	Отношение помеха/сигнал	Отклик	Отношение главного отклика к боковому
мин	1024	1	0	0,001	1	0	1
мак	16328	900	2000	0,2	80	$10^9$	110
Оптимальный	1024	1	1000	0,1	40	110000	110
Отказ					100	-	



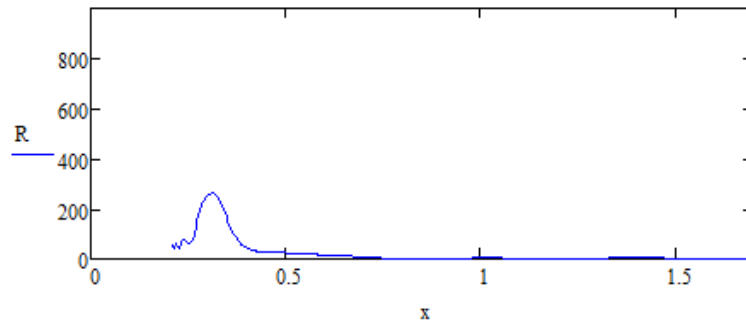
**Рис. 1.** Вид отклика СФ



**Рис. 2.** Вид отклика СФ



**Рис. 3.** Вид отклика СФ



**Рис. 4.** Вид отклика СФ

Предпочтительные варианты для радио сигналов при:

Вариант1:  $\tau = 0,1$  для  $v = 800$  км/ч,  $q_{вх} = 0.4$  и  $\Omega = 10^6$  получаем  $q_{вых} = 10^3$ ;

Вариант2:  $\tau = 0,001$  для  $v = 1000$  км/ч,  $q_{вх} = 1$  и  $\Omega = 10^6$  получаем  $q_{вых} = 1,3 \cdot 10^9$ .

Метод демонстрирует работоспособность в рекомендованных вариантах параметров на больших и малых скоростях за счет инвариантных свойств сигнала к доплеровской деформации. Значение ОСП на выходе СФ изменяется в пределах до  $10^9$ .

Что позволяет преобразовать выражение (1) с учетом (3) для управления ПУ к виду

$$ОСП_{вых} = ОСП_{вх} \times 2 \times (F/\delta f) \times (T/\delta t) \times (C/\delta v),$$

где  $\delta v$  – элемент разрешения по скорости доплеровской деформации принятого сигнала.

Появление новой совокупности параметров расширяет возможности управлять помехоустойчивостью.



## Метод управления ПУ.

Предложена методика тестирования канала для определения перечня управляемых параметров сеанса связи, на основе анализа которого проводится управление помехоустойчивостью сеанса связи.

В роли тестового сигнала может быть использован тот же сигнал с ГЧМ, но отличным значением хотя бы по одному параметру от информационного, в отличие от нулей, единиц и чередующихся нулей и единиц, которые оптимальны для многоимпульсных пакетов. Алгоритм управления ПУ содержит операции (см. рис. 5):

1.- постановка задачи на подготовку для проведения сеанса связи между заданными абонентами, для этого формируется оговоренный заранее вариант запроса и действий, исходные данные: форма сигнала, информация о своем местоположении и параметрах движения, а также вариант действий второго абонента;

2.- изменение параметров последовательно по вариантам для тестирования;

3. - излучение первым абонентом тестового сигнала;

4. - обработка принятого сигнала и оценка его помехоустойчивости, путем проверки условия соответствия требуемым диапазонам ОСП на выходе СФ:

5. - если ОСП на выходе СФ выше требуемого, то переход к блоку 10;

6. -если ОСП на выходе СФ ниже требуемого, то переход к блоку 11;

7. - проведения сеанса связи.

8. – проверка условий работоспособность в норме?: да к п. 9, нет к п.12;

9. проверка условия срок сеанса завершен ? нет к п.7, иначе окончание;

10. изменение параметра по вариантам, переход к п.4;

11. Изменение параметра по вариантам, переход к п.4;

12. Изменение одного параметра дают желаемый результат? : да к п. 13, иначе к 14;

13. управление параметрами сигнала по рангу вариант 1, согласно табл. 3, и переход к п. 2;

14. Изменение количества параметра дают желаемый результат? :Нет к п. 15, иначе окончание;

15; управление двумя и более параметрами сигнала по рангу вариантов, согласно табл. 4 и табл. 5, и переход к п. 2 алгоритма; Окончание.

**Таблица 4.** Варианты настройки параметров

Пара- метры	1i			2j			3k			4l			5m			6n		
	н	с	в	н	с	в	н	с	в	н	с	в	н	с	в	н	с	в
1	1н					2в	3н			4н			5н					6в
2			1в	2н					3в			4в			5в	6н		
Р																		

**Таблица 5.** Рейтинг настройки параметров

Значимость	1	2	3	4	5	6	7
Параметры	е	к	α	в	Ω	Т	р

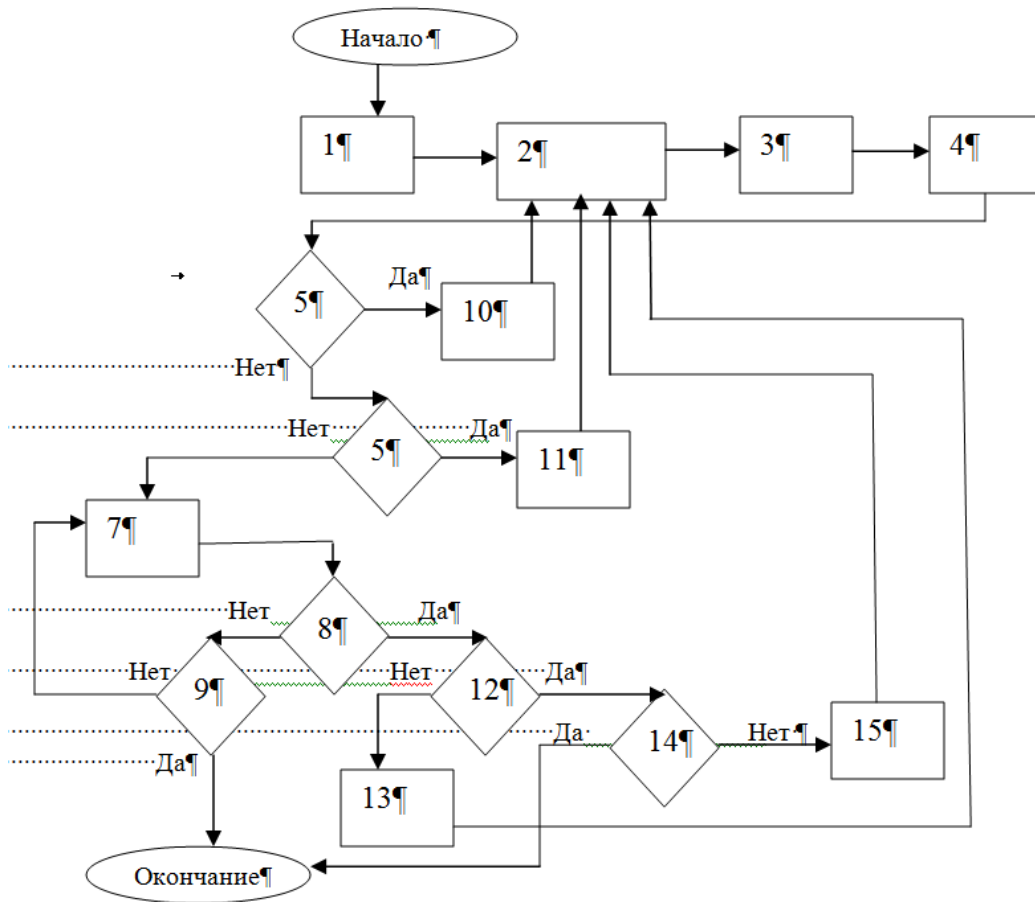


Рис. 5. Алгоритм управления помехоустойчивостью

*Примечание.* Обозначены: 1. параметр сдвига  $e$ ; 2. параметр масштаба; 3. доплеровская параметр; 4. основание логарифма; 5. начальная частота  $\Omega$ ; 6.. длительность  $T$  сигнала; 7. мощность  $p$  излучения.

Проведение процедур тестирования до получения желаемого результата при минимальном используемом связном ресурсе, т.е. минимуме одновременно изменяемых параметров и с учетом их рейтинга (желательно «н», затем «с» и только потом «в»).

Основные правила управления ПУ:

1. ОСП на выходе СФ соответствует заданному диапазону позволяет перейти к проведению сеанса связи, ОСП на входе СФ не является достаточным для перехода к сеансу связи;

2. Для снижения ОСП выходе СФ: уменьшение 1, 3, 4, 6, и/или увеличение 2 и 5.

3. Для увеличения ОСП на выходе СФ - наоборот п.2.

4. Для снижения ОСП входе СФ: уменьшение 1, 3, и/или увеличение 5 и 6.

5. Для увеличения ОСП входе СФ - наоборот п. 4.

6. В случае отсутствия достигнутого соответствия ОСП требованиям переход к п. 1 с изменением:

А. Для увеличения ОСП:- формы сигнала: от ММ вида № (5) к виду (7); компенсации собственного Доплера; снижение скорости передачи; снижение собственных помех.

В. Для уменьшения ОСП:

Увеличение маскирующих помех за счет дополнительных излучений в диапазоне частот сигнала.

### Заключение

1. Исследование характеристик ГЧМ сигналов позволяет для сигнала вида (5 и 6) управлять помехоустойчивостью с помощью 4 параметров и для сигнала вида (7) – шестью;

2. Расширение спектра управляемых параметров позволяет настройкой добиться желаемого ОСП без использования всех потенциальных возможностей (резервных);

3. Технология управления ПУ каналов позволяет повысить эффективность метода многомерной многопараметрической маршрутизации в системах связи с пакетной передачей данных, метода построения виртуальных временных сетей, а также расширит возможности по применению радио ресурсов для совместимости задач: связи, навигации и мониторинга среды.

### Литература

1. Харкевич А.А. Борьба с помехами. М.: Наука, 1965. 275 с
2. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. Госэнергоиздат, 1956. 151с.
3. Немировский М.С. Помехоустойчивость радиосвязи. Л.: «Энергия», 1966, 296с.
4. Помехоустойчивость и эффективность систем передачи информации / [А. Г. Зюко, А. И. Фалько, И. П. Панфилов и др.]; Под ред. А. Г. Зюко. Москва : Радио и связь, 1985. 271 с.
5. Харкевич А.А. Избранные труды. Т.3 Теория информации. Оpozнание образов.. М. 1973. Наука 524с.
6. Склад, Бернард. Цифровая связь : теоретические основы и практическое применение / - 2-е изд., испр. М.: Вильямс, 2007. 1099 с.
7. Голяницкий И.А. Математические модели и методы в радиосвязи / Под ред. Ю. А. Громова. М.: ЭКОТRENДЗ, 2005.
8. Инфокоммуникационные сети: энциклопедия. Том 1. Инфокоммуникационные сети: классификация, структура, архитектура, жизненный цикл, технологии / С. П. Воробьев, А. Е. Давыдов, В. В. Ефимов, В. И. Курносов;/ под ред. С. П. Воробьева. СПб.: Научные технологии, 2019. 739 с.
9. Ханцо, Лайош. Системы радиодоступа 3G, HSPA и FDD в сравнении с технологией TDD / Л. Ханцо, Д. Блох, С. Ни ; пер. с англ. Н. Л. Бирюкова ; под ред. В. Н. Сорокина. Москва : Техносфера, 2012. 671 с.
10. Степунин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. Инфраинженерия. 796 с.
11. Зарайский В.А. Теория гидролокации / В. А. Зарайский, А. М. Тюрин ; Воен.-мор. акад. Ленинград : [б. и.], 1975. 603 с.
12. Верещагин А.В. Методы повышения помехоустойчивости передачи информации в радиоканалах мобильных программно-технических комплексов. Санкт-Петербург : БГТУ, 2018. 157 с.
13. Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту. Под ред. Вэнь Тонг, Пейин Чжу / пер. с англ. В. С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2022. 624 с.
14. Мочалов А.В. Новые направления в развитии телекоммуникационных систем: монография / А. В. Мочалов, С. Н. Павликов, Е. И. Убанкин. Владивосток : Изд-во ВГУЭС, 2016. 112 с.
15. Рихачек А.В. Сигналы, допустимые с точки зрения доплеровского эффекта // ТИИЭР. 1966, Т.54. №6. С. 38 – 46.

16. Сапрыкин В.А. Теория гидроакустики и цифровая обработка сигналов / В. А. Сапрыкин, С. П. Рокотов ; Высш. воен.-мор. уч-ще радиоэлектроники им. А. С. Попова. Петродворец :Ч. 2. Петродворец : ВВМУРЭ, 1992. 415 с.

17. Сапрыкин В.А. Об анализе случайных процессов на основе преобразований, инвариантных относительно аддитивно-мультипликативных сдвигов/ В.А. Сапрыкин, А.Е. Докукин, С.В. Ковтуненко// Труды седьмого Всесоюзного симпозиума. Методы представления и аппаратный анализ случайных процессов и полей. Л.:1974. Т.10.

18. Патент РФ, №2713384, Способ передачи информации с помощью широкополосных сигналов БИ №40 от 05.02.20. Авторы: Павликов С.Н. и др. [https://yandex.ru/patents/doc/RU2713384C1\\_20200205](https://yandex.ru/patents/doc/RU2713384C1_20200205).

19. Патент РФ, №2734699, Способ передачи информации с помощью широкополосных сигналов, БИ №30 от 22.10.20. Авторы: Павликов С.Н. и др. [https://yandex.ru/patents/doc/RU2734699C1\\_20201022](https://yandex.ru/patents/doc/RU2734699C1_20201022).

20. Патент РФ, №2816580. Способ передачи информации с помощью широкополосных сигналов. Оpubл. 02.04.2024, Авторы: Павликов С.Н. и др. <https://patents.google.com/patent/RU2816580C1/ru>.

## REQUENCY-MODULATED NOISE CONTROL TECHNOLOGY

**SERGEJ N. PAVLIKOV**

Vladivostok, Russia, psn1953@mail.ru.

**ANDREY N. KRYUCHKOV**

Vladivostok, Russia , 10\_10\_53@mail.ru.

**EKATERINA YU. KOPAEVA**

Vladivostok, Russia, katya.kopaeva.97@mail.ru

### ABSTRACT

**Introduction:** the object of the study is a frequency-modulated signal. The subject is noise immunity control technologies. The paper analyzes the problems of using frequency-modulated signals with a large baseline. Problem: You need to ensure the quality of radio systems in an interference environment. The key technology in this process is noise immunity. The task is not only to increase noise immunity, but to control it on the basis of the collective use of a coherent resource. As a result of the research, the type of signal was determined, the potential of which significantly exceeds the existing idea. In the role of which, a signal with hyperbolic frequency modulation is taken. The purpose of the work is to form a new mathematical model of a signal with controlled channel immunity by selecting parameters. The efficiency criterion is the signal-to-noise ratio at the output of the filter matched to the signal. Experimental studies of the system, signal and processing processes have shown the preferred ones: signal shape, parameters, signal processing procedures and recommendations for improving the performance of communication facilities regardless of the speed of movement of subscribers in the range from 0 to  $10^8$  m/s and with a significant level of interference. The technology of channel immunity control allows to increase the efficiency of the method of multidimensional multiparameter routing in communication systems with packet data transmission, the method of building virtual temporary networks, as well as expand the possibilities for the use of radio resources for the compatibility of tasks: communication, navigation and monitoring of the environment. Discussion: The novelty lies in the control of noise immunity by monitoring the signal-to-interference ratio at the output of the matched filter and the algorithm for assigning the signal shape and parameters.

**Keywords:** noise immunity; Doppler transformation; Signal ratio is interference.

## REFERENCES

1. Kharkevich A.A. Combating interference. Moscow, Nauka Publ., 1965. 275 p. (in Rus).
2. Kotelnikov V.A. Theory of Potential Interference Resistance. Gosenergoizdat, 1956. 151 p. (in Rus).
3. Nemirovsky M.S.. Noise immunity of radio communication. Leningrad, Energia Publ., 1966, 296p. (in Rus).
4. Noise immunity and efficiency of information transmission systems. A. G. Zyuko, A. I. Falko, I. P. Panfilov et al. Ed. by A. G. Zyuko. Moscow: Radio and Communication, 1985. 271 p. : ill.; 22 cm.; ISBN In Translation <https://search.rsl.ru/record/01001278275> (in Rus).
5. Kharkevich A.A. Izbrannye trudy [Selected works]. Vol.3 Information Theory. Image recognition.. Moscow, 1973. Nauka, 524 p. (in Rus).
6. Bernard. Sklyar. Digital communication. Theoretical foundations and practical application. Moscow: Williams, 2002. 1101 p. (In Rus).
7. Golyanitsky I.A. Mathematical models and methods in radio communication. Ed. by Yu.A. Gromakov. Moscow, Eco-Trend Publ., 2005. 440 p. (In Rus).
8. Infocommunication Networks: Encyclopedia. Volume 1: Info-Communication Networks: Classification, Structure, Architecture, Life Cycle, Technologies. S. P. Vorobyov, A. E. Davydov, V. V. Efimov, V. I. Kurnosov; Ed. by S. P. Vorobyov. Ed. 2nd, revised and supplemented. St. Petersburg: Science-Intensive Technologies, 2019. 739 p. (In Rus).
9. Hanno L., Bloch D., Ni S. HSPA and FDD vs. TDD Technology. Spatio-temporal filtering and adaptive modulation. Moscow, Technosphere Publ., 2012. 672 p. (In Rus).
10. Steputin A.N., Nikolaev A.D. Mobile communication on the way to 6G. Vologda; Infra-Engineering, 2018, T 1, 384 p. (In Rus).
11. Zaraysky V.A., Tyurin A.M. Theory of hydrolocation. Leningrad, VMA Publ., 1975. 605 p. (In Rus).
12. Vereshchagin A.V., Sotnikova N.V. Metody povysheniya jamustoystvo peredeniya informatsii v radiokanalakh mobilekh programnotekhnicheskikh kompleksov: uchebnoe posobie [Methods for improving the interference resistance of information transmission in radio channels of mobile software and technical complexes: a textbook]. A.V. Vereshchagin, N.V. Sotnikova; Balt. Gos. Techn. University. St. Petersburg, 2018. 158 p. (In Rus).
13. 6G Networks: The Journey from 5G to 6G through the Eyes of Developers. From connected people and things to connected intelligence. Ed. by Wen Tong, Peking Zhu. Moscow: DMK Press, 2022. 624 p. (In Rus).
14. Mochalov A.V., Pavlikov S.N., Ubankin E.I. New directions in the development of telecommunication systems. Vladivostok: VSUES, 2016. 106 p. (In Rus).
15. Rikhachek A.V. Signals admissible from the point of view of the Doppler effect. 1966, Vol. 54. №6. Pp. 38 – 46. (In Rus).
16. Saprykin V.A., Rokotov S. Theory of Hydroacoustics and Digital Signal Processing, Part 2, Leningrad Publishing House. VVMURE named after A.S. Popov, 1991. 416 p. (In Rus).
17. Saprykin V.A., Dokukin A.E., Kovtunenkov S.V. Proceedings of the Seventh All-Union Symposium. Representation methods and hardware analysis of random processes and fields. Leningrad: 1974. T.10. (In Rus).
18. Patent RF, No2713384, Method of information transmission using broadband signals BI No40 dated 05.02.20. Authors: Pavlikov S.N. et al.
19. Patent RF, No2734699, Method of information transmission using broadband signals, BI No30 of 22.10.20. Authors: Pavlikov S.N. et al. (In Rus).
20. Patent RF, No2816580. A method of transmitting information using broadband signals. Publ. 02.04.2024. (In Rus).