

**Д.И. Коньков, А.А. Шмидт, Д.Н. Поляков, В.Р. Бикбулатов**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СВЯЗИ  
В СИСТЕМАХ С ШИРОКОПОЛОСНЫМИ СИГНАЛАМИ И ППРЧ**

*Статья посвящена теоретическому исследованию вероятностных характеристик систем связи с широкополосными сигналами и псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ) в условиях сложной электромагнитной обстановки. Представлен аналитический аппарат для расчета вероятности связи с учетом комплексного влияния многолучевого распространения, частотно-селективных замираний и преднамеренных помех. Исследована зависимость вероятности связи от отношения сигнал/шум с применением интегральных выражений, учитывающих нормальное распределение мощностей на входе приемного устройства. Проведен математический анализ передаточной функции канала связи как комплексной характеристики, описывающей амплитудно-частотные и фазовые искажения при распространении сигнала. Разработаны теоретические модели процессов синхронизации, включающие этапы поиска сигнала, захвата и слежения, с применением функции Маркума для описания вероятности обнаружения сигнала на фоне гауссовского шума. Предложены способы оптимизации ключевых параметров системы ППРЧ, таких как период перестройки частоты, общее количество частотных каналов и ширина защитного частотного интервала. Описаны теоретические основы адаптивного управления, опирающиеся на метод максимального правдоподобия и рекурсивную фильтрацию для оценки параметров канала. Исследована энергетическая эффективность систем с ППРЧ с учетом потерь на перестройку частоты и необходимой корректировки отношения сигнал/шум. Предложен комплексный показатель качества системы связи, объединяющий вероятностные, энергетические и временные характеристики. Разработаны аналитические выражения для оценки интенсивности срыва синхронизации на основе статистического анализа экспериментальных данных и вычисления ковариационной матрицы шума измерений. Обоснована целесообразность применения эталонных сигналов для повышения достоверности измерений параметров канала связи при адаптивном управлении. Выведены соотношения для определения длительности окна синхронизации с учетом максимально допустимого времени вхождения в синхронизм и коэффициента запаса, учитывающего возможные нестабильности частоты опорных генераторов. Проанализировано влияние защитного частотного интервала на предотвращение межканальных помех и обеспечение электромагнитной совместимости соседних каналов. Представленные теоретические результаты создают научную основу для проектирования радиосистем повышенной помехозащищенности и могут быть использованы при разработке адаптивных алгоритмов управления системами ППРЧ в условиях динамически изменяющейся электромагнитной обстановки, обеспечивая баланс между надежностью передачи информации и эффективностью использования частотно-временных ресурсов системы связи.*

*Широкополосные сигналы; псевдослучайная перестройка рабочей частоты; ППРЧ; вероятность связи; помехозащищенность; сложная электромагнитная обстановка; многолучевое распространение; частотно-селективные замирания; синхронизация; функция Маркума; отношение сигнал/шум; передаточная функция канала; адаптивное управление; энергетическая эффективность; оптимизация параметров; межканальные помехи; электромагнитная совместимость; рекурсивная фильтрация; метод максимального правдоподобия.*

**D.I. Konkov, A.A. Shmidt, D.N. Polyakov, V.R. Bikbulatov**

**THEORETICAL STUDY OF ESTIMATING THE PROBABILITY  
OF A CONNECTION IN SYSTEMS WITH BROADBAND SIGNALS AND FHSS**

*The article is devoted to a theoretical study of the probabilistic characteristics of communication systems with broadband signals and pseudorandom tuning of the operating frequency in a complex electromagnetic environment. An analytical tool for calculating the communication probability is presented, taking into account the complex effects of multipath propagation, frequency-selective fading, and intentional interference. The dependence of the communication probability on the signal-to-noise ratio is investigated using integral expressions that take into account the normal power distribution at the input of the receiving device. A mathematical analysis of the transmission function of the communication channel as a complex characteristic describing the amplitude-frequency and phase distortions during signal propaga-*

tion is performed. Theoretical models of synchronization processes are developed, including the stages of signal search, capture, and tracking, using the Marcum function to describe the probability of signal detection against the background of Gaussian noise. Methods for optimizing the key parameters of the RFP system, such as the frequency tuning period, the total number of frequency channels, and the width of the protective frequency interval, are proposed. The theoretical foundations of adaptive control based on the maximum likelihood method and recursive filtering for estimating the parameters of the channel are described. The energy efficiency of systems with RFP is studied, taking into account the frequency tuning losses and the necessary adjustment of the signal-to-noise ratio. A comprehensive indicator of the quality of a communication system combining probabilistic, energy, and time characteristics of the system is proposed. Analytical expressions are developed for estimating the intensity of synchronization failure based on statistical analysis of experimental data and calculation of the covariance matrix of measurement noise. The expediency of using reference signals to increase the reliability of measurements of communication channel parameters in adaptive control of the system is justified. Relations are derived for determining the duration of the synchronization window, taking into account the maximum allowable time of entering synchronism and the margin factor, which takes into account possible frequency instabilities of the reference generators. The influence of the protective frequency interval on preventing inter-channel interference and ensuring electromagnetic compatibility of neighboring channels is analyzed. The presented theoretical results provide a scientific basis for the design of radio systems with increased noise immunity and can be used in the development of adaptive algorithms for controlling RF control systems in a dynamically changing electromagnetic environment, ensuring a balance between the reliability of information transmission and the efficiency of using frequency-time resources of the communication system.

*Broadband signals; frequency hopping spread spectrum; FHSS; communication probability; interference immunity; complex electromagnetic environment; multipath propagation; frequency-selective fading; synchronization; Marcum function; signal-to-noise ratio; channel transfer function; adaptive control; energy efficiency; parameter optimization; inter-channel interference; electromagnetic compatibility; recursive filtering; maximum likelihood method.*

**Введение.** В современных системах радиосвязи особую актуальность приобретает задача обеспечения надежной связи в условиях сложной электромагнитной обстановки. Наличие естественных и преднамеренных помех, многолучевое распространение сигналов, а также требования по электромагнитной совместимости создают существенные трудности при организации радиосвязи [1]. В данном контексте значительный интерес представляет теоретический анализ вероятности связи для систем, использующих широкополосные сигналы и сигналы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

Современные исследования в области радиосвязи показывают [2–5], что применение широкополосных сигналов и систем с ППРЧ позволяет существенно повысить помехозащищенность каналов связи. При этом особый интерес представляет случай, когда распределение мощностей полезного сигнала и помех на входе приемного устройства подчиняется нормальному закону распределения, что часто встречается на практике.

**Теоретические основы анализа широкополосных сигналов.** Фундаментальным параметром систем широкополосной связи является ширина полосы частот  $\Delta F$  [6], представляющая собой разность между верхней и нижней границами рабочего диапазона частот. В условиях нормального распределения мощностей сигнала и помех вероятность связи для широкополосного сигнала может быть представлена в виде интегрального выражения:

$$P_{св} = \frac{1}{\Delta F} \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} \Phi \left( \frac{\bar{z}(f) - z_{\text{тп}}}{z} \right) H(f) df, \quad (1)$$

В данном выражении функция  $\Phi(x)$  представляет собой интеграл вероятности, а  $\bar{z}(f)$  характеризует отношение медианных значений мощности сигнала к мощности помехи на входе приемного устройства. Параметр  $z_{\text{тп}}$  определяет требуемое превышение сигнала над помехой, необходимое для обеспечения заданного качества связи. Среднеквадратическое отклонение  $z$  отражает степень флуктуаций отношения сигнал/помеха в канале связи.

Передаточная функция канала  $H(f)$  представляет собой комплексную характеристику, учитывающую амплитудно-частотные и фазо-частотные искажения сигнала при его распространении:

$$H(f) = A(f)e^{j\phi(f)}, \quad (2)$$

где  $A(f)$  характеризует амплитудно-частотную характеристику канала, а  $\phi(f)$  отражает фазовые искажения, вносимые каналом связи.

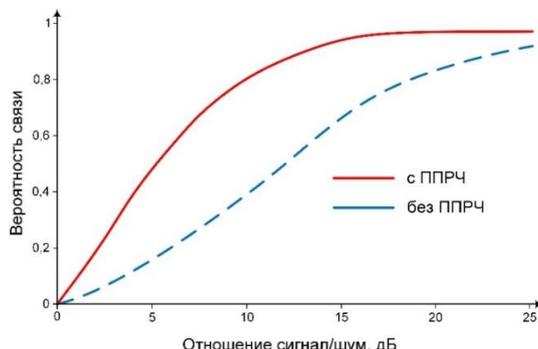


Рис. 1. График зависимости вероятности связи от отношения сигнал/шум

На рис. 1 представлены экспериментальные характеристики помехоустойчивости системы связи с ППРЧ и без нее. Как видно из графика, применение ППРЧ позволяет существенно снизить вероятность ошибки при одинаковом отношении сигнал/шум.

**Особенности систем с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.** Системы с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты представляют собой сложные радиотехнические комплексы, характеризующиеся специфическими вероятностными характеристиками [7]. В основе их функционирования лежит принцип быстрого изменения несущей частоты передаваемого сигнала по псевдослучайному закону, что обеспечивает высокую помехозащищенность канала связи.

Математическое описание таких систем требует учета множества параметров, ключевым из которых является общее количество частотных каналов  $M$ , определяемое отношением всей выделенной полосы частот к ширине одного частотного канала:

$$M = \frac{\Delta F}{\Delta f_k}. \quad (3)$$

Обобщенная структурная схема системы ППРЧ представлена на рис. 2, где отражены основные функциональные блоки передающей части и их взаимосвязи.

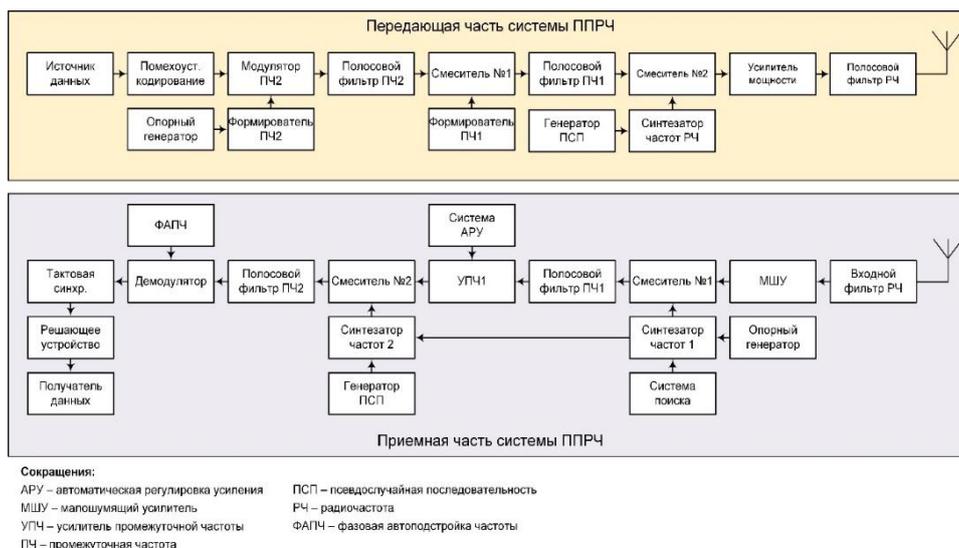


Рис. 2. Обобщенная структурная схема системы ППРЧ

При этом ширина частотного канала  $\Delta f_k$  представляет собой сумму ширины спектра информационного сигнала  $B$  и защитного частотного интервала  $\Delta f_{зи}$ :

$$\Delta f_k = B + \Delta f_{зи}. \quad (4)$$

Защитный частотный интервал необходим для предотвращения межканальных помех и обеспечения электромагнитной совместимости соседних каналов [8]. Его величина выбирается исходя из спектральных характеристик передатчика и требований к избирательности приемного устройства.

**Теоретические аспекты синхронизации в системах ППРЧ.** Одним из ключевых факторов, определяющих эффективность систем с ППРЧ, является качество синхронизации приемной и передающей сторон. Вероятность успешной синхронизации может быть описана следующим математическим выражением [9]:

$$P_{\text{синхр}} = (1 - P_{\text{ош}})^L \cdot \frac{T_{\text{ос}}}{T_{\text{пч}}}. \quad (5)$$

Данное выражение учитывает вероятность ошибки на бит в синхропоследовательности  $P_{\text{ош}}$ , которая зависит от отношения сигнал/шум в канале связи и выбранного метода модуляции. Длина синхропоследовательности  $L$  выбирается как компромисс между надежностью синхронизации и временными затратами на её установление [10, 11]. Отношение длительности окна синхронизации  $T_{\text{ос}}$  к периоду перестройки частоты  $T_{\text{пч}}$  характеризует временную эффективность процесса синхронизации.

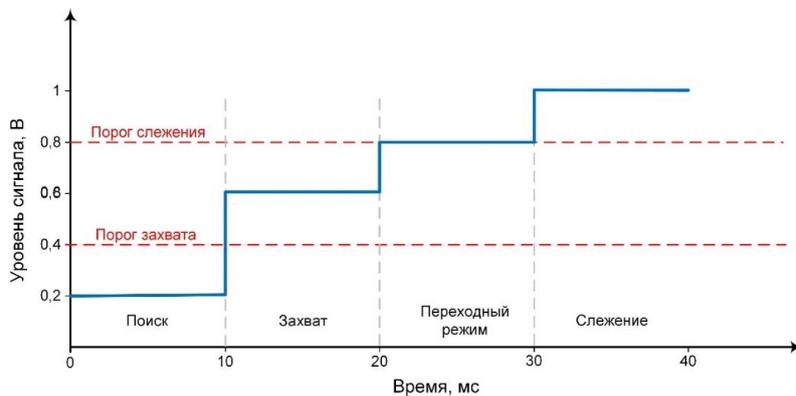


Рис. 3. Временная диаграмма процесса синхронизации

На рис. 3 представлена временная диаграмма процесса синхронизации системы ППРЧ, отражающая три основных этапа установления и поддержания синхронизации. На интервале времени  $(t_1 - t_2)$  осуществляется поиск сигнала, длительность которого определяется выражением:

$$T_{\text{поиск}} = M \cdot T_x \cdot P_{\text{ош}}, \quad (6)$$

где  $M$  — число частотных каналов;  $T_x$  — длительность шага поиска;  $P_{\text{ош}}$  — вероятность ошибки обнаружения сигнала. Вероятность ошибки обнаружения сигнала определяется через отношение сигнал/шум на входе приемного устройства и порог обнаружения с использованием функции Маркума:

$$P_{\text{ош}} = Q(\sqrt{2}^2, \sqrt{2}), \quad (7)$$

где  $Q(a, b)$  — функция Маркума;  $h^2$  — отношение сигнал/шум по мощности; — пороговый уровень обнаружения. Функция Маркума представляет собой обобщение функции вероятности для комплексной огибающей сигнала и определяется интегральным выражением:

$$Q(a, b) = \int_b^\infty x \exp\left(-\frac{x^2 + a^2}{2}\right) I_0(ax) dx, \quad (8)$$

где  $I_0(x)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка. Использование функции Маркума обусловлено тем, что при обнаружении сигнала на фоне гауссовского шума огибающая сигнала на выходе оптимального приемника имеет распределение Райса.

В интервале  $(t_2-t_3)$  происходит захват синхронизации, время которого зависит от длины синхропоследовательности  $L$  и периода перестройки частоты  $T_{пч}$ :

$$T_{захв} = L \cdot T_{пч}. \quad (9)$$

На заключительном этапе  $(t_3-t_4)$  система переходит в режим слежения, минимальная длительность которого определяется выражением:

$$T_{слеж} \geq T_{пч} \cdot (1 + k_{зап}), \quad (10)$$

где  $K_{зап}$  – коэффициент запаса, обеспечивающий устойчивость синхронизации в условиях помех.

Как видно из временной диаграммы, наиболее длительным является этап поиска сигнала, что обусловлено необходимостью просмотра всей полосы частот системы. Этап захвата характеризуется снижением уровня сигнала рассогласования по мере установления синхронизации. В режиме слежения наблюдаются минимальные флуктуации сигнала рассогласования, определяемые точностью работы системы фазовой автоподстройки частоты.

**Комплексная оценка вероятности связи в системах ППРЧ.** При анализе систем с ППРЧ итоговая вероятность связи [12, 13] представляет собой произведение трех вероятностных характеристик:

$$P_{св.ППРЧ} = P_{св} \cdot P_{синхр} \cdot \frac{1}{M}. \quad (11)$$

В данном выражении множитель  $1/M$  отражает вероятность правильного выбора частотного канала в конкретный момент времени при условии равновероятного использования всех доступных каналов системы связи.

**Теоретические основы оптимизации параметров системы ППРЧ.** В процессе проектирования систем с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты существенное значение приобретает задача оптимизации параметров системы. Фундаментальным параметром, требующим особого внимания, является период перестройки частоты  $T_{пч}$ . Его выбор представляет собой сложную оптимизационную задачу, учитывающую противоречивые требования к системе связи [12].

Оптимальное значение периода перестройки может быть определено из условия максимизации вероятности связи:

$$\frac{\partial P_{св.ППРЧ}}{\partial T_{пч}} = 0. \quad (12)$$

При этом необходимо учитывать, что вероятность синхронизации с учетом возможного срыва описывается более сложным выражением:

$$P_{синхр} = (1 - P_{ош})^L \cdot \frac{T_{ос}}{T_{пч}} \cdot e^{-\lambda T_{пч}}, \quad (13)$$

где  $\lambda$  представляет собой параметр, характеризующий интенсивность срыва синхронизации в системе связи.

Интенсивность срыва синхронизации определяется путем статистического анализа экспериментальных данных в реальных условиях функционирования системы связи. При использовании метода максимального правдоподобия оценка интенсивности срыва может быть найдена как:

$$= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta t_i}, \quad (14)$$

где  $\Delta t_i$  – интервалы времени между последовательными срывами синхронизации;  $N$  – общее число зарегистрированных срывов. Достоверность оценки характеризуется дисперсией:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{\Delta t_i} - \bar{f} \right)^2. \quad (15)$$

**Исследование влияния характеристик канала связи.** Передаточная функция канала в реальных условиях формируется под влиянием множества [13] факторов и может быть представлена как произведение частных передаточных функций:

$$H(f) = H_{\text{мн}}(f) \cdot H_{\text{зам}}(f) \cdot H_{\text{доп}}(f). \quad (16)$$

Данное выражение учитывает влияние многолучевого распространения  $H_{\text{мн}}(f)$ , замираний сигнала  $H_{\text{зам}}(f)$  и дополнительных искажений  $H_{\text{доп}}(f)$ , вносимых аппаратурой связи.

Составные элементы передаточной функции канала определяются следующим образом. Функция многолучевого распространения может быть представлена в виде:

$$H_{\text{мн}}(f) = \sum_{i=1}^L a_i e^{-j2\pi f \tau_i}. \quad (17)$$

где  $a_i$  и  $\tau_i$  – амплитуды и задержки отдельных лучей;  $L$  – общее число учитываемых лучей.

Функция замираний при рэлеевской модели описывается выражением:

$$H_{\text{зам}}(f) = \sqrt{\frac{2}{\sigma^2}} \exp\left(-\frac{|H(f)|^2}{2\sigma^2}\right), \quad (18)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия замираний.

Особую значимость для систем с ППРЧ приобретает анализ вероятности связи в канале с частотно-селективными замираниями:

$$P_{\text{св}} = \frac{1}{\Delta F} \int_{f_{\text{min}}}^{f_{\text{max}}} \Phi\left(\frac{z(f) - z_{\text{тр}}}{z}\right) \cdot |H(f)|^2 \cdot e^{-|H(f)|^2} df, \quad (19)$$

где  $\beta$  является параметром, характеризующим интенсивность замираний в канале связи.

Интенсивность замираний в канале связи связана со статистическими характеристиками огибающей принимаемого сигнала. Для релеевского закона распределения:

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \frac{\sigma_R}{\bar{R}}, \quad (20)$$

где  $\sigma_R$  – среднеквадратическое отклонение огибающей;  $\bar{R}$  – среднее значение огибающей. При этом параметр  $\beta$  может быть оценен через измеряемую глубину замираний:

$$\beta = \sqrt{-\ln(1 - P_3) \cdot \frac{\pi}{4}}, \quad (21)$$

где  $P_3$  – вероятность превышения заданного уровня замираний.

**Энергетическая эффективность систем связи с ППРЧ.** Существенным аспектом анализа систем с ППРЧ является оценка их энергетической эффективности [14]. Средние энергетические потери на перестройку частоты могут быть определены следующим выражением:

$$L_3 = 10 \lg \left( 1 + \frac{T_n}{T_{\text{пч}}} \right), \quad (22)$$

где  $T_n$  представляет собой время перестройки синтезатора частоты.

При этом требуемое отношение сигнал/шум должно быть скорректировано с учетом этих потерь:

$$z_{\text{тр.эфф}} = z_{\text{тр}} + L_3. \quad (23)$$

**Практические аспекты синхронизации систем ППРЧ и их теоретическое обоснование.** Реализация систем синхронизации в ППРЧ представляет собой комплексную техническую задачу, требующую детального теоретического анализа [15]. Одним из ключевых параметров, определяющих эффективность синхронизации, является длина синхропоследовательности  $L$ , которая может быть определена через требуемую вероятность правильной синхронизации:

$$L = \frac{\log(1 - P_{\text{тр}})}{\log(P_{\text{ош}})}, \quad (24)$$

где  $P_{\text{тр}}$  представляет собой требуемую вероятность правильной синхронизации, а  $P_{\text{ош}}$  характеризует вероятность ошибки на бит в синхропоследовательности.

Существенное значение имеет также длительность окна синхронизации, определяемая с учетом максимально допустимого времени вхождения в синхронизм:

$$T_{\text{ос}} = \frac{T_{\text{макс}}}{K_{\text{зап}}}. \quad (25)$$

В данном выражении  $K_{\text{зап}}$  представляет собой коэффициент запаса, учитывающий возможные нестабильности частоты опорных генераторов системы связи.

**Комплексный анализ характеристик системы.** Эффективность системы с ППРЧ может быть охарактеризована интегральным показателем качества:

$$Q = P_{\text{св. ППРЧ}} \cdot \frac{1}{L_s} \cdot \frac{T_{\text{пч}}}{T_n}. \quad (26)$$

Данный показатель учитывает вероятность связи, энергетические потери и временную эффективность системы. При этом оптимизация параметров системы должна проводиться с учетом максимизации данного показателя качества [16].

**Теоретические основы адаптивного управления.** В условиях изменяющейся помеховой обстановки особую значимость приобретает адаптивное управление параметрами системы [17, 18]. Вероятность связи при адаптивном управлении может быть представлена как:

$$P_{\text{св. адапт}} = \int_0^{\infty} |H(f)|^2 P_{\text{ош. адапт}} df, \quad (27)$$

где  $P_{\text{ош. адапт}}$  характеризует вероятность ошибки адаптивного управления, определяемую точностью оценки параметров канала связи:

$$P_{\text{ош. адапт}} = \frac{1}{\Delta\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(\hat{h} - h)^2}{2 \frac{\Delta^2}{\Delta}}\right) d\hat{h}, \quad (28)$$

где  $h$  и  $\hat{h}$  представляют собой истинное и оценочное значения параметра канала соответственно, а  $\Delta$  характеризует дисперсию ошибки оценивания.

Истинное значение параметра канала  $h$  определяется в процессе калибровочных измерений:

$$h = \frac{1}{T} \int_0^T |H(f, t)|^2 dt, \quad (29)$$

где  $T$  – интервал измерения, выбираемый исходя из требуемой точности оценки параметра канала.

Для повышения достоверности измерений используются эталонные сигналы:

$$\hat{h}_{\text{эт}} = \frac{S_{\text{вых}}(f)}{S_{\text{эт}}(f)}, \quad (30)$$

где  $S_{\text{вых}}(f)$  и  $S_{\text{эт}}(f)$  – спектральные характеристики выходного и эталонного сигналов соответственно.

Оценочное значение параметра канала  $\hat{h}$  формируется в процессе работы системы на основе метода максимального правдоподобия:

$$\hat{h} = \arg \max \left\{ \frac{1}{n\sqrt{2}} \left( -\frac{|y(t) - \hat{h} \cdot s(t)|^2}{2 \frac{\Delta^2}{\Delta}} \right) \right\}, \quad (31)$$

где  $y(t)$  – принимаемый сигнал;  $s(t)$  – передаваемый сигнал;  $\sigma_n^2$  – дисперсия шума в канале связи [19].

Уточнение оценки производится с помощью рекурсивного фильтра:

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_k + K_k(y_k - H_k \hat{x}_k) \quad (32)$$

с коэффициентом усиления:

$$K_k = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (33)$$

где  $R_k$  – ковариационная матрица шума измерений.

Дисперсия ошибки оценивания определяется соотношением:

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2, \quad (34)$$

где  $N$  – количество измерений, используемых для статистической оценки точности.

Данный математический аппарат позволяет обеспечить эффективное адаптивное управление параметрами системы ППРЧ с учетом изменяющихся условий функционирования канала связи.

**Заключение.** Теоретическое исследование вероятности связи в системах с ППРЧ позволяет сформулировать основные принципы построения таких систем и определить пути их оптимизации. Полученные математические выражения создают основу для проектирования высокоэффективных систем связи [20], способных функционировать в сложной помеховой обстановке.

Представленный теоретический аппарат может быть использован при разработке новых методов адаптивного управления параметрами системы ППРЧ и алгоритмов повышения энергетической эффективности передачи информации.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сикорский А.Б. Методы повышения помехоустойчивости систем подвижной сотовой связи в условиях преднамеренных помех // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. – 2001. – № 3.
2. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты: монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.
3. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / под ред. В.И. Борисова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
4. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е., Мухин Н.П., Нахмансон Г.С. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью / под ред. В.И. Борисова. – М.: Радио и связь, 2003. – 640 с.
5. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R.A., Levitt B.K. Spread spectrum communication. – Vol. 3. – Rockville, MD: Computer Science Press, 1985.
6. Агеев А.В. Исследование и разработка алгоритмов приема сигналов ППРЧ в каналах с памятью: дисс. ... канд. техн. наук по спец. 05.12.13. – Самара: ПовГУТИ, 2009. – 122 с.
7. Чуднов А.М. Теоретико-игровые задачи синтеза алгоритмов формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. – 1991. – Т. 27, № 3. – С. 57-65.
8. Борисов В.И., Зинчук В.М., Мухин Н.П. Помехоустойчивость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов // Теория и техника радиосвязи. – 1993. – Вып. 1.
9. Чуднов А.М. Помехоустойчивость линий и сетей связи в условиях оптимизированных помех. – Л.: ВАС, 1986. – 84 с.
10. Torrieri D.J. The Information-Bit Error for Block Codes // IEEE Trans. – 1984. – Vol. COM-32, No. 4.
11. Torrieri D.J. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems. – Publisher Springer US, 2005. – 444 p. – ISBN 978-0-387-22783-2.
12. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи: основы теории и принципы реализации. – М.: Наука, 2009. – 358 с. – ISBN 978-5-02036943-6 (в пер.).
13. Богданов А.Е. Разработка системы передачи информации для локальных сетей связи, работающих в сложной помеховой обстановке: дисс. ... канд. техн. наук по спец. 05.12.13. – Владимир: ОАО «Владимирское КБ «Радиосвязи», 2005. – 144 с.
14. Pickholtz R., Schilling D. and Milstein L. Theory of Spread-Spectrum Communications - A Tutorial // IEEE Transactions on Communications. – 1982. – Vol. 30, No. 5. – P. 855-884.

15. Mark K. Cornwall, Harry Price Haas. Frequency hopping spread spectrum system with high sensitivity tracking and synchronization for frequency unstable signals. Patent US6934316B2, 23.08.2005.
16. Simon M.K. Spread Spectrum Communication. Electronic Edition. Inc., 2002. – 1115 p.
17. Lee J., French R., Miller L. Probability of Error Analyses of a BFSK Frequency-Hopping System with Diversity Under Partial-Band Jamming Interference – Part I: Performance of Square-Law Linear Combining Soft Decision Receiver // IEEE Transactions on Communications. – 1984. – Vol. 32, No. 6. – P. 645-653.
18. Liu Y., Li X., Xu X. A Broadband Transmission Technology Based on FFH-OFDM // 2018 8th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS). – 2018.
19. Чуднов А.М. О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов // Проблемы передачи информации. – 1986. – Т. 22, № 4. – С. 49-54.
20. Torrieri D.J. Fundamental limitations on repeater jamming of frequency-hopping communications // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1989. – Vol. 7, No. 24. – P. 569-575.

## REFERENCES

1. Sikorskij A.B. Metody povysheniya pomekhoustoychivosti sistem podvizhnoy sotovoy svyazi v usloviyakh prednamerennykh pomekh [Methods for increasing the noise immunity of mobile cellular communication systems under deliberate interference], *Problemy informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy* [Problems of Information Security. Computer Systems], 2001, No. 3.
2. Makarenko S.I., Ivanov M.S., Popov S.A. Pomekhozashchishchennost' sistem svyazi s psevdosluchaynoy perestroykoy rabochey chastoty: monografiya [Noise immunity of communication systems with pseudo-random frequency hopping: monograph]. Saint Petersburg: Svoe izdatel'stvo, 2013, 166 p.
3. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E. Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchaynoy perestroyki rabochey chastoty [Noise immunity of radio communication systems with signal spectrum expansion by the method of pseudo-random frequency tuning], ed. by V.I. Borisova. 2nd ed. Moscow: RadioSoft, 2008, 512 p.
4. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Limarev A.E., Mukhin N.P., Nakhmanson G.S. Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov modulyatsiy nesushchey psevdosluchaynoy posledovatel'nost'yu [Noise immunity of radio communication systems with signal spectrum expansion by carrier modulation with a pseudo-random sequence], ed. by V.I. Borisova. Moscow: Radio i svyaz', 2003, 640 p.
5. Simon M.K., Omura J.K., Scholtz R.A., Levitt B.K. Spread spectrum communication, Vol. 3. Rockville, MD: Computer Science Press, 1985.
6. Ageev A.V. Issledovanie i razrabotka algoritmov priema signalov PPRCh v kanalakh s pamyat'yu: diss. ... kand. tekhn. nauk po spets. 05.12.13 [Research and development of algorithms for receiving frequency hopping signals in channels with memory: cand. of eng. sc. diss. in specialty 05.12.13]. Samara: PovGUTI, 2009, 122 p.
7. Chudnov A.M. Teoretiko-igrovye zadachi sinteza algoritmov formirovaniya i priema signalov [Game-theoretic problems of synthesizing algorithms for generating and receiving signals], *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission], 1991, Vol. 27, No. 3, pp. 57-65.
8. Borisov V.I., Zinchuk V.M., Mukhin N.P. Pomekhoustoychivost' sistem radiosvyazi s rasshireniem spektra signalov [Noise immunity of radio communication systems with signal spectrum expansion], *Teoriya i tekhnika radiosvyazi* [Theory and Technology of Radio Communication], 1993, Issue 1.
9. Chudnov A.M. Pomekhoustoychivost' liniy i setey svyazi v usloviyakh optimizirovannykh pomekh [Noise immunity of communication lines and networks under optimized noise conditions]. L.: VAS, 1986, 84 p.
10. Torrieri D.J. The Information-Bit Error for Block Codes, *IEEE Trans.*, 1984, Vol. COM-32, No. 4.
11. Torrieri D.J. Principles of Spread-Spectrum Communication Systems. Publisher Springer US, 2005, 444 p. ISBN 978-0-387-22783-2.
12. Borisov V.I. Pomekhozashchishchennost' sistem radiosvyazi: osnovy teorii i printsipy realizatsii [Interference immunity of radio communication systems: fundamentals of theory and principles of implementation]. Moscow: Nauka, 2009, 358 p. ISBN 978-5-02036943-6 (v per.).
13. Bogdanov A.E. Razrabotka sistemy peredachi informatsii dlya lokal'nykh setey svyazi, rabotayushchikh v slozhnoy pomekhovoy obstanovke: diss. ... kand. tekhn. nauk po spets. 05.12.13 [Development of an information transmission system for local communication networks operating in a complex interference environment: cand. of eng. sc. diss. in specialty 05.12.13]. Vladimir: OAO «Vladimirskoe KB «Radiosvyazi», 2005, 144 p.

14. *Pickholtz R., Schilling D. and Milstein L.* Theory of Spread-Spectrum Communications - A Tutorial, *IEEE Transactions on Communications*, 1982, Vol. 30, No. 5, pp. 855-884.
15. *Mark K. Cornwall, Harry Price Haas.* Frequency hopping spread spectrum system with high sensitivity tracking and synchronization for frequency unstable signals. Patent US6934316B2, 23.08.2005.
16. *Simon M.K.* Spread Spectrum Communication. Electronic Edition. Inc., 2002, 1115 p.
17. *Lee J., French R., Miller L.* Probability of Error Analyses of a BFSK Frequency-Hopping System with Diversity Under Partial-Band Jamming Interference – Part I: Performance of Square-Law Linear Combining Soft Decision Receiver, *IEEE Transactions on Communications*, 1984, Vol. 32, No. 6, pp. 645-653.
18. *Liu Y., Li X., Xu X.* A Broadband Transmission Technology Based on FFH-OFDM, *2018 8th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences (LISS)*, 2018.
19. *Chudnov A.M.* О минимаксных алгоритмах формирования и приема сигналов [On minimax algorithms for signal generation and reception], *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission], 1986, Vol. 22, No. 4, pp. 49-54.
20. *Torrieri D.J.* Fundamental limitations on repeater jamming of frequency-hopping communications, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1989, Vol. 7, No. 24, pp. 569-575.

**Коньков Денис Иванович** – Научно-исследовательский центр Военной академии связи; e-mail: den/konkov/94@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79537321643; адъюнкт.

**Шмидт Артур Андреевич** – Научно-исследовательский центр Военной академии связи; e-mail: shmidt.artur2011@yandex.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79500479274; адъюнкт.

**Поляков Дмитрий Николаевич** – Научно-исследовательский центр Военной академии связи; e-mail: bryanik51@mail.ru; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: +79113045069; адъюнкт.

**Бикбулатов Владислав Родионович** – Научно-исследовательский центр Военной академии связи; e-mail: vlad.bik@icloud.com; г. Санкт-Петербург; тел.: +79953062642; адъюнкт.

**Konkov Denis Ivanovich** – Research Center of the Military Academy of Communications; e-mail: den/konkov/94@mail.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79537321643; adjunct.

**Schmidt Artur Andreyevich** – Research Center of the Military Academy of Communications; e-mail: shmidt.artur2011@yandex.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79500479274; adjunct.

**Polyakov Dmitry Nikolaevich** – Research Center of the Military Academy of Communications; e-mail: bryanik51@mail.ru; St. Petersburg, Russia; phone: +79113045069; adjunct.

**Bikbulatov Vladislav Rodionovich** – Research Center of the Military Academy of Communications; e-mail: vlad.bik@icloud.com; St. Petersburg, Russia; phone: +79953062642; adjunct.