

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАКЕТНОЙ ПЕРЕДАЧИ РЕЧИ И ДАННЫХ В КАНАЛАХ КВ-РАДИОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ СИГНАЛЬНО-ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ**

*Маркелов Николай Николаевич,  
Академия ФСО России,  
г. Орёл*

**ANALYTICAL MODEL OF PACKET TRANSMISSION OF SPEECH AND DATA IN HF RADIO CHANNELS IN A COMPLEX SIGNAL-INTERFERENCE ENVIRONMENT**

*Markelov Nikolai Nikolaevich  
The Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation,  
Orel*

DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2021.1.67.422

**АННОТАЦИЯ**

Автором проведено аналитическое моделирование процессов формирования и обработки сигналов в КВ канале при пакетной передаче речи и данных в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки. Совокупность полученных результатов может являться основой при разработке сложных математических моделей КВ каналов.

**ABSTRACT**

The author has carried out an analytical simulation of the process of signal formation and processing in the HF channel during packet transmission of speech and data in a complex signal-interference environment. The totality of the result obtained can be the basis for the development of complex mathematical models of HF channels.

**Ключевые слова:** КВ-канал; ППРЧ; сложная сигнально-помеховая обстановка; пакетная передача речи и данных.

**Keywords:** HF channel, FHSS, complex signal-interference environment, packet transmission of speech and data.

Стремительно развивающиеся технологии в области КВ-радиосвязи позволяют в общем случае реализовать современные методы передачи речи и данных, однако, в современной литературе отсутствует обобщенное аналитическое описание всех процессов формирования и обработки сигналов [1-2].

Существующие математические модели КВ канала описывают преобразования сигнала в конкретных структурных элементах канала.

Отсутствует обобщенная аналитическая модель КВ канала для пакетной передачи речи и данных в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, под которой понимаются замирания сигнала при ионосферном распространении, вызванные многолучевым распространением радиосигналов, большое количество работающих в данном диапазоне радиостанций различной мощности, в том числе и станции РЭБ противника.

Составной КВ канал с различными структурами и параметрами относится к классу сложных управляемых систем, определяемых совокупностью ее элементов – аппаратно-программных средств и характером их взаимодействия (рис. 1) [2].

Применим подход, заключающийся в поэтапной формализации преобразований сигнала в каждом структурном элементе КВ канала,

которые представляются как объекты управления (рис. 2). Обозначим  $X = \{x_i, i = \overline{1, I}\}$  – множество допустимых воздействий на структурный элемент КВ канала (сигнал на входе структурного элемента);  $U = \{u_j, j = \overline{1, J}\}$  – переменные управления, характеризующие изменяемые параметры структурного элемента (например, относительная скорость помехоустойчивого кодирования  $R$ , количество частот, используемых для реализации режима ППРЧ  $F_N$ , и т.д.);  $\Lambda = \{\lambda_m, m = \overline{1, M}\}$  – переменные, характеризующие значения параметров внешних дестабилизирующих воздействий на процессы формирования и обработки сигналов в структурном элементе КВ канала (состояние среды распространения, помехи);  $Y = \{y_\eta, \eta = \overline{1, H}\}$  – множество возможных реакций структурного элемента КВ канала, обусловленные допустимыми воздействиями на структурный элемент  $X$ , изменяемыми параметрами структурного элемента  $U$  и воздействием дестабилизирующих факторов  $\Lambda$ ;  $Z = \{z_l, l = \overline{1, L}\}$  – переменные, характеризующие влияние структурного элемента КВ канала на сквозную задержку  $TD$ , потери пакетов  $PL$  и энергетическую эффективность  $\beta$ .

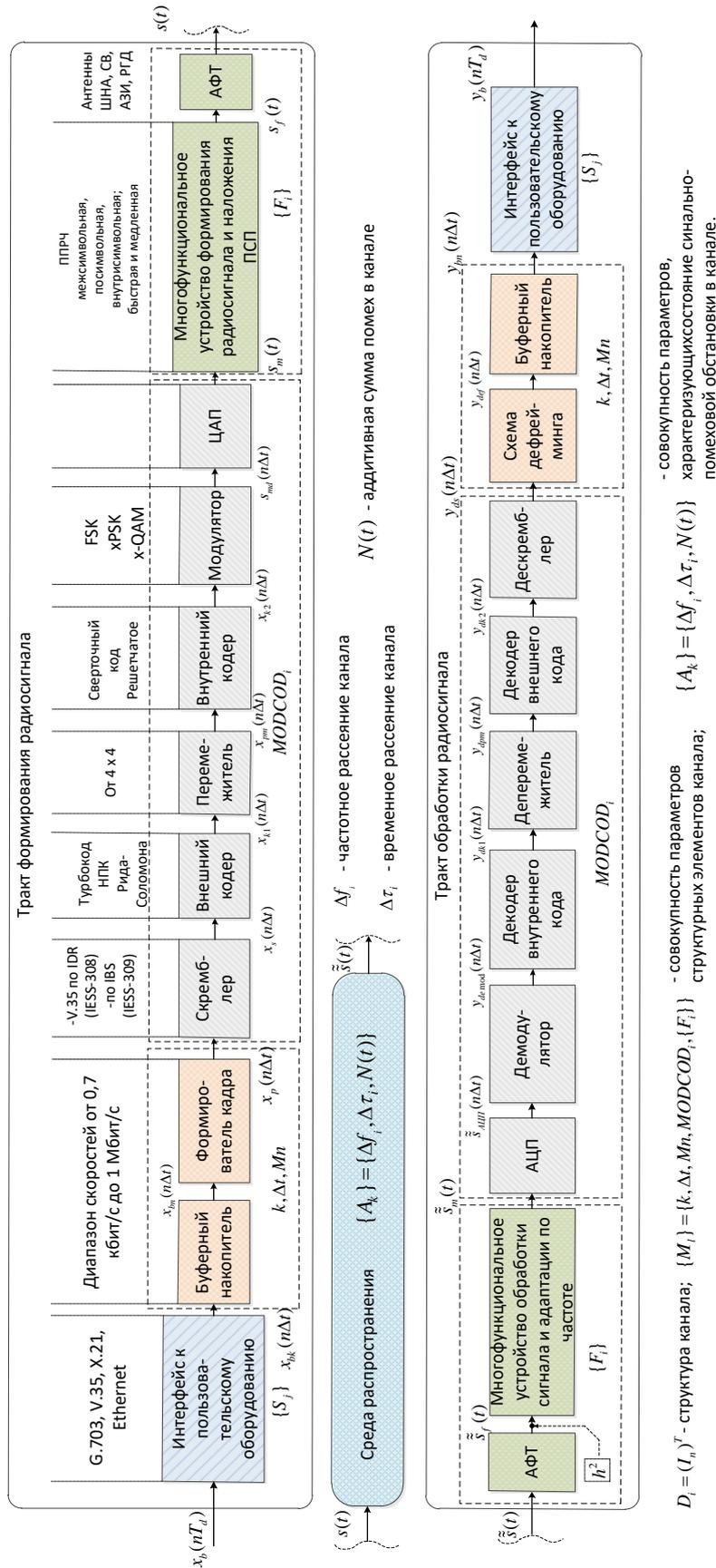


Рисунок 1. Пример структурной схемы составного КВ канала

$D_i = (L_n)^T$  - структура канала;  $\{M_i\} = \{k, \Delta t, M_n, MODCOD_i, \{F_i\}\}$  - совокупность параметров структурных элементов канала;  $\{A_k\} = \{\Delta f_i, \Delta \tau_i, N(t)\}$  - совокупность параметров, характеризующих состояние сигнально-помеховой обстановки в канале.



Рисунок 2. Структурный элемент KB канала как объект управления

В рамках исследования KB канал рассматривается от входа интерфейса к пользовательскому оборудованию в тракте передачи до соответствующего выхода аналогичного блока в тракте приема (рис. 1) [3].

Все преобразования сигнала при пакетной передаче речи и данных в интерфейсе к пользовательскому оборудованию, в качестве которого в KB средствах применяется протокол Ethernet, и управляемые параметры  $U_{Eth}$  данного

структурного элемента определены в стандарте IEEE 802.3.

Обозначим преобразование входного и выходного сигнала в данном структурном элементе как извлечение и включение в кадр Ethernet полезной нагрузки  $x_b(n\Delta t), (y_b(n\Delta t))$ , ( $\Delta t$  – длительность одного импульса,  $n = \overline{1, N}$ ) по правилу оператора  $G_{Eth_{in}}, G_{Eth_{out}}$ :

$$x_b(n\Delta t) = G_{Eth_{in}}(x_b(nT_d)), y_b(nT_d) = G_{Eth_{out}}(y_b(n\Delta t)). \quad (1)$$

На входе/выходе данного структурного элемента сигнал  $x_b(n\Delta t)$  кодируется с помощью манчестерского кода, варианты которого приведены в стандартах IEEE 802.3, 802.4, 802.5.

После преобразования в интерфейсе к пользовательскому оборудованию сигнал поступает в буферный накопитель и формирователь кадра, в котором добавляется служебная информация к сигналу полезной нагрузки. Добавление/исключение служебной информации  $x_{ser}(n\Delta t), (y_{ser}(n\Delta t))$  в формирователе кадров к сигналу с полезной нагрузкой  $x_{bn}(n\Delta t)$  и в схеме дефрейминга из сигнала с полезной нагрузкой  $y_{as}(n\Delta t)$  зададим с помощью выражения:

$$\begin{aligned} x_p(n\Delta t) &= x_{bn}(n\Delta t) + x_{ser}(n\Delta t - k\Delta t_0), \\ y_{def}(n\Delta t) &= y_{as}(n\Delta t) - y_{ser}(n\Delta t + k\Delta t_0). \end{aligned} \quad (2)$$

Далее определим преобразования сигнала в модемной части тракта передачи/приема (рис. 1), включающую скремблер/дескремлер, помехоустойчивые кодеки (кодеры и декодеры), перемежитель/деперемежитель, модулятор/демодулятор.

При преобразовании сигнала в скремблере/дескремблере управляющим параметром является полином скремблера  $Z = R_{n1} \oplus R_{n2} \oplus \dots \oplus R_{nj}$  и начальное состояние скремблера  $S_0$ .

После скремблера цифровой поток подвергается помехоустойчивому кодированию различными кодами с применением или отсутствием перемежения. При совместном рассмотрении помехоустойчивых кодеров и декодеров изменение сигнала в структурных

элементах KB канала между ними вследствие внешних дестабилизирующих воздействий  $\Lambda$  задается вектором ошибок  $\bar{\epsilon}$ .

В структурном элементе помехоустойчивого кодирования параметрами являются скорость кодирования  $R = k/n$ , где  $k$  – количество информационных символов,  $n$  – общее число символов в закодированном сообщении, кодовое расстояние  $K$  и порождающие многочлены  $g_i, i \in \mathbb{N}$ , порождающая матрица  $G$  для кодов LDPC.

Преобразование сигнала с помощью помехоустойчивого кодирования определим с помощью следующего общего выражения:

$$x_{код}(n\Delta t) = G_{кодi}(x_s(n\Delta t)); n, i = \overline{1 \dots N}, \quad (3)$$

где  $G_{кодi}$  – оператор преобразования сигнала при определенном помехоустойчивом кодировании,  $i$  – условный номер помехоустойчивого кодера, аналогичным образом запишем выражение для преобразования сигнала при декодировании:

$$y_{декод}(n\Delta t) = G_{декодi}(x_{dmod}(n\Delta t)); n, i = \overline{1 \dots N}, \quad (4)$$

где  $G_{декодi}$  – оператор преобразования сигнала при определенном помехоустойчивом декодировании,  $i$  – условный номер помехоустойчивого декодера,  $x_{dmod}(n\Delta t)$  – сигнал с выхода демодулятора.

Применение в структуре KB канала перемежителей и деперемежителей совместно с помехоустойчивыми кодерами и декодерами позволяет получить соответствующий энергетический выигрыш от перемежения  $\Delta\beta_{перем}$ .

который зависит от следующих параметров: тип перемежителя,  $W$  – ширина перемежения;  $D$  – глубина перемежения.

Преобразование сигнала в перемежителе/деперемежителе определим с помощью выражения:

$$\begin{aligned} x_{pm}(n\Delta t) &= G_{\text{пер}i}(x_{\text{код}}(n\Delta t)); n, i = \overline{1 \dots N}, \\ y_{dpm}(n\Delta t) &= G_{\text{депер}i}(y_{\text{декод}}(n\Delta t)); n, i = \overline{1 \dots N}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $G_{\text{пер}i}, (G_{\text{депер}i})$  – оператор преобразования сигнала при определенном виде перемежения/деперемежения,  $i$  – условный номер перемежителя/деперемежителя.

Следующим структурным элементом после помехоустойчивого кодирования цифрового сигнала является блок цифровой модуляции с параметрами: вид модуляции ( $M$ -PSK,  $M$ -QAM, FSK, GMSK), позиционность модуляции  $M$ , начальная фаза  $\theta_0$ , сдвиг фазы  $\Delta\theta$ , задержка модуляции  $\Delta\tau_{\text{mod}}$ .

Аналитически ансамбль многопозиционных сигналов  $\{s_i(t)\}_{i \in \overline{0, M-1}}$  представим выражением:

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^n a_{ij} \varphi_j(t), \quad (6)$$

где  $\{\varphi_i(t)\}$  – система базисных ортонормированных функций,  $a_{ij} =$

$\int_0^T s_i(t) \varphi_j(t) dt$  – проекции вектора  $s_i$  на координатные оси  $\varphi_j$ .

Таким образом, сигнал с выхода модулятора возможно задать с помощью следующего выражения:

$$s_{md}(t) = G_{mdi}(x_{\text{код}}(n\Delta t)); n, i = \overline{1 \dots N}, \quad (7)$$

где  $G_{mdi}$  – оператор преобразования сигнала при определенном виде модуляции,  $i$  – условный номер вида модуляции.

Аналогичным образом зададим сигнал  $y_{dmd}(n\Delta t)$  с выхода демодулятора:

$$y_{dmd}(n\Delta t) = G_{dmdi}(s_{fhs}(t)); n, i = \overline{1 \dots N}, \quad (8)$$

где  $G_{dmdi}$  – оператор преобразования сигнала при определенном виде демодуляции,  $i$  – условный номер вида демодуляции,  $s_{fhs}(t)$  – сигнал с выхода блока обработки ППРЧ.

Многофункциональное устройство формирования радиосигнала и наложения ПСП представляет собой в большинстве случаев блок реализации псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ) [4].

Для описания режима ППРЧ смоделируем аналитически преобразования сигнала. Сигнал ППРЧ на выходе передатчика представим известным выражением [5]:

$$S_{\text{ппрч}}(t) = \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M S \cdot \text{rect}[t - (l-1)\tau_n - (m-1)\tau_n] \cdot \sin[(w(n_l) + \Delta w_q)t + \theta_0], \quad (9)$$

где  $S$  – амплитуда сигнала,  $l$  – номер текущего шага ППРЧ,  $M$  – количество информационных символов, передаваемых на очередном шаге программы ППРЧ,  $q$  – номер текущего информационного символа,  $\tau_n$  – длительность элементарного импульса,  $\theta_0$  – начальная фаза

сигнала,  $\Delta w_q$  – приращение частоты за счет модуляции  $q$ -м информационным символом,  $n_l$  – номера частот, определяющие значения номиналов частот сигнала на  $l$ -м шаге программы.

Функция прямоугольного импульса может принимать два различных значения:

$$\text{rect}[t - (l-1)\tau_n - (m-1)\tau_n] = \begin{cases} 1, & \text{при } (m-1)\tau_n \leq t^* \leq m \cdot \tau_n; \\ 0, & \text{при } t^* < (m-1) \cdot \tau_n, t^* > m \cdot \tau_n. \end{cases} \quad (10)$$

Для упрощения записи выражения примем следующие обозначения для функции прямоугольного импульса  $I_{\text{imp}}(t) = \text{rect}[t - (l-1)\tau_n - (m-1)\tau_n]$ , и несущей  $F_{\text{sig}} = \sin[(w(n_l) + \Delta w_q)t + \theta_0]$ .

Для записи аналитического выражения для сигнала ППРЧ на входе приемника для КВ канала учтем влияние среды распространения на радиосигнал с помощью известной модели Ваттерсона, так как большинство нестационарных по частоте и по времени каналов с ППРЧ в небольшой полосе частот (менее 12 кГц) и на достаточно коротком интервале времени (менее 10 минут) возможно описать стационарной моделью [6].

Коротковолновый канал в соответствии с моделью Ваттерсона моделируется линией задержки с отводами для каждой разделённой во времени моды. Задержанный сигнал модулирован по амплитуде и фазе случайной комплексной функцией времени [7], определяемой следующим образом:

$$G_j(t) = G_{ia}(t)e^{j2\pi\Delta f_{ia}t} + G_{ib}(t)e^{j2\pi\Delta f_{ib}t}. \quad (11)$$

Индексы  $a$  и  $b$  обозначают компоненты двух лучей магнитоионного расщепления для  $j$ -го элемента.  $G_{ia}(t)$  и  $G_{ib}(t)$  представляют два независимых комплексных гауссовых эргодических случайных процесса, каждый из которых имеет нулевое среднее и независимые

действительную и мнимые части с равными среднеквадратическими значениями, которые вызывают рэлеевские замирания. Экспоненты обеспечивают частотный сдвиг  $\Delta f_{ia}$  и  $\Delta f_{ib}$  для магнитных компонент в спектре. Каждый коэффициент передачи имеет спектр, который в общем случае является суммой двух магнитоионных компонент, каждая из которых является гауссовской функцией частоты:

$$f_i(\nu) = \frac{\exp\left(-\frac{(f-\Delta f_{ia})^2}{2\sigma_{ia}^2}\right)}{\tilde{A}_{ia}\sigma_{ia}\sqrt{2\pi}} + \frac{\exp\left(-\frac{(f-\Delta f_{ib})^2}{2\sigma_{ib}^2}\right)}{\tilde{A}_{ib}\sigma_{ib}\sqrt{2\pi}}, \quad (12)$$

где  $\tilde{A}_{ia}$  и  $\tilde{A}_{ib}$  – амплитудные компоненты затухания,  $\sigma_{ia}^2$  и  $\sigma_{ib}^2$  – дисперсии.

Представим импульсную характеристику многолучевого КВ канала с независимыми задержками  $\Delta\tau_i$  между лучами с помощью выражения:

$$\tilde{S}_{\text{ППРЧ}} = \sum_{j=1}^N G_j(t) \cdot \delta(t - \Delta\tau_j) \cdot \left[ \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M S \cdot I_{\text{imp}}(t) \cdot F_{\text{sig}}(t) \right] + P(t). \quad (15)$$

Для упрощения расчетов в соответствии с выражениями для модели Ваттерсона в рекомендации МСЭ-Р (ITU-R) [6] определены различные состояния среды распространения для КВ канала для случая двухлучевого распространения радиосигнала с помощью задания величин частотного рассеяния  $\Delta f_i$  и значения времени задержек  $\Delta\tau_i$  для различных широт.

Таким образом, проведено обобщенное аналитическое моделирование процессов формирования и обработки сигналов в КВ канале при пакетной передаче речи и данных в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, результаты которого могут быть использованы при разработке сложных математических моделей КВ канала.

Дальнейшие исследования направлены на решение вопросов математического и аппаратно-программного обеспечения задач оптимизации процессов формирования и обработки радиосигналов с пакетной передачей речи и данных в канале коротковолновой радиосвязи в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки.

#### Литература:

1. Березовский В.А., Дулькейт И.В., Савицкий О.К. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / Под ред. В.А.

$$h(\Delta\tau, t) = \sum_{j=1}^N G_j(t)\delta(t - \Delta\tau_j), \quad (13)$$

тогда передаваемый радиосигнал на входе приемника КВ диапазона имеет вид:

$$\tilde{S}_{HF} = \sum_{j=1}^N G_j(t) \cdot \delta(t - \Delta\tau_j) \cdot S_{\text{ппрч}}(t) + P(t), \quad (14)$$

где  $P(t) = p(t) + Im(t) + n(t)$  – аддитивная смесь частотно-модулированной (ЧМ) помехи  $p(t)B(t) \cdot \cos(\omega_n t + \lambda_n)$ , где  $B(t)$  – амплитуда ЧМ-помехи,  $\omega_n$  – частота ЧМ-помехи,  $\lambda_n$  – случайный модулирующий процесс ЧМ-помехи, импульсной помехи  $Im(t) \begin{cases} I(t); & t = t_i; \\ 0; & t \neq t_i, \end{cases}$ , где  $I(t)$  – случайная амплитуда, и шума  $n(t)$ .

После математических преобразований запишем математическое выражение для сигнала ППРЧ на входе приемника КВ диапазона:

Березовского. – М.: Радиотехника, 2011. – 444 с.: ил., стр. 197.

2. MIL-STD U. S. 188-110C, " // Military Standard-Interoperability and Performance Standards for Data Modems", US Dept. of Defense. - 2012.

3. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Коржик В.И., Назаров М.В. Теория электрической связи: Учебник для вузов / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1999. - 432 с.: 204 ил.

4. Березовский В.А., Дулькейт И.В., Савицкий О.К. Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы / Под ред. В.А. Березовского. – М.: Радиотехника, 2011. – 444 с.: ил., стр. 197.

5. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. – СПб.: Свое издательство, 2013. – 166 с.: ил.

6. Recommendation ITU-R F.1487 Testing of HF modems with bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric channel simulators, F Series, (05/2000).

7. Маркелов Н.Н., Илюхин А.А., Харисов Р.Р., Викторов М.А. Программа моделирования передачи речевого пакетного трафика в коротковолновом канале в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2020619267 от 14.06.2020 г.