

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ СПЛАЙНАМИ В ЗАКРЫТЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СЕТЯХ КОМПЛЕКСНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

Лубенцов А.В.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** информационная безопасность, кибербезопасность, аппроксимация, интерполяция, тригонометрические сплайны, полиномиальные сплайны.

## Аннотация

**Постановка проблемы.** Одним из основных показателей безопасности информационных систем является целостность информации. При передаче сообщения сигналы искажаются из-за влияния различных случайных факторов.

**Цель статьи:** синтез модели интерполяции и аппроксимации сигналов в целях восстановления поврежденных участков, а также упаковки сигналов в целях информационной безопасности.

**Метод исследования.** Для цифрового моделирования поведения системы используются полиномиальные и тригонометрические сплайны. Используется спектральное представление нелинейных сигналов через многомерные характеристики рядов.

**Результаты исследования.** Показана целесообразность использования полиномиальных и тригонометрических сплайнов в качестве математических моделей информационных сигналов и применения рассмотренных сплайнов в процессе аппроксимации для восстановления сигналов в качестве компонентов фильтров. Как вариант, рассмотренная модель предлагается к использованию при организации канала связи с беспилотными летательными аппаратами.

**Практическая значимость.** При применении линейных методов обработке подлежат только фундаментальные функции. Это позволяет выполнять необходимые вычисления в два этапа. На первом этапе выполняется обработка фундаментальных функций (эти расчеты могут быть выполнены заранее). На втором этапе выполняются расчеты, учитывающие значения воспроизводимых функций. Показано, что для интерполяции сигнала в защищенных сетях следует использовать метод фантомных узлов, позволяющий повысить точность.

DOI: 10.21681/1994-1404-2024-2-72-81

## Введение

В информационно-коммуникационных системах существует множество задач, когда необходимо обеспечить высококачественную аппроксимацию и интерполяцию процессов с ограниченными или неточными первичными данными, а также при естественных помехах сигнала или искусственном воздействии на него. Таким образом, в подавляющем большинстве информационных систем входной и выходной сигналы представляют собой непрерывные функции. Примерами являются голосовые сообщения, визуальные образы и т. д.

Такая же ситуация возникает при передаче непрерывного визуального сообщения. Это означает, что при передаче по каналу информации и воздействию на нее

случайных факторов пользователи получают сигнал в искаженном, несколько отличающемся от исходного виде. Связь между источником и получателем непрерывного сообщения не идеальна и нуждается в улучшении для повышения адекватности и целостности информации как основных показателей безопасности информационных систем.

Для этого требуется:

1) знать основные компоненты и ширину амплитудно-частотного спектра непрерывного случайного процесса, формируемого источником (ширина этого спектра формально бесконечна), с достаточной точностью, чтобы эффективно восстановить процесс;

<sup>1</sup> Лубенцов Александр Витальевич, кандидат географических наук, доцент, Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Российская Федерация. ORCID: 0000-0003-0239-4843, SPIN-код: 6530-4715.  
E-mail: lubensov@mail.ru

2) определить и минимизировать потенциальные потери в качестве восстановления исходного процесса после его завершения;

3) выявить и минимизировать потенциальные потери в качестве восстановления исходного процесса из-за шума, возникающего при квантовании;

4) обеспечить формирование прямоугольной частотной характеристики канала в этом диапазоне с учетом влияния всех его составляющих;

5) выявить и адекватно учесть влияние на частотную характеристику аддитивных и мультипликативных помех, присутствующих соответствующим каналам.

### Анализ методов, предлагаемых в литературе

Сплайны как математический аппарат обработки массивов данных и сигналов используются достаточно широко. Например, в [1] утверждается: «В последнее время в области цифровой обработки сигналов все шире начинают применяться цифровые нелинейные фильтры. Причиной их использования является то, что традиционная линейная обработка сигналов не всегда приводит к приемлемым результатам на практике.

При этом, исходя из целей моделирования, можно выделить следующие типы задач:

1) определение динамических характеристик дискретного нелинейного фильтра таким образом, чтобы его выходной сигнал совпадал с дискретизированным сигналом моделируемой системы;

2) восстановление выходного сигнала моделируемой системы по дискретному выходному сигналу цифрового нелинейного фильтра.

Для линейного случая данные задачи тождественны... При этом требование к увеличению частоты дискретизации при восстановлении выходного сигнала нелинейной системы может быть обеспечено исключительно вычислительным путем за счет дополнения нулями частотных характеристик моделирующего фильтра с последующим обратным преобразованием Фурье» [1]. Однако применение даже быстрого преобразования Фурье и нелинейные параметры фильтра предъявляют повышенные требования к вычислительным мощностям, особенно в случае необходимости обработки в режиме реального времени. Применение сплайнов упрощает и ускоряет эти расчеты. К тому же авторы не рассматривают сигнал с потерями.

Авторы [2] предлагают метод использования сплайн-функций для дублирования модели позиционирования судна в условиях возможных помех. Они заявляют: «Рассмотрены вопросы кибернетической безопасности в аспекте эффективных предложений альтернатив спутниковой системы в целях возможности оперативного переориентирования на резервную систему позиционирования в случае возникновения любых технических проблем... Дан прогноз достижимости эффекта предсказуемости местоположения мобильного объекта в среде спутникового отсут-

ствия в случае оптимального управления движением с помощью прогностического моделирования при условии предвидения точной оценки неопределенности навигационной системы. Апробированные на методах сплайн-функций алгоритмы обеспечения авторитетного позиционирования выполнены в качестве интеллектуальной поддержки судоводительского состава по управлению судном в условиях нештатной ситуации» [2]. Предложенный метод при доработке можно использовать для позиционирования не только морских объектов, однако для обработки других сигналов метод необходимо существенно переработать.

Авторы [3] выделяют обработку речевых сигналов в отдельный сектор. Они заявляют: «Из-за сложности речевого сигнала, а именно из-за нестационарности данного сигнала, его предварительная обработка — один из важных шагов при распознавании речи. На этом этапе осуществляются фильтрация, кодирование, восстановление речи. Основными методами предварительной обработки речевых сигналов являются:

1) преобразование Фурье является частотным методом. Недостаток — частотные компоненты не могут быть локализованы во времени;

2) вейвлет-преобразование является частотно-временным методом. Он стал альтернативой в обработке речевого сигнала преобразованию Фурье. Недостатком этого метода является большое количество предварительных вычислений;

3) в результате декомпозиции на эмпирические моды сигнал раскладывается на составляющие, называемые модами. И достоинством этого метода является то, что эти моды вычисляются в ходе процесса обработки и не требуются никаких предварительных расчетов. Поэтому данный метод и будет далее рассматриваться.

По результатам рассмотрения разновидностей метода декомпозиции на эмпирические моды и выбран наилучший метод, а именно улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом.» [3].

Сложно согласиться с утверждениями авторов: со-временные модели достаточно хорошо борются с первым пунктом [4], а рост вычислительных мощностей — со вторым. К тому же применение Фурье-преобразований тоже достаточно ресурсозатратно. В то же время сплайн-методы достаточно уверенно описывают как речевые, так и другие виды сигналов.

### Системный анализ задач в области информационной и кибербезопасности

При анализе и обработке визуальной информации растровое изображение можно рассматривать как случайное поле, для которого также существует понятие пространственной корреляционной функции, а учитывая, что такое изображение в большинстве случаев является динамическим процессом, — это пространственно-временная корреляционная функция.

Ряд задач в области информационной и кибербезопасности требуют эффективной интерполяции, а в некоторых ситуациях и сочетания методов интерполяции и аппроксимации.

К таким задачам относятся следующие:

1) с точки зрения обеспечения доступности и целостности информации:

- восстановление голосового сообщения в случае потери определенной части его образцов под воздействием помех или в результате преднамеренного искажения;
- восстановление визуальной картинки в случае потери определенной части фрагментов (пикселей);
- альтернатива кодированию для исправления ошибок;
- восстановление сигналов, поврежденных специальным воздействием;
- восстановление информации с поврежденного диска.

В таких случаях (в цифровом представлении) мы имеем дело со случайной последовательностью прямоугольных (в первом приближении) импульсов, часть из которых искажена или потеряна (когда есть «окна» поврежденных символов).

2) с точки зрения информационной безопасности существуют обратные задачи:

- определение границ искусственных искажений, за пределами которых секретность в потенциальном канале утечки информации может считаться надежной;
- метод тестирования криптографических процедур (шифров) для оценки их эффективности;
- в криптоанализе (расшифровка при неизвестном ключе).

В этих ситуациях необходимо выделять истинную (содержащую информацию) случайную последовательность из смеси его с другой, мешающей случайной последовательностью. Частотные спектры таких последовательностей имеют огибающую в соответствии с формой спектра прямоугольного импульса с хаотическим заполнением.

Таким образом, решение этих задач либо во временной, либо в частотной области требует привлечения мощного математического аппарата.

На современном этапе эти проблемы полностью не решены. Одним из математических методов, которые могут помочь в решении таких задач, является использование сплайновой аппроксимации и сплайновой интерполяции [1—12].

### Интерполяция с применением полиномиальных сплайнов

Теоретически использование известных интерполяционных полиномов позволяет получить решение задачи со сколь угодно высокой точностью. Однако накопление вычислительных ошибок при достаточно больших

значениях объема выборки  $N$  не позволяет добиться желаемых результатов. В этом случае предлагается использовать метод сплайн-интерполяции. Наиболее распространенным является кубический сплайн  $S(x)$ , определяемый формой полиномов не выше третьего порядка.

$$Y_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, \quad (1)$$

$$i = 1; \dots; N, x_{i-1} \leq x \leq x_i,$$

$$\beta_i = (-2\Delta x_i \beta_{i-1} + 6h_{i+1}) / (4\Delta x_{i+1} + 3\Delta x_i + \alpha_{i-1} 2\Delta x_i),$$

$$i = 1; \dots; N - 1.$$

$$\Delta x_i = x_i - x_{i-1},$$

$$\Delta y_i = y_i - y_{i-1}$$

$$h_i = g_i - g_{i-1},$$

$$g_i = \Delta y / \Delta x_i$$

### Начальные условия

Начальные условия принимаем классическими, по параметрам непрерывности и гладкости функции.

Для этого применяем классический метод — постулируем обязательность неразрывности первых двух производных, что подробно описано и обосновано в [10].

Зададим отсутствие разрывов первой и второй производных функции  $Y(x)$  в точках рассматриваемой сетки:

$$a_{i-1} = s_{i-1}(x_{i-1}) = s_i(x_{i-1}) =$$

$$= a_i + b_i(x_{i-1} - x_i) + \frac{c_i}{2}(x_{i-1} - x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x_{i-1} - x_i)^3$$

$$\text{где } i = 2; \dots; N.$$

$$b_{i-1} = s'_{i-1}(x_{i-1}) = s'_i(x_{i-1}) =$$

$$= b_i + c_i(x_{i-1} - x_i) + \frac{d_i}{2}(x_{i-1} - x_i)^2;$$

$$c_{i-1} = s''_{i-1}(x_{i-1}) = s''_i(x_{i-1}) =$$

$$= c_i + d_i(x_{i-1} - x_i); i = 2; \dots; N.$$

$$\text{Определим, что } Y(x_i) = y(x_i),$$

$$a_i = s_i(x_i) = Y(x_i) = y(x_i); i = 1; \dots; N.$$

Определим, что в точке  $x_0$  начальные значения соответствуют равенству:

$$a_1 + b_1(x_0 - x_1) + \frac{c_1}{2}(x_0 - x_1)^2 + \frac{d_1}{6}(x_1 - x_0)^3 =$$

$$= s_1(x_0) = Y(x_0) = y(x_0).$$

Учитывая заданные характеристики, равенство  $s_{i+1}(x_i) = Y(x_i)$  истинно

$$a_i = y(x_i); i = 1; \dots; N.$$

**Задание значений на границе выборки**

В модели применяется естественный сплайн как наиболее отвечающий заложенным требованиям:

$$c_N = s_N''(x_N) = Y''(x_N) = 0.$$

Разрабатываемая математическая модель характеризуется коэффициентами сплайна и параметрами сетки. Сам синтез сплайна заключается в расчете коэффициентов, не превышающих заданной погрешности между параметрами сигнала и построенной интерполяционной или аппроксимационной кривой.

Построенный сплайн выглядит в виде следующей функции:

$$s(x) = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^k c_{ij} Y_{ij}(x_{ij}). \quad (2)$$

Порядок аппроксимационного сплайна определяется параметром  $k$ .

Расчёт характеристик рассмотренной модели описания анализируемого сигнала рассмотрим в виде:

$$s_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + \frac{c_i}{2}(x - x_i)^2 + \frac{d_i}{6}(x - x_i)^3$$

Из этого заключаем:

$$a_i = s_i(x_i); b_i = s_i'(x_i); c_i = s_i''(x_i); d_i = s_i'''(x_i).$$

Полученные таким образом полиномы (1) восстанавливают функцию  $Y(x)$  на всем интервале  $[a; b]$ .

Решение системы уравнений (2) позволяет определить коэффициенты сплайна  $d_i$  и  $b_i$  по вышеприведенным формулам и, таким образом, обеспечить восстановление функции.

Таким образом, основная задача сводится к решению системы из  $N-2$  линейных алгебраических уравнений, которая содержит  $n$  неизвестных  $c_r, r=[1; \dots; N]$ .

Запишем решение модели в виде

$$A_i c_{i-1} - B_i c_i + C_i c_{i+1} = D, k = 1; \dots; N-1, \quad (3)$$

Или в матричной форме

$$A_2 \dots - B_2 \dots C_2 \dots D_2$$

$$A_3 \dots - B_3 \dots C_3 \dots D_3$$

.....

$$A_i \dots - B_i \dots C_i \dots D_i$$

$$A_{n-1} - B_{n-1} \cdot C_{n-1} \cdot D_{n-1} \dots$$

где

$$\begin{aligned} A_i &= 2\Delta x_i, B_i = -(4\Delta x_{i+1} + 3\Delta x_i), \\ C_i &= 3\Delta x_{i+1}, D_i = 6h_{i+1} \\ i &= 2; \dots; N-1 \end{aligned} \quad (4)$$

И где соответственно

$$h_i = g_i - g_{i-1}, g_i = \Delta y / \Delta x_i$$

Чтобы решить систему (3) из  $N-2$  уравнений относительно неизвестных  $c_r$ , мы «расширим» ее до  $n$  уравнений, включив два соотношения:

$$c_0 = \alpha_0 c_1 + \beta_0, c_{N-1} = \alpha_{N-1} c_N + \beta_{N-1}. \quad (5)$$

Коэффициенты  $\alpha_0, \beta_0, \alpha_{N-1}, \beta_{N-1}$  будут уточнены позже с учетом выбранных граничных условий.

Подставляем выражение для  $c_0$  из (5) в формулу (4), в результате получим

$$A_1(\alpha_0 c_1 + \beta_0) - B_1 c_1 + C_1 c_2 = D_1 \quad (6)$$

откуда следует зависимость первого радикала  $c_1$  на втором радикале  $c_2$

$$c_1 = \alpha_1 c_2 + \beta_1 \quad (7)$$

где

$$\alpha_1 = C_1 / (B_1 - A_1 \alpha_0), \beta_1 = (A_1 \beta_0 - D_1) / (B_1 - A_1 \alpha_0).$$

Аналогично, подставляя  $c_1$  из (7) в формулу (6), мы получаем выражение, из которого мы можем идентифицировать  $c_2 = \alpha_2 c_3 + \beta_2$ . Далее, используя метод индукции, мы находим  $i$ -й радикал

$$c_i = \alpha_i c_{i+1} + \beta_i, i = 1; \dots; N-1, \quad (8)$$

с известными коэффициентами

$$\begin{aligned} \alpha_i &= C_i / (B_i - A_i \alpha_{i-1}), \beta_i = \\ &= (A_i \beta_{i-1} - D_i) / (B_i - A_i \alpha_{i-1}), \\ i &= 1; \dots; N-1 \end{aligned} \quad (9)$$

После подстановки коэффициентов уравнения (4)  $A_r, B_r, C_r, D_i$  в решение (9) и преобразуя, мы получаем

$$\begin{aligned} \alpha_i &= -3\Delta x_{i+1} / (4\Delta x_{i+1} + 3\Delta x_{i+2} + \Delta x_i \alpha_{i-1}), \\ i &= 1; \dots; N-1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \beta_i &= (-2\Delta x_i \beta_{i-1} + 6h_{i+1}) / \\ &/ (4\Delta x_{i+1} + 3\Delta x_i + \alpha_{i-1} 2\Delta x_i), \\ i &= 1; \dots; N-1. \end{aligned} \quad (11)$$

Чтобы определить первые коэффициенты  $\alpha_r, \beta_r$  и последний радикал  $c_n$ , необходима дополнительная информация о поведении сплайна на его границах.

«Естественный сплайн» с граничными условиями хорошо подходит для интерполяции реальных гармонических сигналов. В случае непрерывных функций с непрерывными производными первого и второго порядка это обеспечивает высокую точность. Известно, что относительная погрешность интерполяции функций с одинаковым шагом 0,001 приводит к погрешности восстановления в пятом знаке после запятой [8, 9].

Высокая точность интерполяции, подтверждаемая данными [12], не является обязательным условием для



использования сплайнов во многих прикладных задачах. В некоторых из них важнее обеспечить требуемую кривизну линии или выполнение особых условий на границах. Тогда есть смысл применения тригонометрических сплайнов.

**Интерполяция с применением тригонометрических сплайнов**

Установлено [15], что сигнал, представленный рядом Фурье, может быть только периодическим.

В работе также предлагается метод ослабления явления Гиббса, основанный на тригонометрических рядах Фурье. Этот метод позволяет периодически продлевать сигнал произвольного характера и в то же время избавляться от разрывов и разломов сигнала на стыках периодов.

Рассмотрим метод периодического продолжения непериодических функций для случая, когда в качестве аппроксимирующей функции используются тригонометрические сплайны.

Рассмотрим функцию  $f(t)$  на интервале  $[0; 2\pi]$ , тогда  $N$ -узлы интерполяции,  $N=2n+1$ , где  $n=1,2,\dots$ , шаг равномерной сетки равен  $h = 2\pi \frac{i-1}{N}$ , и где  $i=1,2,\dots,N$ .

Вычисляется значение функции в узлах интерполяции. Получается последовательность значений функции

$$\{f(h(k-1))\}_{k=1}^N = \{f_k\}_{k=1}^N \quad (12)$$

Далее строится тригонометрический интерполяционный сплайн на основе этих узлов, который имеет вид:

$$S_{t_r}(f, \Delta N, t) = \frac{a_0}{2} + \quad (13)$$

$$+ \sum_{k=1}^n \alpha_k(r, N) \left[ a_k^* \Phi_k^c(r, N, t) + b_k^* \Psi_k^s(r, N, t) \right],$$

где

$$\Phi_k^c(r, N, t) = \frac{\cos(kt)}{k^{r+1}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{\cos(mN+k)t}{(mN+k)^{r+1}} + \frac{\cos(mN-k)t}{(mN-k)^{r+1}} \right],$$

$$\Psi_k^s(r, N, t) = \frac{\sin(kt)}{k^{r+1}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{\sin(mN+k)t}{(mN+k)^{r+1}} + \frac{\sin(mN-k)t}{(mN-k)^{r+1}} \right],$$

$$[\alpha_k(r, N)]^{-1} = \frac{1}{k^{r+1}} + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{(mN+k)^{r+1}} + \frac{1}{(mN-k)^{r+1}} \right],$$

$$\alpha_0 = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N f(t_i), \alpha_k^* = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N f(t_i) \cos(kt_i)$$

$$b_k^* = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N f(t_i) \sin(kt_i), k = 1, 2, \dots, N$$

Интерполяционный тригонометрический сплайн  $S_{t_r}$  интерполирует функцию  $f(t)$  в точках  $N + 1$ , заданных на отрезке  $2\pi$ . Поскольку значение этого тригонометрического сплайна определено в точке  $2\pi$ , из периодичности следует, что  $S_t(2\pi) = S_t(0)$ . Поэтому мы

будем рассматривать сплайновую интерполяцию только на интерполяционном отрезке  $2\pi - h$ . Понятно, что тригонометрической интерполяционный сплайн обусловлен тем, что  $f(0) \neq f(2\pi)$ , и в окрестности точек 0 и  $2\pi$  функция имеет те же дефекты, что и ряд Фурье в окрестности точек останова. Поэтому целесообразно использовать метод улучшения сходимости, который называется методом фантомных узлов [9].

Этот метод заключается в следующем. К последовательности узлов интерполяции добавляется четное число фантомных узлов; значения в этих узлах будут выбраны с учетом оценок производных, которые мы оцениваем, используя разделенные разности в окрестностях точек 0 и  $2\pi - h$ . То есть мы построим функцию  $\lambda(t)$ , где  $t \in (2\pi - \alpha, 2\pi)$ , в промежутке  $(2\pi - \alpha, 2\pi)$  в зависимости от условий

$$\lambda(2\pi - \alpha) = f(2\pi); \lambda(2\pi) = f(0); \quad (14)$$

$$\lambda'(2\pi - \alpha) = f'(2\pi); \lambda'(2\pi) = f'(0);$$

... ..

$$\dots \dots \dots$$

$$\lambda^{(k-1)}(2\pi - \alpha) = f^{(k-1)}(2\pi); \lambda^{(k-1)}(2\pi) = f^{(k-1)}(0)$$

и найдем значения производных функции в соответствующих точках.

Добавление  $2k$  ( $k = 1, 2, \dots$ ) фантомных узлов увеличивает количество узлов интерполяции на отрезке  $[0, 2\pi]$  и уменьшает шаг  $h$  интерполяционной сетки, который теперь становится равным  $h_k = 2\pi(i-1)/(N+2k)$ . Поскольку количество значений интерполируемой функции не меняется, уменьшение шага интерполируемой сетки приводит к уменьшению сегмента интерполяции, который становится равным  $N_{h_k}$ .

И линейная функция  $\varphi(t)$  строится на сегменте  $[2\pi - N_{h_k}, 2\pi]$ , удовлетворяющая необходимым условиям

$$\varphi(t) = \left\{ \begin{array}{l} f_N, t = N_{h_k}; \\ f_1, t = 2\pi. \end{array} \right\} \quad (15)$$

Вычисляя значения этой функции в фантомных узлах  $t_{N+1}, t_{N+2}, \dots, t_{N+2k-1}$ , мы можем найти требуемые значения в этих узлах.

Четное число фантомных узлов выбрано для того, чтобы общее число узлов интерполяции было нечетным, поскольку тригонометрическая интерполяция нечетного числа точек более удобна. Удобно добавить небольшое количество фантомных узлов, т. е. установить  $k = 1, 2$ , т. к. это уменьшает количество вычислений.

Фантомные узлы могут быть добавлены с обеих сторон последовательности интерполяции. Но нам нужно построить две функции:  $\varphi_1(t)$  слева и  $\varphi_2(t)$  справа. Однако из-за периодичности интерполяции тригонометрическими сплайнами удобнее делать это с одной стороны.

При построении функции  $\varphi(t)$  мы можем потребовать, чтобы ее производные определенного порядка также принимали определенные значения в точках

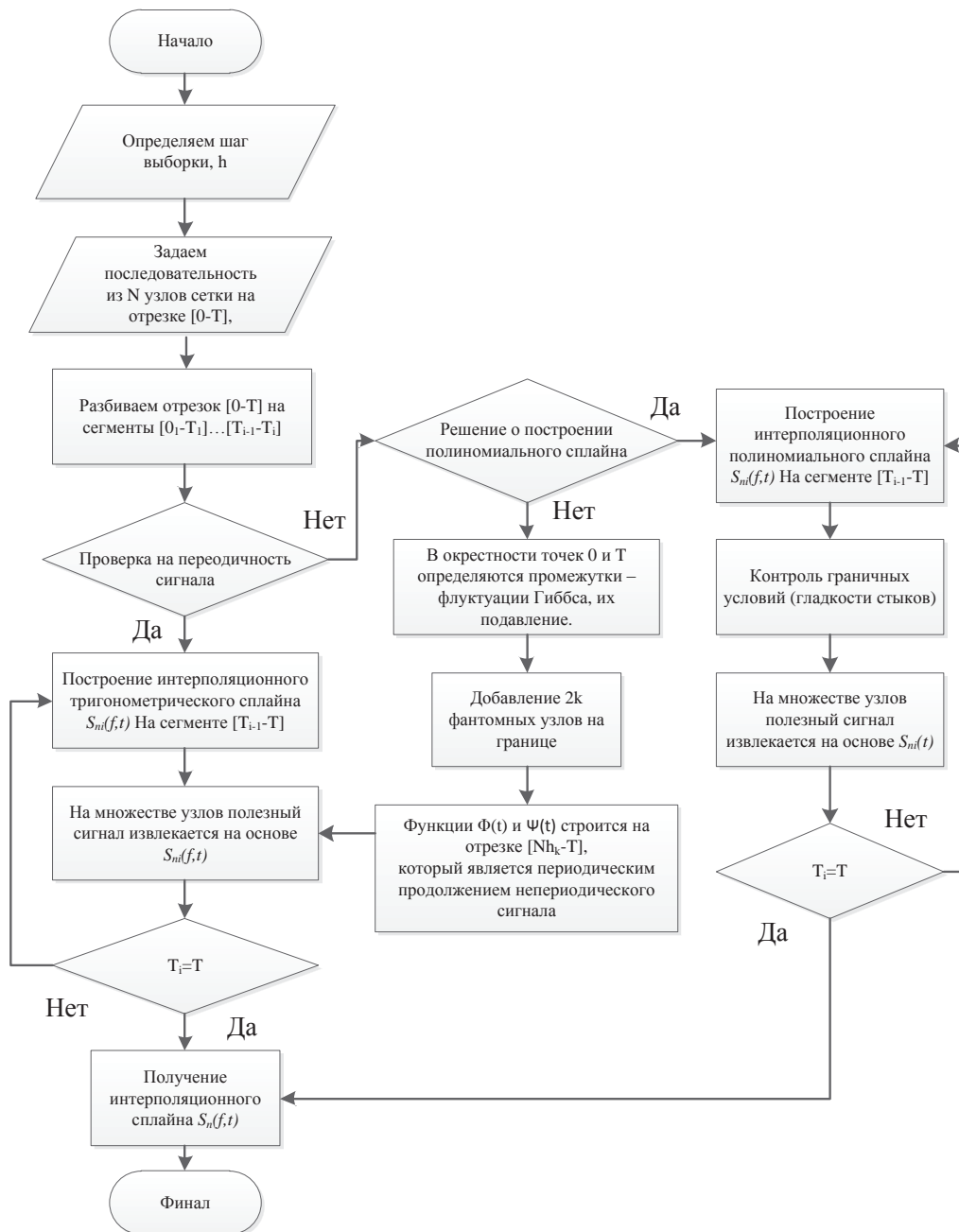


Рис. 1. Схема вычислительной модели построения интерполяционного сплайна

$N_{hk}$  и  $2\pi$ . Для нахождения этих значений можно использовать разделенные разности интерполированной функции.

Кроме того, во многих случаях при построении функции  $\varphi(t)$  могут быть использованы точные значения производных интерполированной функции  $f(t)$ . На рисунке 1 показана возможная модель обработки информации.

Данная процедура повторяется на каждом из указанных сегментов для обработки дискретной информации. Таким образом, предлагается обобщенный метод обработки информации при выделении сигнала на сплайн-фильтрах, который значительно упрощает алгоритм обработки.

## Выводы

При изучении различных погрешностей линейных звеньев в теории информационных систем различного назначения, таких как линейные усилители, фильтры и вплоть до частотной характеристики канала передачи информации в общем, целесообразно использовать периодические модели информационных сигналов. Эта целесообразность объясняется тем фактом, что тригонометрические функции, используемые при построении периодических моделей, являются собственными функциями линейных операторов, т. е. не изменя-

ются в пределах константы при воздействии линейных операторов.

Таким образом, доказано, что возможно использовать полиномиальные и тригонометрические сплайны в качестве математических моделей информационных сигналов и более целесообразно использовать тригонометрические сплайны фундаментальной аппроксимации для восстановления сигналов в качестве компонентов фильтров.

Доказано, что при восстановлении цифровых сигналов, особенно имеющих окна потерь, целесообразно использовать методы полиномиальной сплайновой обработки. Это обусловлено относительной простотой модели и гладкостью получаемых результатов.

Усовершенствованный метод обработки гармонических сигналов в информационной системе на основе фундаментальных тригонометрических сплайнов позволяет периодически расширять сигнал произвольной природы и в то же время избавляться от разрывов и изломов сигнала на стыках периодов. Метод фантомных узлов следует использовать для интерполяции по-

лезного сигнала в информационных сетях, что повышает точность обработки информации.

Предложенные модели могут использоваться в системах информационной безопасности, в радиотехнических системах передачи для упаковки, обработки и восстановления сигналов. Особенно актуально применение предложенных разработок при организации канала связи с БПЛА [15—17].

Программы, реализующие некоторые аспекты рассматриваемых моделей, зарегистрированы в Росреестре [18—20]. Проблемы внедрения и применения рассмотренных методов обсуждались в ходе ряда конференций и, частично, используются в образовательной практике Воронежского института ФСИИ<sup>2</sup> [21].

В дальнейшем автор планирует совершенствование рассматриваемой методики использования сплайновой аппроксимации и сплайновой интерполяции применительно к перечисленным выше задачам обработки сигналов в защищенных информационных системах.

### Литература

1. Щербаков М.А. Особенности дискретизации и восстановления сигналов в нелинейных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2023. № 4. Пензенский государственный университет, Пенза, Россия. DOI: 10.21685/2072-3059-2023-4-6 .
2. Ююкин И.В. Кибернетическая безопасность альтернативной автономной навигации с позиций сплайновой технологии // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2022. Т. 14. № 3. С. 346—364. DOI: 10.21821/2309-51802022-14-3-346-364 .
3. Козлов В.В., Фокина Е.А., Трофимов А.А. Предварительная обработка сигнала при распознавании голосовых команд методом улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 3. С. 3—6. DOI: 10.21685/2307-5538-2022-3-6 .
4. Викулов П.Н., Вертоградов Г.Г., Шевченко В.Н. Метод частотно-временной локализации сложных сигналов // ЗАО АВТЭКС Санкт-Петербург, Россия. URL: <http://autex.spb.su/download/dsp/dspa/dspa2005/t1/14.pdf> (дата обращения: 05.05.2024).
5. Ромакин В.А. Сглаживание ломаных линий составными сплайнами Безье // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2022. Т. 11. № 4. С. 37—50. DOI: 10.14529/cmse220403 .
6. Зайнидинов Х.Н., Азимов Б.Р. Построение кубического сплайна для сигналов, измеренных в неравных интервалах // Автоматика и программная инженерия. 2020. № 1 (31). С. 70—76.
7. Зайнидинов Х.Н., Кучкаров М.А. Моделирование геофизических полей локальными параболическими сплайнами // Автоматика и программная инженерия. 2020. № 1 (31). С. 77—82.
8. Ююкин И.В. Синтез кубическими сплайнами искаженной изолинии в аспекте использования дифференциального режима спутниковой навигации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2021. Т. 13. № 3. С. 64—79.
9. Сорокин А.А., Бородянский И.М., Дагаев А.В. Сравнительный анализ методов восстановления пропущенных данных // Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. № 4 (214). С. 93—107.
10. Самохин К.С., Зайцева Т.С. Разработка ПО для решения задач методом кубической интерполяции // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т. 7. № 1. С. 111—114.
11. Зайнидинов Х.Н., Нурмородов Ж.Н.У., Гофуржонов М.Р.У. Алгоритмы и программы восстановления функций с помощью кубических базисных сплайнов // Автоматика и программная инженерия. 2022. № 1 (39). С. 67—72.
12. Хоменко Т.В., Яксубаев К.Д. Параметрический сплайн, построенный на основе оператора Ispline пакета MathCad // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2021. № 1 (35). С. 86—88.

<sup>2</sup> Лубенцов А.В. Комплексные системы безопасности: теоретические основы построения и функционирования : учебник / А.В. Лубенцов, А.В. Душкин. Воронежский институт ФСИИ России. Иваново : ИПК «ПресСто», 2023. 288 с. ISBN 978-5-6050571-2-3.

13. Лубенцов А.В. Модель защиты канала связи беспилотного летательного аппарата // ВУНЦ ВВС, Всероссийский форум с международным участием. Перспективы развития видов обеспечения ВВС. VI Всероссийская НПК «Современное состояние и перспективы развития специальных видов материально-технического обеспечения авиации», Воронеж, 2023. С. 241—258.
14. Лубенцов А.В. Восстановление цифровых сигналов методом интерполяции естественным кубическим сплайном с анализом граничных условий // В сб.: Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции. В 5-ти томах. Воронеж, 2024. С. 155—162.
15. Лубенцов А.В. Применение полиномиальных сплайнов для оптимизации видеоизображения, передаваемого с беспилотного летательного аппарата // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б.Я. Осипова. В 6-ти томах. Воронеж, 2023. С. 328—337.
16. Лубенцов А.В. Модель защиты канала связи беспилотного летательного аппарата // ВУНЦ ВВС, Всероссийский форум с международным участием. Перспективы развития видов обеспечения ВВС. VI Всероссийская НПК «Современное состояние и перспективы развития специальных видов материально-технического обеспечения авиации», Воронеж, 2023. С. 241—258.
17. Лубенцов А.В. Модель трансформации и оптимизации видеопотока как составной части комплексной системы безопасности // Промышленные АСУ и контроллеры. 2023. № 1. С. 34—41. DOI: 10.25791/asu.1.2023.1410 ISSN 1561-1531 .
18. Лубенцов А.В. Программа для распознавания образа риска путем описания характеристических данных датчиков полиномиальными сплайнами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023684928 от 21.11.2023.
19. Лубенцов А.В. Программа для описания цифрового сигнала на основе кубических сплайнов Эрмита и вывода сигнала на монитор. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024615426, 06.03.2024. Заявка от 29.02.2024.
20. Лубенцов А.В. Программа для расчета интерполятора цифрового сигнала на основе кубических сплайнов Эрмита и моделирования передискретизации. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024615427, 06.03.2024. Заявка от 29.02.2024.
21. Лубенцов А.В., Душкин А.В. Комплексные системы безопасности: системный анализ, архитектура, управление жизненным циклом : монография. Воронеж : Научная книга, 2022. 254 с.

### INFORMATION AND COMPUTER SECURITY

# A SYSTEM ANALYSIS OF THE MODEL FOR SPLINE DESCRIPTION OF ELECTRONIC SIGNALS IN CLOSED INFORMATION NETWORKS OF COMPLEX SECURITY SYSTEMS

**Aleksandr Lubentsov**, Ph.D. (Geography), Associate Professor at the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-0239-4843, SPIN code: 6530-4715.

E-mail: [lubensov@mail.ru](mailto:lubensov@mail.ru)

**Keywords:** information security, cybersecurity, approximation, interpolation, trigonometric splines, polynomial splines.

#### Abstract

*Problem statement.* One of the main indicators of information system security is the integrity of information. When transmitting a message, the signals are distorted due to the influence of various random factors.

*Purpose of the paper:* a synthesis of the signal interpolation and approximation models with a view to restore the damaged areas, as well as signal packaging for information security purposes.

*Methods used in the study.* Polynomial and trigonometric splines are used for digital modelling of the system behaviour. The spectral representation of non-linear signals using multidimensional characteristics of series is applied.



*Study findings. The advisability of using polynomial and trigonometric splines as mathematical models of information signals as well as of using these splines in the approximation process for restoration of signals as filter components is shown. As an option, the considered model is proposed for use in organising a channel for communication with unmanned aerial vehicles.*

*Practical importance. When using linear methods, only fundamental functions are subject to processing. This allows to perform the necessary calculations in two stages. At the first stage, the fundamental functions are processed (these calculations can be performed in advance). At the second stage, calculations are performed that take into account the values of the reproduced functions. It is shown that for signal interpolation in protected networks the phantom node method should be used to increase accuracy.*

### References

1. Shcherbakov M.A. Osobennosti diskretizatsii i vosstanovleniia signalov v nelineinykh sistemakh. Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki, 2023, No. 4. Penzenskii gosudarstvennyi universitet, Penza, Rossiia. DOI: 10.21685/2072-3059-2023-4-6 .
2. Iuiukin I.V. Kiberneticheskaia bezopasnost' al'ternativnoi avtonomnoi navigatsii s pozitsii splainovoi tekhnologii. Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova, 2022, t. 14, No. 3, pp. 346–364. DOI: 10.21821/2309-51802022-14-3-346-364 .
3. Kozlov V.V., Fokina E.A., Trofimov A.A. Predvaritel'naia obrabotka signala pri raspoznavanii golosovykh komand metodom uluchshennoi polnoi mnozhestvennoi dekompozitsii na empiricheskie mody. Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol', 2022, No. 3, pp. 3–6. DOI: 10.21685/2307-5538-2022-3-6 .
4. Vikulov P.N., Vertogradov G.G., Shevchenko V.N. Metod chastotno-vremennoi lokalizatsii slozhnykh signalov. ZAO AVTEKS Sankt-Peterburg, Rossiia. URL: <http://autex.spb.su/download/dsp/dspa/dspa2005/t1/14.pdf> (data obrashcheniia: 05.05.2024).
5. Romakin V.A. Sglazhivanie lomanykh linii sostavnymi splainami Bez'e. Vestnik IuUrGU. Serii: Vychislitel'naia matematika i informatika, 2022, t. 11, No. 4, pp. 37–50. DOI: 10.14529/cmse220403 .
6. Zainidinov Kh.N., Azimov B.R. Postroenie kubicheskogo splaina dlia signalov, izmerennykh v neravnykh intervalakh. Avtomatika i programmnaia inzheneriia, 2020, No. 1 (31), pp. 70–76.
7. Zainidinov Kh.N., Kuchkarov M.A. Modelirovanie geofizicheskikh polei lokal'nymi parabolicheskimi splainami. Avtomatika i programmnaia inzheneriia, 2020, No. 1 (31), pp. 77–82.
8. Iuiukin I.V. Sintez kubicheskimi splainami iskazhennoi izolinii v aspekte ispol'zovaniia differentsial'nogo rezhima sputnikovoi navigatsii. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, 2021, t. 13, No. 3, pp. 64–79.
9. Sorokin A.A., Borodianskii I.M., Dagaev A.V. Sravnitel'nyi analiz metodov vosstanovleniia propushchennykh dannykh. Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki, 2020, No. 4 (214), pp. 93–107.
10. Samokhin K.S., Zaitseva T.S. Razrabotka PO dlia resheniia zadach metodom kubicheskoi interpoliatsii. Interekspo Geo-Sibir', 2020, t. 7, No. 1, pp. 111–114.
11. Zainidinov Kh.N., Nurmorodov Zh.N.U., Gofurzhonov M.R.U. Algoritmy i programmy vosstanovleniia funktsii s pomoshch'iu kubicheskikh bazisnykh splainov. Avtomatika i programmnaia inzheneriia, 2022, No. 1 (39), pp. 67–72.
12. Khomenko T.V., Iaksubaev K.D. Parametricheskii splain, postroennyi na osnove operatora Ispline paketa MathCad. Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiia, 2021, No. 1 (35), pp. 86–88.
13. Lubentsov A.V. Model' zashchity kanala sviazi bespilotnogo letatel'nogo apparata. VUNTs VVS, Vserossiiskii forum s mezhdunarodnym uchastiem. Perspektivy razvitiia vidov obespecheniia VVS. VI Vserossiiskaia NPK "Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia spetsial'nykh vidov material'no-tekhnicheskogo obespecheniia aviatsii", Voronezh, 2023, pp. 241–258.
14. Lubentsov A.V. Vosstanovlenie tsifrovyykh signalov metodom interpoliatsii estestvennym kubicheskim splainom s analizom granichnykh uslovii. V sb.: Radiolokatsiia, navigatsiia, sviaz'. Sbornik trudov XXX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. V 5-ti tomakh. Voronezh, 2024, pp. 155–162.
15. Lubentsov A.V. Primenenie polinomial'nykh splainov dlia optimizatsii videoizobrazheniia, peredavaemogo s bespilotnogo letatel'nogo apparata. Radiolokatsiia, navigatsiia, sviaz'. Sbornik trudov XXIX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi pamiatii B.Ia. Osipova. V 6-ti tomakh. Voronezh, 2023, pp. 328–337.
16. Lubentsov A.V. Model' zashchity kanala sviazi bespilotnogo letatel'nogo apparata. VUNTs VVS, Vserossiiskii forum s mezhdunarodnym uchastiem. Perspektivy razvitiia vidov obespecheniia VVS. VI Vserossiiskaia NPK "Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia spetsial'nykh vidov material'no-tekhnicheskogo obespecheniia aviatsii", Voronezh, 2023, pp. 241–258.
17. Lubentsov A.V. Model' transformatsii i optimizatsii videopotoka kak sostavnoi chasti kompleksnoi sistemy bezopasnosti. Promyshlennye ASU i kontroliery, 2023, No. 1, pp. 34–41. DOI: 10.25791/asu.1.2023.1410 ISSN 1561-1531 .

## **СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ...**

18. Lubentsov A.V. Programma dlia raspoznavaniia obraza riska putem opisaniia kharakteristicheskikh dannykh datchikov polinomial'nymi splainami. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM No. 2023684928 ot 21.11.2023.
19. Lubentsov A.V. Programma dlia opisaniia tsifrovogo signala na osnove kubicheskikh splainov Ermita i vyvoda signala na monitor. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM RU 2024615426, 06.03.2024. Zaiavka ot 29.02.2024.
20. Lubentsov A.V. Programma dlia rascheta interpolatora tsifrovogo signala na osnove kubicheskikh splainov Ermita i modelirovaniia perediskretizatsii. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlia EVM RU 2024615427, 06.03.2024. Zaiavka ot 29.02.2024.
21. Lubentsov A.V., Dushkin A.V. Kompleksnye sistemy bezopasnosti: sistemnyi analiz, arkhitektura, upravlenie zhiznennym tsiklom : monografiia. Voronezh : Nauchnaia kniga, 2022. 254 pp.