

УДК 621.391.833.64

С. В. Поршнева

Уральский федеральный университет

им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (Екатеринбург)

Д. В. Кусайкин

Уральский технический институт связи и информатики (Екатеринбург)

Алгоритмы повышения точности восстановления дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке с неизвестными координатами узлов

Представлены результаты исследования алгоритмов восстановления дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке со случайным временным смещением отсчетов (джиттером). Получены оценки точности методов восстановления различных типов дискретных сигналов: линейного тренда, полиномиального тренда и периодического сигнала для равномерного и нормального законов распределения джиттера.

Неравномерная дискретизация, восстановление, интерполяция, аппроксимация, неизвестные временные позиции отсчетов

Изучение методов восстановления дискретных сигналов (ДС), значения которых заданы в узлах неравномерной временной сетки (НВС) (non-uniform sampling, irregular sampling), началось еще в середине прошлого века [1]. ДС данного типа используются, например в спутниковых системах связи, в которых причиной возникновения неравномерной дискретизации являются взаимные перемещения абонентских станций и ретранслятора; в АЦП и ЦАП вследствие вариации длительности синхронизирующих или тактовых импульсов [2]; в беспроводных широкополосных многоканальных системах передачи [3]; в беспроводных сенсорных сетях вследствие погрешности данных о расположении датчиков и т. д. Описание некоторых методов восстановления ограниченных по спектру ДС, заданных на НВС, можно найти в [4]–[6]. Анализ указанных работ показывает, что их авторы неявно предполагают, что временные позиции узлов НВС известны точно. При этом задача восстановления изучаемых ДС по своей постановке оказывается аналогичной классической задаче интерполяции, методы решения которой широко известны [7].

Значительно более сложной оказывается задача восстановления ДС в случае, когда положение неравномерных дискретных отсчетов на временной оси точно неизвестно, например вследствие джиттера. Данная задача формулируется следующим образом. Задано множество значений ДС:

$$x_i = f(t_i), \quad i = \overline{1, N},$$

где

$$t_i = iT + \tau_i, \quad t_i > t_{i-1}; \quad (1)$$

N – число отсчетов восстанавливаемого ДС, причем T – период дискретизации; $\tau_i \in (-T/2, T/2)$ – случайная величина, точные значения которой неизвестны.

Требуется вычислить значения ДС в узлах равномерной временной сетки (РВС):

$$\eta_{m_1} = m_1 T_1, \quad m_1 = \overline{1, M_1}, \quad (2)$$

где $t_1 \leq \eta_1 \leq t_2$; $T_1 < T$ – период дискретизации; M_1 – количество узлов РВС.

В описанной постановке задача восстановления значений ДС оказывается принципиально отличной от задачи восстановления сигнала в промежуточных точках по таблице значений t_i , $x(t_i)$, $i = \overline{1, N}$, когда значения t_i известны точно. Вторая задача вне зависимости от вида временной сетки (равномерной или неравномерной) относится к задаче интерполяции. Однако разработанные ранее методы интерполяции при их использовании для восстановления сигналов, дискретизированных на НВС с неизвестными точно координатами узлов, окажутся неработоспособными.

В настоящее время существует ряд методов восстановления ДС, заданного в узлах с точно неизвестными координатами [8], [9]. Результаты их анализа позволяют сделать вывод о том, что

первый шаг решения задачи восстановления изучаемого ДС состоит в определении точных значений координат всех узлов временной сетки, в узлах которой заданы значения ДС. Для этого по тому или иному критерию ищется решение некоторой задачи глобальной оптимизации. Однако оптимизационные методы малоприспособны для восстановления реальных сигналов, поскольку в условиях, когда на практике выборка ДС может составлять тысячи отсчетов, оптимизационная задача имеет большую вычислительную сложность¹. В результате разработка методов восстановления ДС, заданных в узлах временной сетки с точно неизвестными координатами узлов, свободных от указанного недостатка, оказывается актуальной.

В настоящей статье обсуждены результаты сравнительного анализа алгоритмов восстановления ДС, заданного на неравномерной сетке с джиттером.

Алгоритмы восстановления дискретного сигнала, значения которого заданы на неравномерной временной сетке с неизвестными точно координатами узлов. Подходы к решению рассматриваемой задачи зависят от наличия априорной информации о параметрах джиттера. При этом следует различать два случая:

1. Известен закон распределения случайной величины (ЗРСВ) τ_i и границы ее области рассеяния $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$.

2. Неизвестен ЗРСВ τ_i , но известны границы ее области рассеяния.

Для первого случая один из возможных подходов к решению задачи восстановления сигнала по его дискретным значениям, заданным в узлах НВС (1), предложен в [10]. В указанном алгоритме вместо НВС (1) значения ДС ставятся в соответствие временной сетке:

$$\langle \xi \rangle_j = iT + \langle \delta \rangle_j, \quad i = \overline{1, N}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (3)$$

где $\delta = \{\delta_i\}$ – N -мерные векторы, элементы которых – случайные числа, выбираемые случайным образом из генеральной совокупности с заданным ЗРСВ; J – число независимых реализаций ансамблей N -мерных векторов; $\langle \cdot \rangle$ – символ усреднения по ансамблю реализаций. Далее с помощью тех или иных методов интерполяции в узлах РВС (2) вычисляются значения ДС $\tilde{x}_{m_1, j}$, а искомое

значение сигнала x_{m_1} определяется как среднее по ансамблю независимых реализаций:

$$x_{m_1} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \tilde{x}_{m_1, j}, \quad m_1 = \overline{1, M_1}, \quad j = \overline{1, J},$$

В проведенном авторами исследовании были изучены точностные характеристики описанных далее алгоритмов восстановления ДС, значения которого известны в узлах НВС.

Входными данными алгоритмов являлись:

– x_i – множество значений входного ДС в узлах НВС (1), $i = \overline{1, N}$; T – период дискретизации отсчетов НВС (1);

– параметры восстановленного ДС, которые выбирались, исходя из требований решаемой задачи: T_1 – период дискретизации РВС η_{m_1} (2);

M_1 – количество узлов РВС η_{m_1} (2).

Выходными данными алгоритмов являлись восстановленные в узлах РВС η_{m_1} значения ДС u_{m_1} .

Алгоритм восстановления 1. Алгоритм основан на отнесении значений ДС x_i , заданного в узлах НВС (1), к узлам РВС iT , $i = \overline{1, N}$, и в вычислении далее с помощью того или иного метода интерполяции (например, линейной) значений ДС в узлах временной сетки (3). Такой подход наиболее очевиден при решении задачи восстановления сигнала, заданного на НВС с неизвестными значениями координат.

Данный алгоритм реализуется нижеприведенной последовательностью действий.

1. Задание РВС (2).

2. Восстановление с помощью того или иного метода интерполяции (например, линейной) значений ДС в узлах РВС (2) на основе табличных значений сигнала $[iT, x_i]$.

Алгоритм восстановления 2. Алгоритм (рис. 1) основан на вычислении координат узлов НВС (1) с помощью аппроксимации сигнала по методу наименьших квадратов (МНК).

Алгоритм реализуется нижеприведенной последовательностью действий (см. рис. 1).

1. Задание РВС (2) (блок 1).

2. Инициализация массива $v_i = iT$, $i = \overline{1, N}$ (блок 2).

3. Инициализация счетчика цикла итерационной процедуры алгоритма (блок 3) $l = \overline{1, L}$ (L – число итераций, задается из условий конкретной задачи). На каждом шаге итерации используются обновленные значения v_i , которые с каждой сле-

¹ Более подробный критический анализ данных методов восстановления ДС является предметом отдельной публикации.

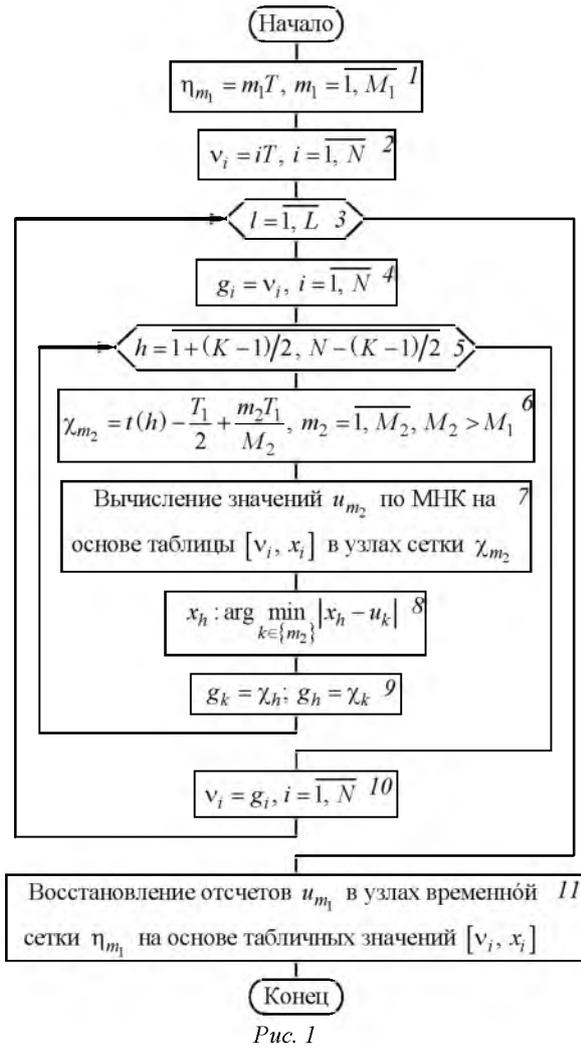


Рис. 1

дующей итерацией приближаются к истинным значениям координат ДС. В итерационном цикле выполняются следующие процедуры.

3а. Создание массива $g_i, i = \overline{1, N}$, для хранения уточненных значений узлов новой НВС (блок 4).

3б. Инициализация вложенного цикла последовательных сдвигов локальной области аппроксимации в смысле МНК по K точкам на основе таблицы значений $[v_i, x_i]$ (блок 5). Тело цикла выполняется $N - K$ раз.

3в. Создание локальной РВС на интервале $[t_h - T_1/2; t_h + T_1/2]$ (блок 6):

$$\chi_{m_2} = v_h - \frac{T_1}{2} + \frac{m_2 T_1}{M_2}, m_2 = \overline{1, M_2}. \quad (4)$$

3г. Вычисление значений аппроксимирующего в соответствии с МНК полинома u_{m_2} , построенного по K точкам на основе табличных значений $[v_i, x_i], i = \overline{1, N}$, в узлах локальной РВС χ_{m_2} (4) (блок 7).

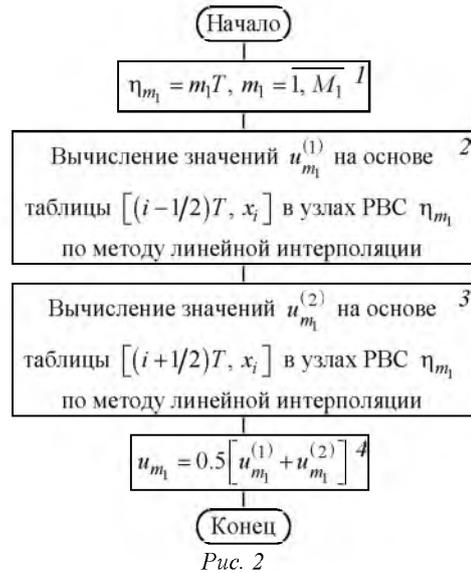


Рис. 2

3е. Нахождение значения полинома u_k , наиболее близкого к отсчету ДС на интервале аппроксимации, абсцисса которого принимается за новое значение временной сетки v_i (блок 8) и заносится в массив $g: g_h = \chi_k$ (блок 9).

4. Формирование новой временной сетки $v_i = g_i$, (блок 10), в узлах которой в следующем цикле итерации вычисляются значения u_{m_2} .

5. Восстановление с помощью интерполяции (например, линейной) значений дискретного сигнала u_{m_1} в узлах РВС η_{m_1} (2) на основе таблицы $[v_i, x_i]$ (блок 11).

Алгоритм восстановления 3. Алгоритм (рис. 2) фиксирует значения ДС в моменты $iT - T/2$ и $iT + T/2, i = \overline{1, N}$, и формирует отсчеты ДС в узлах РВС η_{m_1} (2) усреднением соседних значений.

Алгоритмы оценки точности восстановления дискретного сигнала. Для оценки точности восстановления исходного сигнала использовалось отношение мощности сигнала к мощности ошибки восстановления:

$$\psi = 10 \log \frac{\sum_{m_1=1}^{M_1} s_{m_1}^2}{\sum_{m_1=1}^{M_1} (s_{m_1} - u_{m_1})^2}, \quad (5)$$

где s_{m_1} – значения исходного сигнала, вычисленные в узлах РВС η_{m_1} (2); u_{m_1} – восстановленный сигнал в узлах РВС η_{m_1} (2).



Рис. 3

В связи с тем, что τ_i (1) является случайной величиной, для повышения достоверности оценок точности восстановления сигналов в соответствии с описанными ранее алгоритмами применялся метод Монте-Карло, реализованный алгоритмом (рис. 3), включающим следующие операции:

- задание отсчетов ДС $s_{m_1} = f(m_1 T)$ в узлах РВС η_{m_1} (2) (блок 1);
- инициализация счетчика циклов шагов метода Монте-Карло: $j = \overline{1, N}$, где N – число статистических испытаний (блок 2);
- вычисление значений восстановленного сигнала u_{j, m_1} по тестируемому алгоритму восстановления ДС (блок 3);
- определение погрешности восстановления сигнала на j -м шаге метода Монте-Карло ψ_j (5) (блок 4);
- вычисление усредненной по ансамблю реализаций погрешности $\bar{\psi}$ восстановления ДС, заданного в узлах РВС η_{m_1} (2) (блок 5).

Теоретическое обоснование эффективности алгоритмов. Проведем теоретическое обоснование рассмотренных ранее алгоритмов восстановления дискретного сигнала на примере восстановления линейного тренда.

Алгоритм восстановления 1 основан на непосредственном восстановлении сигнала по таблице $[iT, x_i]$. Определим погрешность данного алго-

ритма при восстановлении линейного тренда. Если точные значения координат узлов сетки неизвестны, необходимо соотнести значения сигнала x_i с узлами РВС. Данный сигнал без джиттера определяется формулой

$$\tilde{x}_i = \tilde{a}iT + \tilde{b}, \quad i = 1, 2, \dots,$$

где \tilde{x}_i – значения ДС, вычисленные в узлах временной сетки iT без джиттера;

$$\tilde{a} = (\tilde{x}_{i+1} - \tilde{x}_i)/T;$$

$$\tilde{b} = \tilde{x}_{i+1} - [(\tilde{x}_{i+1} - \tilde{x}_i)/T](i+1)T = \tilde{x}_i(i+1) - i\tilde{x}_{i+1}$$

– коэффициенты линейного тренда.

Тогда интерполированное значение в точке iT определяется через значение в этой точке интерполирующей прямой, построенной по значениям

$$iT, \quad x_i = \tilde{a}(iT + \tau_i) + \tilde{b}$$

и

$$(i+1)T, \quad x_{i+1} = \tilde{a}[(i+1)T + \tau_{i+1}] + \tilde{b}:$$

$$\begin{aligned} \tilde{u}_1 &= [\tilde{a} + \tilde{a}(\tau_{i+1} - \tau_i)/T]iT + \\ &+ \tilde{b} + \tilde{a}(i+1)\tau_i - \tilde{a}i\tau_{i+1} = \\ &= \tilde{a}iT + \tilde{b} + \tilde{a}(\tau_{i+1} - \tau_i)i + \\ &+ \tilde{a}(i+1)\tau_i - \tilde{a}i\tau_{i+1} = \tilde{x}_i + \tilde{a}\tau_i. \end{aligned}$$

Алгоритм оценки точности восстановления сигнала предполагает использование на каждом из отрезков $[iT, (i+1)T]$ значений коэффициентов прямой, усредненных по ансамблю реализаций:

$$\langle \tilde{u}_1 \rangle = E\langle \tilde{x}_i + \tilde{a}_i\tau_i \rangle = \tilde{x}_i + E\langle \tilde{a}_i\tau_i \rangle,$$

где $E\langle \cdot \rangle$ – оператор математического ожидания.

Отсюда следует, что интерполированное значение определяется суммой истинного значения \tilde{x}_i и погрешностью $E\langle \tilde{a}_i\tau_i \rangle$. Этот алгоритм восстановления сигнала с неизвестными значениями координат узлов является тривиальным и не устраняет ошибки, обусловленные джиттером. Поэтому следует ожидать, что он будет иметь невысокую точность по сравнению с другими алгоритмами.

Алгоритм восстановления сигнала 2 основан на вычислении значений координат узлов \tilde{t}_i неравномерно дискретизированного сигнала локальной аппроксимацией по МНК. Интерполяция в данном случае осуществляется по таблице $[\tilde{t}_i; x_i]$. Погрешность этого алгоритма зависит от того, насколько значения сформированной вре-

менной сетки \tilde{t}_i близки к значениям t_i (1). Если точные значения координат узлов временной сетки неизвестны, восстановление сигнала производится по таблице $[iT, x_i]$. Однако можно считать, что экспериментальные данные получены со значительной погрешностью. Поэтому применение аппроксимации должно повысить точность данных.

Алгоритм восстановления сигнала 3 основан на вычислении значений сигнала в точках $iT + \Delta$ и $iT - \Delta$. В качестве Δ принято значение $T/2$. Отсчет сигнала в точке iT определяется как значение в этой точке интерполирующей прямой: $0.5[u_{m_1}^{(1)} + u_{m_1}^{(2)}]$ (см. рис. 2, блок 4). В случае, когда случайные величины τ_i и τ_{i+1} имеют положительный знак, а величина τ_{i-1} имеет отрицательный знак, интерполированное значение в точке iT определяется как

$$u_{m_1} = 0.5 \left[u_{m_1}^{(1)} + u_{m_1}^{(2)} \right] = \tilde{x}_i + \tilde{a}\tau_i/2 + \tilde{a}\tau_{i+1}/4 - \tilde{a}\tau_{i-1}/4,$$

т. е. является суммой истинного значения \tilde{x}_i и погрешности $\tilde{a}\tau_i/2 + \tilde{a}\tau_{i+1}/4 - \tilde{a}\tau_{i-1}/4$.

Алгоритм оценки погрешности восстановления сигнала 3 предполагает использование на каждом из отрезков $[iT, (i+1)T]$ значений коэффициентов прямой, усредненных по ансамблю реализаций:

$$\begin{aligned} \langle u_{m_1} \rangle &= E \langle \tilde{x}_i + \tilde{a}_i\tau_i/2 + \tilde{a}_i\tau_{i+1}/4 - \tilde{a}_i\tau_{i-1}/4 \rangle = \\ &= \tilde{x}_i + E \langle \tilde{a}_i\tau_i \rangle / 2 + (E \langle \tilde{a}_i\tau_{i+1} \rangle - E \langle \tilde{a}_i\tau_{i-1} \rangle) / 4 = \\ &= \tilde{x}_i + E \langle \tilde{a}_i\tau_i \rangle / 2. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что погрешность алгоритма 3 в два раза меньше, чем алгоритма 1. В случае если все три случайные величины τ_{i-1} , τ_i и τ_{i+1} имеют одинаковые знаки, погрешность алгоритма 3 будет такой же, как и у алгоритма 1.

Таким образом, точность восстановления дискретного сигнала, заданного на неравномерной временной сетке с неизвестными значениями координат узлов, в соответствии с алгоритмами 2 и 3 оказывается выше по сравнению с восстановлением сигнала в соответствии с алгоритмом 1.

Анализ точности восстановления сигналов, дискретизированных в узлах неравномерной временной сетки с неизвестными значениями координат узлов. В вычислительных экспериментах в качестве τ_i использовались случайные чис-

ла, генерируемые в соответствии с равномерным законом распределения и областью рассеяния случайной величины $[-0.5, 0.5]$, а также случайные числа, генерируемые в соответствии с нормальным законом распределения $N[0, 1/(3\sqrt{12})]$. Количество шагов метода Монте-Карло составляло 500; $M_1 = 800$. Для восстановления ДС применялся метод линейной интерполяции.

Для гармонического сигнала в качестве τ_i использовались случайные числа, генерируемые в соответствии с равномерным законом распределения и областью рассеяния случайной величины $[-0.01, 0.01]$, а также случайные числа, генерируемые в соответствии с нормальным законом распределения с $N[0, 0.02/(3\sqrt{12})]$. Количество шагов метода Монте-Карло равнялось 100, $M_1 = 800$. Число отсчетов исходного сигнала 100, безразмерная частота сигнала $\hat{f} = 0.1$.

Анализ точности восстановления линейного тренда. В табл. 1 представлены статистические параметры (среднее значение μ , среднеквадратическое отклонение σ) отношения мощности сигнала к мощности ошибки восстановления ψ (5) для восстановления линейного тренда $x(t) = 0.1t$, заданного в узлах НВС. При реализации алгоритма восстановления 2 использован полином первой степени, размер области локальной аппроксимации пять точек, $L = 10$.

Таблица 1

Алгоритм восстановления	ЗРСВ τ_i			
	равномерный		нормальный	
	μ	σ	μ	σ
1	28.3	1.7	38.2	2.1
2	34.9	5.1	44.7	4.6
3	30.7	2.5	38.3	2.1

Из табл. 1 видно, что вне зависимости от ЗРСВ τ_i наибольшую точность восстановления (среднее значение μ) имеет алгоритм 2. Точность восстановления линейного тренда при нормальном ЗРСВ τ_i выше, чем при равномерном. Полученный результат объясняется тем, что в эксперименте среднеквадратическое отклонение нормального закона распределения σ_δ случайной величины δ выбиралось из условия $3\sigma = \Delta/\sqrt{12}$, где Δ – размер области рассеяния случайной величины δ с равномерным законом распределения. При этом область рассеяния случайной величины δ , в котором уклады-

Таблица 2

Алгоритм восстановления	ЗРСВ τ_i			
	равномерный		нормальный	
	μ	σ	μ	σ
1	21.8	2.5	31.9	3.2
2	27.6	4.7	36.9	4.3
3	23.9	3.4	31.9	3.1

вается 97.4 % всех случайных чисел (эффективный размер джиттера) составляет $2\sigma_\delta = \Delta 3\sqrt{3}$. При равномерном ЗРСВ δ эффективный размер джиттера равен Δ , т. е. в $3\sqrt{3}$ раза больше, чем при нормальном законе распределения.

Анализ точности восстановления полиномиального тренда. Рассмотрим результаты восстановления полиномиального тренда

$$x(t) = 3t^3 + 2t^2 + t + 0.5,$$

значения которого были вычислены в узлах дискретной временной сетки $t_i = i + \tau_i$, $i = \overline{1, 10}$ (табл. 2).

При реализации алгоритма 2 использован полином третьей степени, размер локальной области аппроксимации составил семь точек (что определялось типом сигнала). Количество итераций $L = 10$.

Так же, как и в предыдущем эксперименте, оказалось, что наибольшую точность восстановления (среднее значение μ) вне зависимости от ЗРСВ τ_i имеет алгоритм 2. Точность восстановления полиномиального тренда при нормальном ЗРСВ τ_i оказывается выше точности при равномерном ЗРСВ.

Анализ точности восстановления периодического сигнала. Рассмотрим результаты исследования точности восстановления периодического сигнала вида

$$x(t) = 2 \sin(2\pi f_c t) + 1.2 \cos(2\pi 0.5 f_c t). \quad (6)$$

В проведенных вычислительных экспериментах были использованы значения дискретного сигнала, вычисленные в узлах временной сетки:

$$t_i = iT + \tau_i, \quad i = \overline{1, 100},$$

где $\tau_i \in [-\Delta/2, \Delta/2]$; $\Delta < T$ – размах джиттера.

Таблица 3

Алгоритм восстановления	ЗРСВ τ_i			
	равномерный		нормальный	
	μ	σ	μ	σ
1	25.0	0.4	34.2	0.9
2	29.0	1.0	37.1	1.0
3	27.1	0.8	35.0	0.7

Значения периодического сигнала (6) на указанной сетке определялись следующим образом:

$$x(t_i) = 2 \sin[2\pi \hat{f}(i + \tau_i/T)] + 1.2 \cos[\pi \hat{f}(i + \tau_i/T)],$$

где $\hat{f} = f_c T$ – безразмерная частота дискретизации. Вариация безразмерной частоты, вызванная случайной величиной τ_i , принималась равной $\Delta f_i \in [-0.5 \hat{f}; 0.5 \hat{f}]$.

Результаты моделирования приведены в табл. 3. При реализации алгоритма 2 использовался полином пятой степени, размер области локальной аппроксимации семь точек. Число итераций $L = 10$.

Из результатов экспериментов следует, что при равномерном и нормальном ЗРСВ τ_i наибольшую точность восстановления имеет алгоритм 2. Средние значения μ при нормальном ЗРСВ τ_i выше, чем при равномерном законе.

Таким образом, анализ результатов исследования на основе статистического моделирования алгоритмов восстановления дискретных сигналов, заданных на НВС, точные значения узлов которых неизвестны, показал, что точность восстановления линейного тренда, полиномиального тренда и периодического сигнала оказывается наиболее высокой при использовании алгоритма локальной аппроксимации 2. Главным условием эффективного применения указанного алгоритма является удачный выбор размера локальной области и степени полинома. Для повышения эффективности алгоритма целесообразно применение нескольких этапов аппроксимации с разными размерами локальной области и степенями полинома.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Unser M. Sampling – 50 years after Shannon // Proc. of the IEEE. 2000. Vol. 88, № 4. P. 569–587.
2. Divi V., Wornell G. Signal recovery in time-interleaved analog-to-digital converters // Proc. of IEEE int. conf. on acoustics, speech, and signal processing, 2004. (ICASSP '04). 17–21 May 2004, Montreal, Canada. Piscataway: IEEE, 2004. Vol. 2. P. 593–596.
3. Ahmad B. I. Applications of nonuniform sampling in wideband multi-channel communication systems: PhD thesis / Univ. of Westminster, school of electronics and computer science, 2011. 180 p. // URL: http://westminsterresearch.wmin.ac.uk/10085/1/Bashar_AHMAD.pdf
4. Tuncer T. E., Serdaroglu. B. Block-based methods for the reconstruction of finite-length signals from non-

uniform samples // IEEE Trans. on signal processing. 2007. Vol. SP-55, № 2. P. 530–541.

5. Senay S. Signal reconstruction from nonuniform samples using prolate spheroidal wave functions: theory and application. Doctoral dissertation / Pittsburgh. 2011. 117 p. // URL: http://d-scholarship.pitt.edu/6680/1/senay_PhD_Dissertation_april_2011.pdf

6. Selva J. Functionally weighted Lagrange interpolation of band-limited signals from nonuniform samples // IEEE Trans. on signal procg. 2009. Vol. SP-57, № 1. P. 168–181.

7. Половко А. М., Бутусов П. Н. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 320 с.

8. Marziliano P. Reconstruction of irregularly sampled discrete-time bandlimited signals with unknown sampling locations // IEEE Trans. on signal processing. 1999. Vol. 48, № 12. P. 3462–3471.

9. Browning J. A method of finding unknown continuous-time nonuniform sample locations of band-limited functions // Advanced signal processing algorithms, architectures and implementations 2004. Vol. XIV. P. 289–296.

10. Поршнеv С. В. Кусайкин Д. В. Исследование точности методов восстановления дискретных сигналов, заданных на неравномерной временной сетке // В мире научных открытий. 2013. Т. 46, № 10. С. 261–279.

S. V. Porshnev

Ural federal university n. a. the first President of Russia B. N. Yeltsin (Ekaterinburg)

D. V. Kusaykin

Ural technical institute of communication and computer science (Ekaterinburg)

Algorithms for the reconstruction of irregularly sampled discrete-time signals with unknown sampling locations

Results of research of algorithms of restoration of the discrete signals which have been set on uneven time grid with casual temporary shift of counting (jitter) are presented. Estimates of accuracy of methods of restoration of various types of discrete signals: linear trend, polynomial trend and periodic signal, for uniform and normal distribution laws of a jitter are received.

Irregular sampling, reconstruction, interpolation, approximation, unknown samples location

Статья поступила в редакцию 25 июля 2014 г.