

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТЫ СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА С ПЕРЕМЕННОЙ НЕИЗВЕСТНОЙ АМПЛИТУДОЙ

Нгуен Хак Тунг¹, Власов С. М.²

(Университет ИТМО, Санкт-Петербург,
Российская Федерация)

В работе рассматривается задача идентификации частоты синусоидального сигнала с неизвестной переменной амплитудой, которая является очень важной и актуальной. Ее решение может быть актуально в задачах управления динамическими объектами и других. Предложен метод улучшения качества оценивания частоты синусоидального сигнала и обеспечения экспоненциальной сходимости к нулю ошибок оценивания. Предлагаемый метод основан на форме Жордановой матрицы и оператора запаздывания. На первом этапе синусоидальный сигнал параметризуется с помощью оператора запаздывания и переменная амплитуда представлена как выходной сигнал линейного генератора конечной размерности. На втором этапе применены Жорданова форма матрицы для параметризации синусоидального сигнала. После ряда специальных преобразований получено простейшее уравнение, содержащее один зависящий от частоты неизвестный параметр, умноженный на известную функцию времени. Для поиска этого параметра использован DREM. Решение задачи основано на преобразовании модели сигнала к линейному регрессионному уравнению. Выполнен анализ возможностей предложенного метода оценивания с использованием компьютерного моделирования в среде MATLAB-Simulink.

Ключевые слова: синусоидальные сигналы, идентификация, переменная амплитуда, Жорданова форма матрицы, линейная регрессионная модель.

¹ Нгуен Хак Тунг, аспирант., (nguyenkhactunghvhq1994@gmail.com).

² Власов Сергей Михайлович, доцент, к.т.н., (smvlasov@itmo.ru).

1. Введение

В работе рассмотрена задача идентификации частоты синусоидального сигнала с неизвестной нестационарной амплитудой. Проблема идентификации частоты синусоидальных сигналов с постоянными параметрами изучена в работах [15,9,11,14,12,13,6,4] и переменными параметрами [1,5,3,2,16,17]. Задача идентификации частоты синусоидальных сигналов является очень важной и актуальной, решение которой может найти в большом количестве практических приложений — в системах динамического позиционирования и компенсации возмущений, системах виброзащиты, системах мониторинга при определении параметров высотных или большепролетных строительных сооружений [10].

В работе [1] представлен алгоритм оценивания нестационарной частоты незашумленного синусоидального сигнала. Предполагается, что амплитуда и частота синусоидального сигнала неизвестные функции времени, но являются решениями линейных стационарных дифференциальных уравнений с известными параметрами. В [3] предложен алгоритм идентификации линейно меняющейся частоты синусоидального сигнала, имеющего неизвестные амплитуду и фазу. Предложен подход к идентификации линейно меняющейся частоты, предусматривающий итеративную фильтрацию (с использованием линейных устойчивых звеньев первого порядка) измеряемого синусоидального сигнала, которая позволяет получить простую линейную регрессионную модель с одним неизвестным постоянным параметром.

В работе [2] рассмотрена задача оценивания параметров синусоидального сигнала, частота которого изменяется как полиномиальная функция времени. Для решения этой задачи предложена параметризация, позволяющая сформировать уравнения линейной регрессии относительно неизвестных параметров. Оценки формируются с использованием метода динамического расширения регрессора. В [16] предложен метод оценивания частоты синусоидального сигнала с переменной амплитудой. Амплитуда предполагается известной функцией в пределах постоянного множителя, фаза известна. На первом этапе предложен подход к параметризации синусоидального сигнала и получается модель линейной регрессии третьего порядка. На

следующем этапе строится алгоритм оценивания на основе стандартного градиентного подхода.

В настоящей работе рассмотрена задача идентификации частоты синусоидального сигнала с неизвестной переменной амплитудой и предложен новый подход к параметризации. Модель линейной регрессии пятого порядка строится с использованием операторов задержки. Предложим, что частота, и фаза синусоидального сигнала – постоянные и неизвестные параметры, а амплитуда – переменная и неизвестная функция, синтезируется алгоритм идентификации, который обеспечит сходимость настроенной оценки частоты к истинному значению.

2. Постановка задачи

Рассмотрим измеряемый сигнал

$$(1) \quad y(t) = A(t) \sin(\omega t + \varphi).$$

где $A(t)$ – неизвестная переменная амплитуда, $\omega \in \mathbb{R}$ – неизвестная постоянная частота и $\varphi \in \mathbb{R}$ – неизвестная постоянная фаза.

Требуется синтезировать алгоритм оценивания частоты $\hat{\omega}(t)$, обеспечивающей выполнение условия

$$(2) \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (\omega(t) - \hat{\omega}(t)) = 0.$$

Введем допущение.

Допущение: Функция $A(t)$ является выходом линейного генератора

$$(3) \quad A(t) = \mathbf{H}^T \boldsymbol{\xi}(t),$$

$$(4) \quad \dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = \mathbf{\Gamma} \boldsymbol{\xi}(t).$$

где $\boldsymbol{\xi} \in \mathbb{R}^q$ матрица состояния генератора с неизвестным начальным значением $\boldsymbol{\xi}(0)$, $\mathbf{\Gamma} \in \mathbb{R}^{q \times q}$ – матрица известных постоянных коэффициентов, $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^q$ – вектор соответствующей размерности.

Также будем допускать, что частота $A(t)$ изменяется по синусоидальному закону, тогда матрица $\mathbf{\Gamma}$ и вектор $\boldsymbol{\xi}(0)$ принимают вида

$$(5) \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\gamma^2 & 0 \end{bmatrix}, \boldsymbol{\xi}(0) = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}.$$

где γ – известный параметр, θ_1, θ_2 – неизвестные параметры

3. Параметризация синусоидального сигнала

Рассмотрим задачу построения модели линейной регрессии с измеряемыми переменными и вектором постоянных параметров, зависящих от неизвестной частоте ω .

Наряду с измеряемым сигналом $y(t)$ рассмотрим запаздывающие сигналы

$$(6) \quad y_1(t) = \begin{cases} y(t - d_1), & t \geq d_1, \\ 0, & t \leq d_1, \end{cases}$$

$$(7) \quad y_2(t) = \begin{cases} y(t - d_2), & t \geq d_2, \\ 0, & t \leq d_2, \end{cases}$$

где $d_1, d_2 \in \mathbb{R}_+$ - постоянные величины запаздывания.

Для сигналов (6) и (7) распишем косинус разности аргументов и перейдем к соотношениям:

$$(8) \quad y_1(t) = A_1(t)c_1 \sin(\omega t + \varphi) - A_1(t)s_1 \cos(\omega t + \varphi).$$

$$(9) \quad y_2(t) = A_2(t)c_2 \sin(\omega t + \varphi) - A_2(t)s_2 \cos(\omega t + \varphi).$$

где введены обозначения:

$$(10) \quad A_1(t) = A(t - d_1), c_1 = \cos(\omega d_1), s_1 = \sin(\omega d_1).$$

$$(11) \quad A_2(t) = A(t - d_2), c_2 = \cos(\omega d_2), s_2 = \sin(\omega d_2).$$

Утверждение 1: Измеряемые сигналы (1), (10) и (11) связаны тождеством:

$$(12) \quad \Psi(t) = \beta^T(t)\Theta,$$

где $\Psi(t) \in \mathbb{R}$, $\beta(t) \in \mathbb{R}^5$ - измеряемые функции, $\Theta \in \mathbb{R}^5$ - вектор неизвестный параметров.

Доказательство.

Вычтем из сигнала (1), домноженного на $A_1(t)c_1$, сигнал (10), умноженный на $A(t)$, и получим:

$$(13) \quad A_1(t)c_1 y(t) - A(t)y_1(t) = A(t)A_1(t)s_1 \cos(\omega t + \varphi).$$

Аналогично, вычтем из сигнала (1), домноженного на $A_2(t)c_2$, сигнал (11), умноженный на $A(t)$, и получим:

$$(14) \quad A_2(t)c_2 y(t) - A(t)y_2(t) = A(t)A_2(t)s_2 \cos(\omega t + \varphi).$$

Домножим выражения (12) и (13) соответственно на $A_2(t)s_2$ и $A_1(t)s_1$. Затем вычтем из первого уравнения второе и получим

$$(15) \quad \begin{aligned} A_2(t)s_2(A_1(t)c_1 y(t) - A(t)y_1(t)) &= \\ &= A_1(t)s_1(A_2(t)c_2 y(t) - A(t)y_2(t)). \end{aligned}$$

Для сокращения числа параметров примем $d_2 = 2d_1 = 2d$ и выразим параметры c_2, s_2 через c_1, s_1 , используя тригонометрические формулы для двойного угла:

$$(16) \quad c_2 = 2c_1^2 - 1, s_2 = 2c_1s_1.$$

Подставим введенную замену (16) в выражение (3) и перейдем к выражению

$$(17) \quad A_1(t)A_2(t)y(t) + A(t)A_1(t)y_2(t) = 2A(t)A_2(t)c_1y_1(t).$$

Из допущения 2 функции $A(t)$ может быть записан следующим образом

$$(18) \quad A(t) = h^T e^{\Gamma t} \xi(0).$$

Из выражения (18) получим функций $A_1(t), A_2(t)$ следующим образом

$$(19) \quad A_1(t) = A(t - d) = h^T e^{\Gamma t} e^{-\Gamma d} \xi(0).$$

$$(20) \quad A_2(t) = A(t - 2d) = h^T e^{\Gamma t} e^{-2\Gamma d} \xi(0).$$

Утверждение 2. Сигнал (17) связан соотношением:

$$A(t) = \cos(\gamma t) \theta_1 + \gamma^{-1} \sin(\gamma t) \theta_2.$$

Доказательство

Применим Жорданову форму матрицы для преобразователя $e^{-\Gamma t}$ уравнения (6).

Сначала вычислим собственные значения матрицы Γ

$$\det(\Gamma - \lambda \mathbf{I}) = \begin{vmatrix} 0 - \lambda & 1 \\ -\gamma^2 & 0 - \lambda \end{vmatrix} = 0, \Rightarrow \lambda^2 + \gamma^2 = 0, \\ \Rightarrow \lambda_1 = i\gamma, \lambda_2 = -i\gamma.$$

Для каждого из собственных значений λ_1, λ_2 найдем собственные векторы.

Для числа $\lambda_1 = i\gamma$, имеем

$$\begin{bmatrix} -i\gamma & 1 \\ -\gamma^2 & -i\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = 0, \Rightarrow \begin{cases} -i\gamma x_1 + y_1 = 0 \\ -\gamma^2 x_1 - i\gamma y_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow y_1 = i\gamma x_1.$$

Полагая $x_1 = 1$, получим собственный вектор $\mathbf{V}_1 = (x_1, y_1)^T$

$$x_1 = 1, \Rightarrow y_1 = i\omega, \Rightarrow \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ i\gamma \end{bmatrix}$$

Аналогично найдем вектор $\mathbf{V}_2 = (x_2, y_2)^T$: ассоциированный с собственным значением $\lambda_2 = -i\gamma$, получим

$$\begin{bmatrix} i\gamma & 1 \\ -\gamma^2 & i\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = 0, \Rightarrow \begin{cases} i\gamma x_2 + y_2 = 0 \\ -\gamma^2 x_2 + i\gamma y_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow y_2 = -i\gamma x_2.$$

Полагая $x_2 = 1$, получим собственный вектор $\mathbf{V}_2 = (x_2, y_2)^T$
 $x_2 = 1, \Rightarrow y_2 = i\omega, \Rightarrow \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ -i\gamma \end{bmatrix}$.

Составим матрицу \mathbf{V} из найденных собственных векторов \mathbf{V}_1 и \mathbf{V}_2 в виде:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ i\gamma & -i\gamma \end{bmatrix}.$$

Запишем Жорданову форму \mathbf{J}_Γ для заданной матрицы Γ , используя форму

$$\mathbf{J}_\Gamma = \mathbf{V}^{-1}\Gamma\mathbf{V} = \frac{1}{-2i\gamma} \begin{bmatrix} -i\gamma & -1 \\ -i\gamma & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\gamma^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ i\gamma & -i\gamma \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_\Gamma = \frac{1}{-2i\gamma} \begin{bmatrix} \gamma^2 & -i\gamma \\ -\gamma^2 & -i\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ i\gamma & -i\gamma \end{bmatrix} = \frac{1}{-2i\gamma} \begin{bmatrix} 2\gamma^2 & 0 \\ 0 & -2\gamma^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_\Gamma = \begin{bmatrix} -\frac{\gamma}{i} & 0 \\ 0 & \frac{\gamma}{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i\gamma & 0 \\ 0 & -i\gamma \end{bmatrix}.$$

Составим матрицу $e^{\mathbf{J}_\Gamma t}$ в виде [7]

$$e^{\mathbf{J}_\Gamma t} = \begin{bmatrix} e^{i\gamma t} & 0 \\ 0 & e^{-i\gamma t} \end{bmatrix}.$$

Вычислим матричную экспоненту $e^{\Gamma t}$ по формуле:

$$e^{\Gamma t} = \mathbf{V}e^{\mathbf{J}_\Gamma t}\mathbf{V}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ it & -it \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\gamma t} & 0 \\ 0 & e^{-i\gamma t} \end{bmatrix} \frac{1}{-2i\gamma} \begin{bmatrix} -i\gamma & -1 \\ -i\gamma & 1 \end{bmatrix},$$

$$e^{\Gamma t} = \frac{1}{-2i\gamma} \begin{bmatrix} e^{i\gamma t} & e^{-i\gamma t} \\ i\gamma e^{i\gamma t} & -i\gamma e^{-i\gamma t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i\gamma & -1 \\ -i\gamma & 1 \end{bmatrix},$$

$$e^{\Gamma t} = \begin{bmatrix} \frac{e^{i\gamma t} + e^{-i\gamma t}}{2} & \gamma^{-1} \frac{e^{i\gamma t} - e^{-i\gamma t}}{2i} \\ -\gamma^{-1} \frac{e^{i\gamma t} - e^{-i\gamma t}}{2i} & \frac{e^{i\gamma t} + e^{-i\gamma t}}{2} \end{bmatrix},$$

Разложим экспоненциальные функции $e^{i\gamma t}, e^{-i\gamma t}$ по формулам Эйлера:

$$\frac{e^{i\gamma t} + e^{-i\gamma t}}{2} = \cos \gamma t, \quad \frac{e^{i\gamma t} - e^{-i\gamma t}}{2i} = \sin \gamma t.$$

Получаем соотношения:

$$(21) \quad e^{\Gamma t} = \begin{bmatrix} \cos \gamma t & \gamma^{-1} \sin \gamma t \\ -\gamma \sin \gamma t & \cos \gamma t \end{bmatrix}.$$

Поставляя соотношения (21) в (18), получим

$$(22) \quad A(t) = \cos(\gamma t) \theta_1 + \gamma^{-1} \sin(\gamma t) \theta_2.$$

что и требовалось доказать утверждения 2.

Аналогично найдем $e^{-\Gamma d}$, $e^{-2\Gamma d}$ следующим образом

$$(23) \quad e^{-\Gamma d} = \begin{bmatrix} \cos \gamma d & -\gamma^{-1} \sin \gamma d \\ \gamma \sin \gamma d & \cos \gamma d \end{bmatrix}.$$

$$(24) \quad e^{-2\Gamma d} = \begin{bmatrix} \cos 2\gamma d & -\gamma^{-1} \sin 2\gamma d \\ \gamma \sin 2\gamma d & \cos 2\gamma d \end{bmatrix}.$$

Поставляя (18) и (23) в уравнении (19), получим

$$(25) \quad A_1(t) = (\theta_1 \cos(\gamma t - \gamma d) + \gamma^{-1} \theta_2 \sin(\gamma t - \gamma d)).$$

Поставляя (17) и (23) в уравнении (19), получим

$$(26) \quad A_2(t) = (\theta_1 \cos(\gamma t - 2\gamma d) + \gamma^{-1} \theta_2 \sin(\gamma t - 2\gamma d)).$$

С учетом выражений (22), (25), (26), запишем уравнение (17) в виде

$$(27) \quad (a_1 \gamma^{-1} \theta_2 + a_2 \theta_1)(a_3 \gamma^{-1} \theta_2 + a_2 \theta_1) y_2 + (a_3 \gamma^{-1} \theta_2 + a_4 \theta_1)(a_5 \gamma^{-1} \theta_2 + a_6 \theta_1) y = (a_1 \gamma^{-1} \theta_2 + a_2 \theta_1)(a_5 \gamma^{-1} \theta_2 + a_6 \theta_1) 2c_1 y_1.$$

где $a_1 = \sin(\gamma t)$, $a_2 = \cos(\gamma t)$, $a_3 = \sin(\gamma t - \gamma d)$, $a_4 = \cos(\gamma t - \gamma d)$, $a_5 = \sin(\gamma t - 2\gamma d)$, $a_6 = \cos(\gamma t - 2\gamma d)$.

Выражение (27) может быть представлено в виде линейной регрессионной модели (12):

$$(28) \quad \Psi(t) = \beta^T(t) \Theta.$$

где $\Psi(t) = (a_2 a_4 y_2 + a_4 a_6 y)$ — измеряемая функция, $\beta^T(t) =$

$$\begin{bmatrix} -(a_1 a_4 + a_2 a_3) \gamma^{-1} y_2 - (a_3 a_6 + a_4 a_5) \gamma^{-1} y \\ -a_1 a_3 \gamma^{-2} y_2 - a_3 a_5 \gamma^{-2} y \\ 2a_2 a_6 y_1 \\ 2(a_1 a_6 + a_2 a_5) \gamma^{-1} y_1 \\ 2a_1 a_5 \gamma^{-2} y_1 \end{bmatrix} \text{— регрессор,} \quad \Theta =$$

$$\begin{bmatrix} \theta_2 \\ \theta_1 \\ \frac{\theta_2^2}{\theta_1^2} \\ c_1 \\ \frac{\theta_2}{\theta_1} c_1 \\ \frac{\theta_2^2}{\theta_1^2} c_1 \end{bmatrix} \text{—вектор неизвестных параметров}$$

4. Алгоритм оценивания параметров регрессионной модели

Для оценивания параметров вектора Θ модели (27) используется метод динамического расширения регрессора (DREM) [8].

Применим блок запаздывания $v_i, i = \overline{1, q-1}$ для известных элементов регрессионной модели (27):

$$\Psi(t - v_i) = \beta^T(t - v_i) \Theta.$$

Обозначим

$$(28) \quad \begin{aligned} \vartheta_e &= \eta_e \Theta, \\ \text{где } \vartheta_e &= [\Psi(t) \quad \Psi(t - v_1) \quad \dots \quad \Psi(t - v_i)]^T, \\ \eta_e &= [\beta_i^T(t) \quad \beta_i^T(t - v_1) \quad \dots \quad \beta_i^T(t - v_i)]. \end{aligned}$$

Умножив (28) на $\text{adj}(\eta_e(t))$, получим

$$(29) \quad \vartheta(t) = \Delta(t) \Theta,$$

где $\Delta(t) = \det(\eta_e(t)) \in \mathbb{R}^1, \vartheta(t) = \text{adj}(\eta_e) \vartheta_e(t) \in \mathbb{R}^q$.

Запишем уравнение (29) покомпонентно:

$$\vartheta_i(t) = \Delta(t) \theta_i, i = \overline{1, q}.$$

Представим алгоритм оценивания параметров ϖ_i в виде:

$$\widehat{\theta}_i(t) = -\kappa_i \Delta(t) (\vartheta_i(t) - \Delta(t) \widehat{\theta}_i),$$

где κ_i – настраиваемый параметр, $i = \overline{1, q}$.

5. Алгоритм идентификации частоты

Для оценивания частоты воспользуемся функцией $\arccos(\cdot)$ на основе параметра θ_3 из (27)

$$\widehat{\omega}(t) = \frac{1}{d} \arccos(\widehat{\theta}_3(t)).$$

6. Математическое моделирование

Рассмотрим результаты численного моделирования, иллюстрирующие эффективность предложенного алгоритма

оценивания частоты несмещенного гармонического сигнала с постоянными параметрами. Моделирование выполнено с использованием программной среды MATLAB Simulink.

В качестве примера рассмотрим сигнал вида

$$(30) \quad y(t) = A(t)\sin(3t - 1).$$

Для функции $A(t)$ принимаются следующие параметры

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -4 & 0 \end{bmatrix}, \xi(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Приведем значения параметров для предложенного метода: $d = 1, v_1 = 0.5, v_2 = 0.6, v_3 = 0.7, v_4 = 0.8, \kappa_i = 10^9$.

На *Рис. 1* показаны результаты оценивания частоты ω сигнала (31).

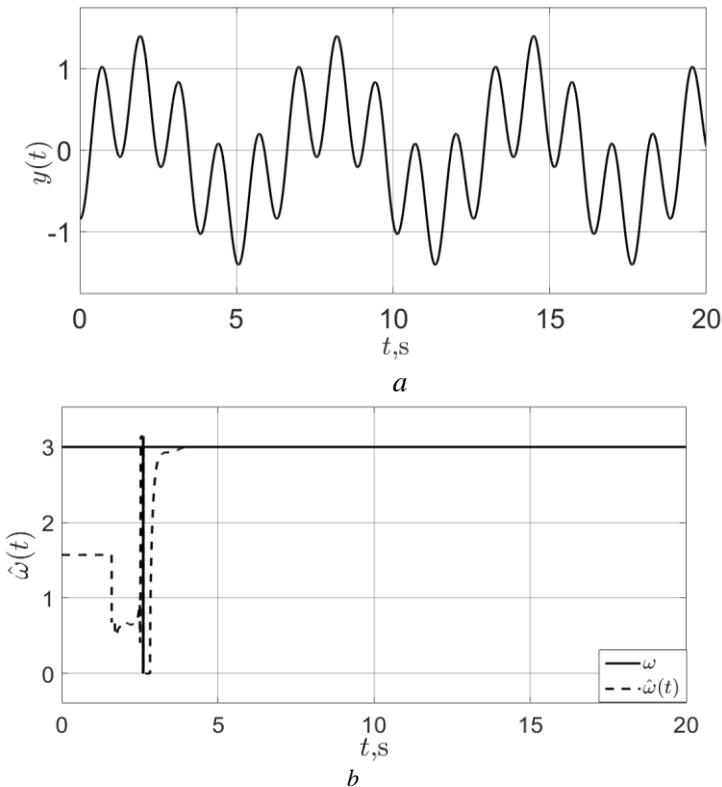


Рис. 1. Синусоидальный сигнал $y(t)$ (a); график оценки частоты $\hat{\omega}(t)$ при $\omega = 3$ (b)

Чтобы продемонстрировать робастность предложенного алгоритма, рассмотрим зашумленный измеренный сигнал

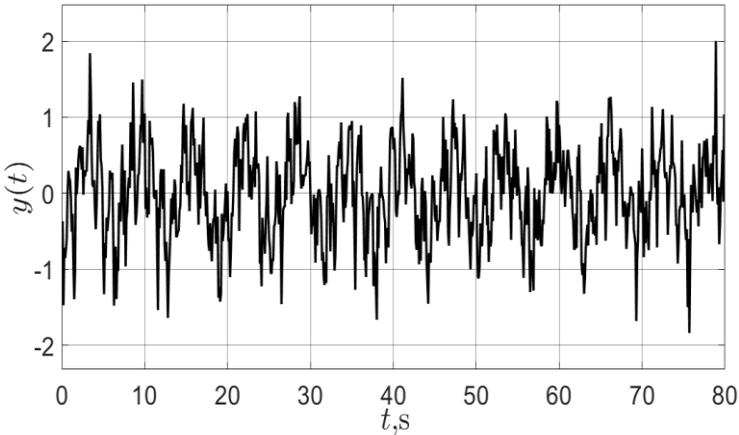
$$y(t) = A(t) \sin(2t - 2) + \delta(t).$$

где $\delta(t)$ – аддитивный шум, который моделируется как равномерно распределенный процесс в пределах $[-0,01 \ 0,01]$ влияние которого показано кривой на рис. 2, *a*.

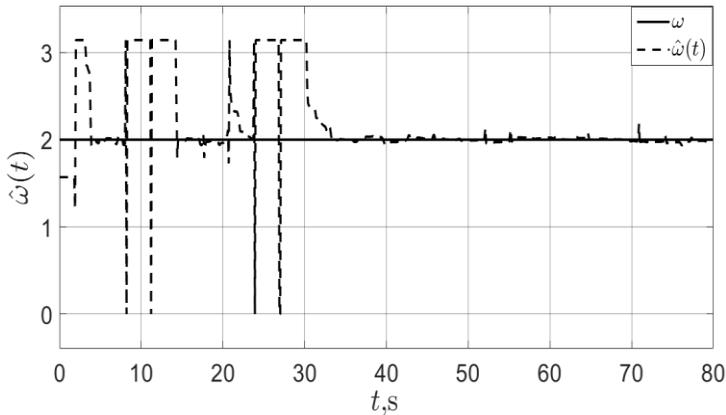
Для функции $A(t)$ принимаются следующие параметры

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9 & 0 \end{bmatrix}, \xi(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Результат моделирования оценки шумового сценария исследования метода DREM с параметрами $d = 1$, $v_1 = 0.5$, $v_2 = 0.6$, $v_3 = 0.7$, $v_4 = 0.8$, $\kappa_i = 10^9$ при частоте $\omega = 2$ показан на рис.2, *b*.



a



b

Рис. 2. Синусоидальный сигнал $y(t)$ с аддитивным шумом (a);
график оценки частоты $\hat{\omega}(t)$ при $\omega = 2$ (b)

На Рис. 1, 2 изображены результаты оценивания частоты ω . Как видно из графиков, предложенный алгоритм оценивания обеспечивает экспоненциальную сходимость к истинным значениям оценивания частоты сигнала $y(t)$.

7. Заключение

В работе предложен алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала с переменной неизвестной амплитудой. Предложен новый подход для параметризации синусоидального сигнала. Выполнена оценка вектора параметров регрессионных моделей с использованием метода DREM. Результаты моделирования подтверждают сходимость ошибок оценивания частоты к истинным значениям. В дальнейшем планируется расширить область применения алгоритма на случай переменных частот и фаз.

Литература

1. БОБЦОВ А.А., НИКОЛАЕВ Н.А., ОСЬИНКА О.В., НИЗОВЦЕВ С.И. *Идентификация нестационарного параметра незашумленного синусоидального сигнала* // Автоматика и телемеханика -2022. - № 7. - С. 137–151.
2. КОРОТИНА М. М., АРАНОВСКИЙ С. В., БОБЦОВ А. А.

- Оценивание параметров синусоидального сигнала со степенной функцией частоты // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 6. С. 507—514.*
3. ЛЕ ВАН ТУАН, КОРОТИНА М.М., БОБЦОВ А.А., АРАНОВСКИЙ С.В. *Алгоритм идентификации линейно меняющейся частоты синусоидального сигнала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 1. С. 52—58. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-1-52-58.*
 4. НГУЕН Х.Т., ВЛАСОВ С. М., ПЫРКИН А.А., ПОПКОВ И.В. *Новый алгоритм идентификации частоты синусоидального сигнала с постоянными параметрами // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 1. С. 18—24. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-18-24.*
 5. НИЗОВЦЕВ С. И., ШАВЕТОВ С.В., ПЫРКИН А.А. *Алгоритм оценивания переменной частоты синусоидального сигнала // Известия высших учебных заведений. Приборостроение - 2021. - Т. 64. - № 9. - С. 789—793.*
 6. СЕВАСТАЕЕВ Е. С., ЧЕРНОВ В. А., БОБЦОВ А. А. *Алгоритм увеличения скорости идентификации частоты синусоидального сигнала // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 767—771.*
 7. AMJAD M. J. UMARI, STEVEN M. GORELICK. *Evaluation of the matrix exponential for in ground-water-flow and solute-transport simulation: theoretical framework. U.S. Geological Survey, 1986. DOI 10.3133/wri864096, pp.12.*
 8. ARANOVSKIY S., BOBTSOV A., ORTEGA R., PYRKIN A. *Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62, N 7. P. 3546—3550.*
 9. ARANOVSKIY S., BOBTSOV A., ORTEGA R., PYRKIN A. *Improved transients in multiple frequencies estimation via dynamic regressor extension and mixing // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49 (13). P. 99—104, doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.934.*
 10. BESANCO G. *Nonlinear observers and applications // Berlin, Springer, 2007, vol. 363, 224 p.*
 11. BOBTSOV A., LYAMIN A., ROMASHEVA D. *Algorithm of parameter's identification of polyharmonic function // IFAC Proc.*

2002. Vol. 35 (1). 439—443, DOI:10.3182/20020721-6-ES-1901.01059.
12. BODSON M., DOUGLAS S. C. *Adaptive algorithms for the rejection of periodic disturbances with unknown frequencies // Automatica*. 1997. Vol. 33. P. 2213—2221, doi.org/10.1016/S0005-1098(97)00149-0.
 13. KHAC T., VLASOV S.M., IUREVA R.A. *Estimating the Frequency of the Sinusoidal Signal using the Parameterization based on the Delay Operators // ICINCO 2021 - Proceedings of the 18th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, 2021, pp. 656-660, DOI10.5220/0010536506560660*.
 14. MARIO R., TOMEI R. *Global estimation of unknown frequencies // IEEE Transact. on Automatic Control*. 2002. Vol. 47. P. 1324—1328, doi: 10.1109/TAC.2002.800761.
 15. PYRLIN A. A., BOBTSOV A. A., EFIMOV D., ZOLGHADRI A. *Frequency estimation for periodical signal with noise in finite time // Proc. of the 50th IEEE Conf. on Decision and Control and European Control Conf.* 2011. P. 3646—3651, doi: 10.1109/CDC.2011.6160655.
 16. VEDYAKOV A.A., et al. *Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude // IFAC PapersOnLine*. — 2017. — Vol. 50, no. 1. — Pp. 12880–12885.
 17. VEDYAKOV A.A., et al. *Frequency estimation of a sinusoidal signal with time-varying amplitude and phase //IFAC-PapersOnLine*. — 2018. — Vol. 51, no. 32. — Pp. 663–668.

ALGORITHM FOR IDENTIFICATION OF SINUSOIDAL SIGNAL FREQUENCY WITH VARIABLE UNKNOWN AMPLITUDE

Khac T. Nguyen — PhD Student, ITMO University, Saint - Petersburg, Russian Federation (nguyenkhactunghvchq1994@gmail.com).

Sergey M. Vlasov — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, (smvlasov@itmo.ru).

Abstract: The paper considers the problem of identifying the frequency of a sinusoidal signal with an unknown variable amplitude, which is

very important and relevant. Its solution can be relevant in the problems of managing dynamic objects and others. Improvements in the quality of estimating the frequency of a sinusoidal signal and ensuring exponential convergence to zero of estimation errors are proposed. The proposed method is based on the form of the Jordan matrix and the delay operator. At the first stage, the sinusoidal signal is parametrized using the delay operator and the variable amplitude is presented as the output signal of a finite-dimensional linear generator. At the second stage, the Jordan form of the matrix was used to parameterize the sinusoidal signal. After a series of special transformations, the simplest equation is obtained, containing one unknown parameter dependent on frequency, multiplied by a known function of time. DREM was used to find this parameter. The solution of the problem is based on the transformation of the signal model to a linear regression equation. The analysis of the possibilities of the proposed estimation method using computer simulation in the MATLAB-Simulink environment is carried out.

Keywords: sinusoidal signals, identification, variable amplitude, Jordan matrix shape, linear regression model.

УДК 681.51
ББК 32.965.09

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии*

*Поступила в редакцию
Опубликована*