

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Современные системы радиомониторинга и радиотехнической разведки (РТР), обеспечивающие безопасность использования радиочастотного спектра, постоянно сталкиваются с незаконными средствами связи, использующими сигналы с модуляциями. В связи с этим, задача разработки алгоритмов определения параметров сигналов с модуляцией становится актуальной. В данной работе показана возможность применения одного из алгоритмов идентификации для обработки сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) при отсутствии априорной информации о параметрах модуляции. Он предложен Мейном и представляет собой модификацию фильтра Калмана, который оценивает не вектор состояния динамического процесса, а вектор параметров модели. Использование указанного алгоритма позволило получить оценку элементов переходной матрицы, определяющей изменение параметров сигнала с линейной частотной модуляцией. Проверка работы алгоритма была проведена при его моделировании в среде Matlab. Для примера были использованы два варианта сигналов с ЛЧМ: с возрастанием частоты, т.е. положительным коэффициентом модуляции и с убыванием частоты – отрицательным коэффициентом модуляции. В результате моделирования выбранного алгоритма идентификации получены оценки переходных матриц, соответствующих теоретическим расчетам. Результаты проведенного исследования найдут применение, для последующего синтеза алгоритмов оптимальной оценки вектора состояния сигналов с ЛЧМ и оптимального управления перестройкой фильтра слежения за частотой наблюдаемого сигнала.

Ключевые слова: частотно-временная обработка, идентификация, моделирование, фильтр Калмана, частотная модуляция.

Nikitin N. S., Darovskikh S. N.

SYNTHESIS OF THE ALGORITHM IDENTIFICATION OF SIGNALS WITH LINEAR FREQUENCY MODULATION

Modern systems of radio monitoring and radio intelligence (RTR), ensuring the safety of the use of the radio frequency spectrum, are constantly confronted with illegal means of communi-

cation, using signals with modulations. In this regard, the task of developing algorithms for determining the parameters of signals with modulation becomes relevant. This paper shows the possibility of using one of the identification algorithms for signal processing with linear frequency modulation (chirp) in the absence of a priori information about the modulation parameters. It was proposed by Maine and is a modification of the Kalman filter, which estimates not the state vector of the dynamic process, but the vector of model parameters. The use of this algorithm allowed us to obtain an estimate of the elements of the transition matrix, which determines the change in the parameters of a signal with linear frequency modulation. Testing the operation of the algorithm was carried out when it was modeled in Matlab. For example, two variants of chirped signals were used: with increasing frequency, i.e. positive modulation factors and with decreasing frequency - negative modulation coefficient. As a result of the simulation of the selected identification algorithm, estimates of transition matrices corresponding to theoretical calculations were obtained. The results of the study will be used for the subsequent synthesis of algorithms for the optimal estimation of the state vector of signals with chirp and optimal control of the reorganization of the filter tracking the frequency of the observed signal.

Keywords: time-frequency processing, identification, modeling, Kalman filter, frequency modulation.

Введение

Приемники, используемые в системах пассивной радиотехнической разведки (РТР), а также системах радиомониторинга работают в ситуации отсутствия точной априорной информации о поступающем сигнале. Это накладывает определенные ограничения на используемые алгоритмы обнаружения и обработки принимаемой информации.

Отсутствие априорной информации о параметрах сложно модулированных сигналов не позволяет использовать алгоритмы оптимальной фильтрации для их оценки. В этих условиях актуальной является задача оптимальной идентификации модуляционных характеристик наблюдаемого сигнала. Сложность решения указанной задачи обусловлена, как правило, нелинейной зависимостью наблюдаемого сигнала от неизвестных параметров используемых модуляций.

Для примера рассмотрим сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), параметры которой заранее неизвестны. В общем виде уравнение для такого сигнала имеет вид [1,2]: $s(t) = A(t)\sin\left(2\pi\left(f_0t + \frac{\mu}{2}t^2\right)\right)$, $-\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2}$, (1) где $A(t)$ – амплитуда сигнала; f_0 – центральная частота сигнала с ЛЧМ, $\mu = (B)/\tau$ – коэффициент ЛЧМ, B – девиация частоты; τ – длительность сигнала с ЛЧМ.

Из (1) следует, что параметр частотной модуляции μ , подлежащий идентификации, нелинейным образом связан с наблюдаемым сигналом $s(t)$.

На сегодняшний день разработаны алгоритмы, позволяющие получить информацию

о частоте сигнала и характере изменения её во времени. Примером может служить непосредственное измерение частоты сигнала во временной области, осуществляемое цифровым частотомером [3]. Основным недостатком этого метода состоит в том, что при его использовании на промежуточной частоте (ПЧ) требуется высокое быстродействие микропроцессора.

Другой алгоритм связан с возможностью отображения наблюдаемого сигнала (1) в частотную область с последующей его обработкой для определения используемых в нем параметров модуляции. «Перенос» сигнала из временной в частотную область позволяет снизить требования к быстродействию микропроцессоров для получения параметров частотной модуляции.

Наиболее распространенным методом отображения сигнала из временной области в частотный его аналог является преобразование Фурье (ПФ). На практике же широкое применение нашел упрощенный его вариант. Он получил название: «быстрое преобразование Фурье» (БПФ). Выражение для вычисления БПФ имеет вид [4]:

$$A(k) = \sum_{n=0}^{N-1} S(n) * \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} S(n) * W^{nk}, (2)$$

где, $A(k)$ - k -й отсчет выходного спектра, ($k = 0,2, \dots N-1$),

$S(n)$ - n -й отсчет входной последовательности, ($n = 0,2, \dots N-1$),

$W^{nk} = \exp\left(-\frac{j2\pi nk}{N}\right)$ – коэффициенты ДПФ.

Недостаток применения алгоритма БПФ (2) состоит в том, что при его использовании

полностью теряется информация о временных характеристиках сигнала, таких как длительность сигнала, или время поступления сигнала в систему обработки.

Получение амплитудного спектра сигнала с ЛЧМ (рис.1) позволяет судить только об амплитудных характеристиках частотных составляющих сигнала. Однако его использование не позволяет определить характер изменения частоты (возрастает или спадает), с какой скоростью происходит это изменение.

$w(n)$ – временное окно, уменьшающее эффект «растекания» спектра между гармониками.

Принцип «оконного преобразования Фурье» (3) заключается в разбиении длинного отрезка сигнала на малые интервалы, которые затем проводятся через БПФ. При этом эти интервалы идут последовательно друг за другом. В результате такой операции можно получить набор спектров, следующих друг за другом, каждый из которых соответствует

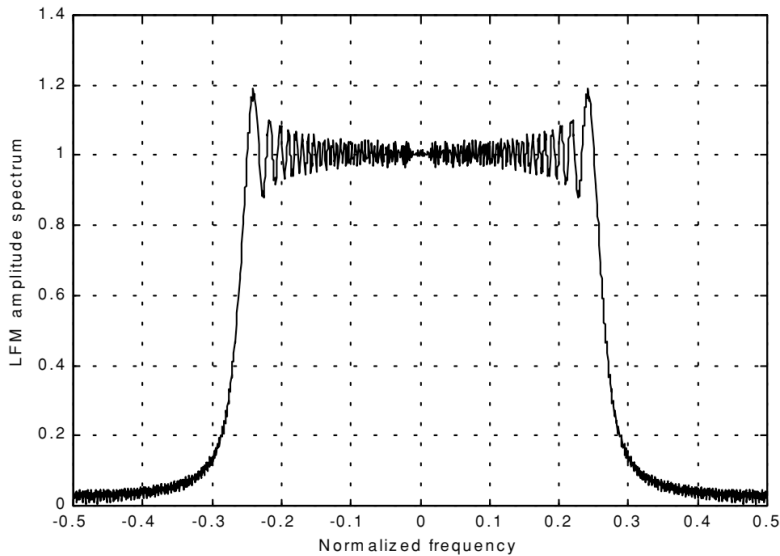


Рис. 1. Типовой спектр ЛЧМ сигнала

Для разрешения указанных неопределенностей разработан алгоритм, получивший название «оконное преобразование Фурье». Выражение для дискретного алгоритма «оконного преобразования Фурье» представлено ниже [5]:

$$A_{stft}(n, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} s(m) * w(n - m) e^{-j\omega n}, (3)$$

где $\omega = \frac{2\pi k}{N}$ – k -ая номер частотного канала преобразования Фурье,

своему интервалу во времени. Такой набор данных называется спектрограммой, или эволюцией амплитудного спектра сигнала во времени (рис.2).

На примере спектрограммы сигнала с ЛЧМ (рис. 3) четко видно момент начала и окончания сигнала, а также можно оценить изменение частоты.

Особенность применения «оконного пре-

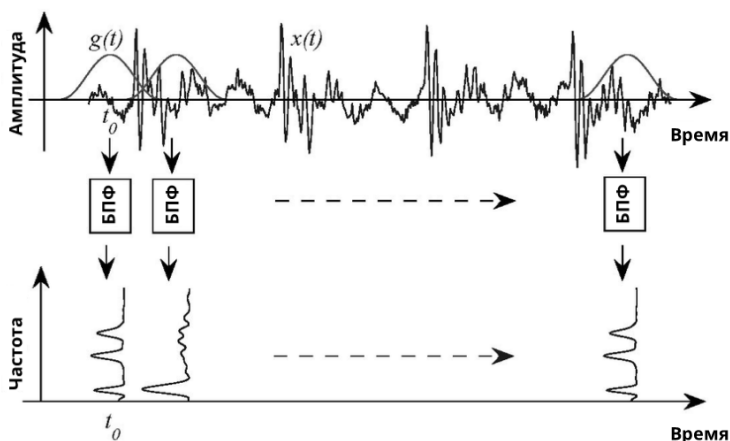


Рис. 2. Иллюстрация принципа «оконного преобразования Фурье»

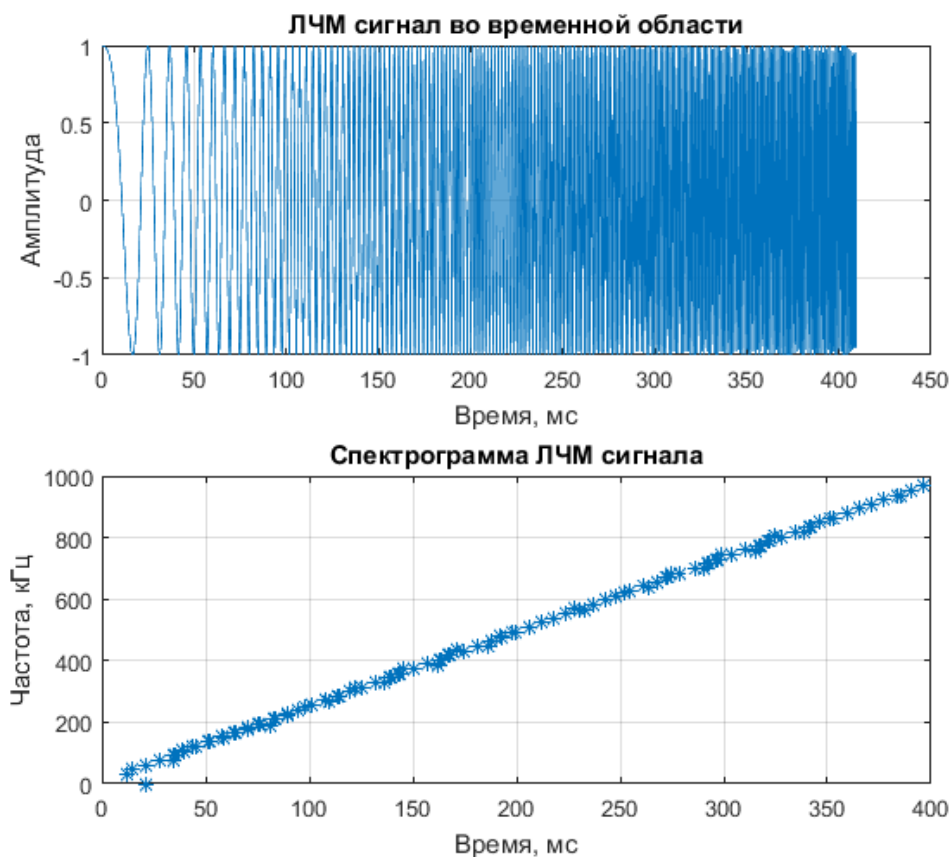


Рис. 3. ЛЧМ сигнал и его спектрограмма

образования Фурье» для оценки параметров модуляции сигнала с ЛЧМ состоит в том, что каждое последующее преобразование части наблюдаемого сигнала не зависит от предыдущего. Такой алгоритм обработки сигнала не позволяет уменьшить дисперсию оценки изменения несущей частоты сигнала.

Оптимизация оценивания параметров модуляции сигнала с ЛЧМ по критерию минимума среднеквадратического отклонения основана на априорном знании изменения параметров его модуляции во времени.

В тех случаях, когда эта информация недоступна, необходимо провести процедуру оптимальной идентификации параметров модуляции. Применение алгоритма оптимальной идентификации параметров сигнала с ЛЧМ позволит в дальнейшем реализовать оптимальный алгоритм оценивания этих параметров.

Цель данной статьи состоит в том, чтобы на примере сигнала с ЛЧМ с неизвестным параметром частотной модуляции μ показать возможность применения алгоритмов оптимальной идентификации для определения параметров модуляции.

1. Математическое описание исследуемого алгоритма оптимальной идентификации

В настоящее время разработаны множество различных методов идентификации, применяемые для оценки параметров моделей процессов [6–10]. Наиболее простой из них, предложен Мейном [11,12] – алгоритм, использующий модификацию фильтра Калмана, в которой оценивается не вектор состояния, а вектор параметров модели. Рассмотрим более подробно реализацию метода Мейна в пространстве состояний. Данный метод позволяет для процесса

$$x(k) = \Phi(k, k-1)x(k-1) + n_x(k-1), (4)$$

где $x(k)$ – вектор состояния процесса, $\Phi(k, k-1)$ – переходная матрица процесса, $n_x(k)$ – матрица шумов состояния процесса.

При наличии измерений (5) получить оценку(6) вектора параметров модели (4)

$$z(k) = x(k), (5)$$

$a(k) = [\Phi_1(k, k-1), \Phi_2(k, k-1), \dots, \Phi_n(k, k-1)]^T (6)$ где $\Phi_i(k, k-1)$, ($i=1, 1, \dots, n$) – строки матрицы $\Phi(k, k-1)$.

Вектор параметров оценивается с ис-

пользованием модифицированного фильтра Калмана [13–15] по правилу:

$$\hat{a}(k) = \hat{a}(k-1) + K_{\text{фа}}(k)[x(k) - M(k)\hat{a}(k-1)], \hat{a}(0) = a_0, (7)$$

$$K_{\text{фа}} = D_a(k-1)M^T(k)[M(k)D_a(k-1)M^T(k) + D_x(k-1)]^{-1} \times (8)$$

$$D_a(k) = D_a(k-1) - D_a(k-1)M^T(k)[M(k)D_a(k-1)M^T(k) + D_x(k-1)]^{-1} \times M(k)D_x(k-1), D_x(0) = D_{x0}. (9)$$

В уравнениях (7-9):

$K_{\text{фа}}$ – матричный коэффициент усиления невязки $x(k) - M(k)\hat{a}(k-1)$;

$$M(k) = \begin{bmatrix} x^T(k-1) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x^T(k-1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & x^T(k-1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x^T(k-1) \end{bmatrix} \text{ – матрица}$$

размером $n \times n^2$;

D_a – матрица дисперсий ошибок оценивания параметров модели (4).

2. Методика решения задачи

Для исследования возможности применения метода Мейна для определения параметров модуляции сигнала с ЛЧМ, после обработки «оконным преобразованием Фурье» было решено использовать следующий вектор состояния процесса:

$$x(k) = \begin{cases} x_1(k) - \text{частота сигнала} \\ x_2(k) - \text{абсолютное значение скорости изменения частоты} \end{cases}$$

Модель данного процесса, описывается следующими уравнениями:

$$x_1(k) = x_1(k-1) + dFx_2(k-1), x_1(0) = f_0; (11)$$

$$x_2(k) = x_2(k-1), x_2(0) = dF_0; (12)$$

где dF – коэффициент, определяющий знак изменения частоты;

dF_0 – абсолютное значение скорости изменения частоты;

f_0 – начальное значение частоты сигнала.

Сопоставив (11, 12) с (4) можно получить следующее

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & dF \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; (13)$$

$$M(k) = \begin{bmatrix} x_1(k-1) & x_2(k-1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_1(k-1) & x_2(k-1) \end{bmatrix}; (14)$$

$$a = [a_{11} \ a_{12} \ a_{21} \ a_{22}]; (15)$$

где $a_{11} = 1$; $a_{12} = dF$; $a_{21} = 0$;

В скалярном виде, алгоритм оценки элементов переходной матрицы (7) описывается следующими уравнениями (16-21):

$$\hat{a}_{11}(k) = \hat{a}_{11}(k-1) + K_{\text{фа}11}\Delta x_1(k) + K_{\text{фа}12}\Delta x_2(k), \hat{a}_{11}(0) = a_{110}; (16)$$

$$\hat{a}_{12}(k) = \hat{a}_{12}(k-1) + K_{\text{фа}21}\Delta x_1(k) + K_{\text{фа}22}\Delta x_2(k), \hat{a}_{12}(0) = a_{120}; (17)$$

$$\hat{a}_{21}(k) = \hat{a}_{21}(k-1) + K_{\text{фа}31}\Delta x_1(k) + K_{\text{фа}32}\Delta x_2(k), \hat{a}_{21}(0) = a_{210}; (18)$$

$$\hat{a}_{22}(k) = \hat{a}_{22}(k-1) + K_{\text{фа}41}\Delta x_1(k) + K_{\text{фа}42}\Delta x_2(k), \hat{a}_{22}(0) = a_{220}; (19)$$

$$\Delta x_1(k) = x_1(k) - \hat{a}_{11}(k-1)x_1(k-1) - \hat{a}_{12}(k-1)x_2(k-1); (20)$$

$$\Delta x_2(k) = x_2(k) - \hat{a}_{21}(k-1)x_1(k-1) - \hat{a}_{22}(k-1)x_2(k-1); (21)$$

Для проверки работы алгоритма было проведено моделирование в среде Matlab. Моделировалось как модель процесса в пространстве состояний, так и работа самого алгоритма оценивания параметров. Для наглядности в данной статье приводятся результаты моделирования двух вариантов сигналов с ЛЧМ: с возрастанием частоты сигнала, т.е. положительным коэффициентом модуляции (Рис. 4) и с убыванием частоты сигнала – отрицательным коэффициентом модуляции (Рис. 5).

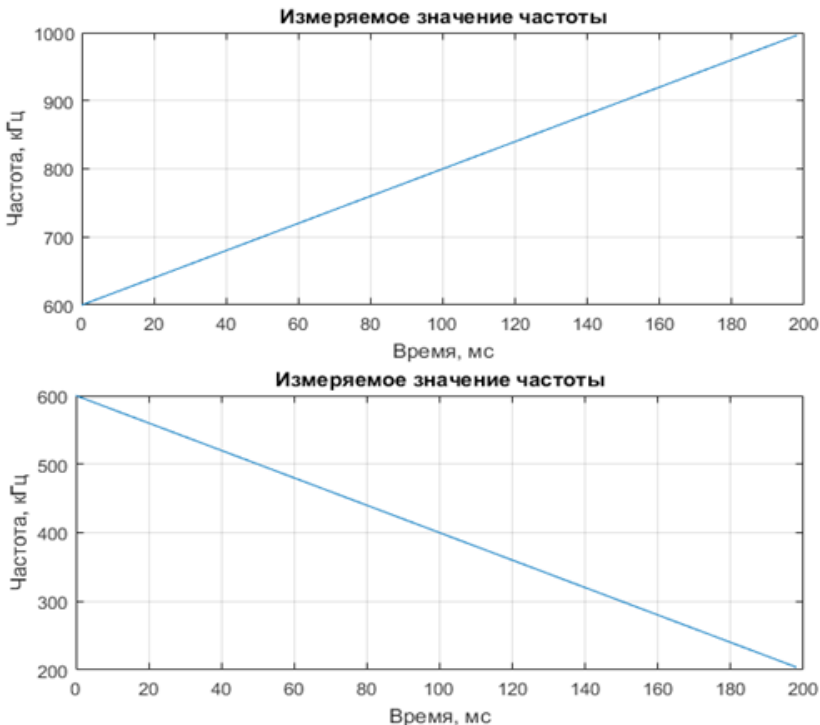


Рис. 4. Модель входного сигнала с ЛЧМ, для разных коэффициентов модуляции (сверху – положительный, снизу – отрицательный)

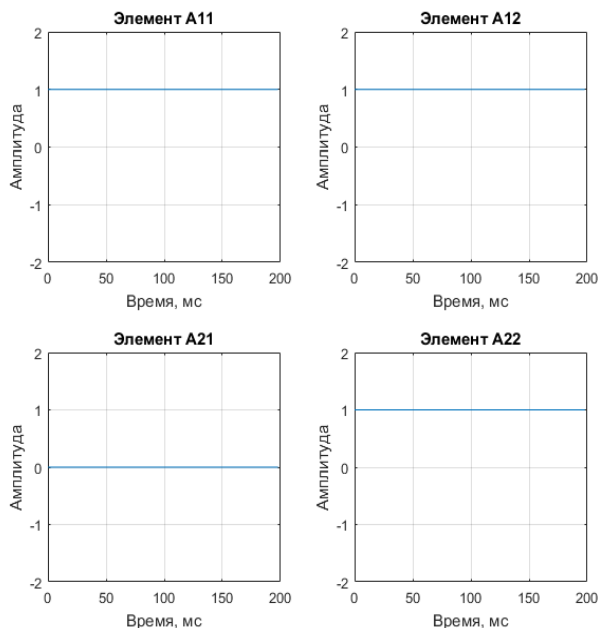


Рис. 5. Оценка коэффициентов переходной матрицы процесса сигнала с ЛЧМ, с положительным коэффициентом модуляции

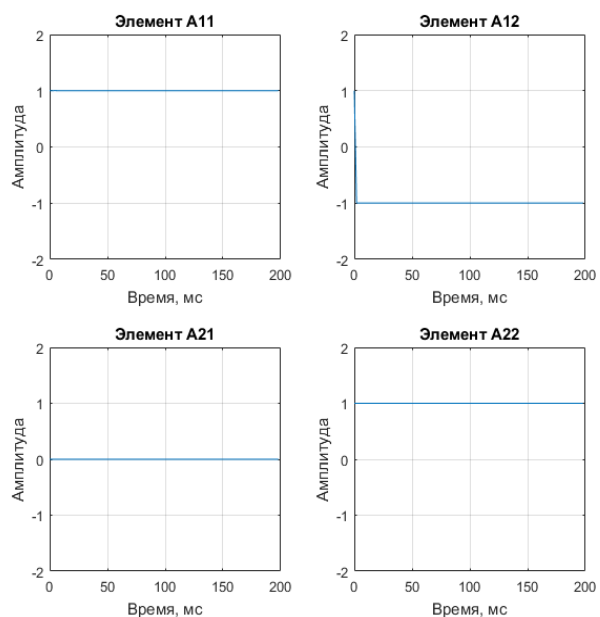


Рис. 6. Оценка коэффициентов переходной матрицы процесса сигнала с ЛЧМ, с отрицательным коэффициентом модуляции

В результате моделирования работы алгоритма (16-21) получены оценки переходных матриц (Рис. 5,6). Проанализировав их можно установить, что они соответствуют предполагаемой переходной матрице (13). Таким образом, полученные оценки можно использовать для определения характера изменения частоты сигнала с ЛЧМ.

Заключение

В результате проведенного исследования

было установлено, что применение алгоритма оптимальной идентификации на основе метода Мейна позволяет получить информацию о характере изменения индекса частотной модуляции сигнала с ЛЧМ. Результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке алгоритмов обеспечения безопасности информационных систем, в системах РТР и радиомониторинга.

Литература

1. Bassem, R. M. Radar systems analysis and design using MATLAB / R. M. Bassem. – Chapman & Hall/CRC, 2013. 772 p.
2. Варакин, Л. Е. Теория сложных сигналов. / Л. Е. Варакин. – М.: Сов. Радио, 1970. – 376 с.
3. Рембовский, А. М. Радиомониторинг. Задачи, методы средства. / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин. – М.: ИП Горячая линия – Телеком. 2012. 217 с.
4. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. / Р. Лайонс. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
5. Shie, Qian Joint time-frequency analysis / Shie Qian, Dapang Chtn // IEEE signal processing magazine. – 1999. – V. 16. – № 2. – P. 52–67.
6. Грооп, Д. Методы идентификации систем. Пер. с англ. / Д. Грооп. – М.: Мир, 1979.
7. Льюинг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователей. / Л. Льюинг. – М.: Наука, 1984.
8. Sahu B. N. A simplified functional link net architecture for dynamic system identification with a UKF algorithm / B. N. Sahu, P. K. Dash, P. K. Nayak // International conference on Energy, Automation and Signal. – 2011. – P. 1–4.
9. Lei Y. A novel unscented Kalman filter for recursive state-input-system identification of nonlinear systems / Y. Lei, D. Xia, K. Erazo, S. Nagarajaiah // Mechanical Systems and Systems and Signal Processing. – 2019. – V. 127. – P. 120 – 135.
10. Cui T. Kalman filtering based gradient estimation algorithms for observer canonical state-space systems with moving average noises / T. Cui, F. Ding, X. Li, T. Hayat // Journal of the Franklin Institute. – 2019. – V.356. – P. 5485–5502.
11. Mayne D.Q., Optimal non-stationary estimation of the parameters of a linear system with Gaussian inputs, / D.Q. Mayne // International journal of electronics. –1963. – V. 14 – P. 101–112.
12. Меркулов, В.И. Авиационные системы радиуправления. Т.1 Принципы построения систем радиуправления. Основы синтеза и анализа. / В.И. Меркулов, В.В. Дрогалин, А.И. Канащенков, В.Н. Лепин, О.Ф. Самарин, А.А. Соловьев. – М.: «Радиотехника», 2003. – 192 с.
13. Unsal, D. Implementation of Identification system for IMUs based on Kalman Filtering / D. Unsal, M. Dogan // IEEE/ION Position, location and navigation symposium – 2014, – P. 236–240.
14. Kühl S. Kalman filter based system identification exploiting the decorrelation effects of linear prediction / S. Kühl, C. Antweiler, T. Hübschen, P. Jax // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2017. – P.4790-4794.
15. Schimmack M. Comparing data scaling based recursive least squares algorithms with Kalman Filter for nano parameters identification // M. Schimmack, P. Mercorelli, A. Georgiadis // Proceedings of 2014 International Conference on Modelling, Identification and Control. – 2014. – P.316-321.

References

1. Bassem, R. M. Radar systems analysis and design using MATLAB / R. M. Bassem. – Chapman & Hall/CRC, 2013. p. 772.
2. Varakin, L. E. [Theory of the complex signals] Teoriya slozhnykh signalov. / L. E. Varakin. – Moscow: Sov. Radio, 1970, p. 376.
3. Rembovskiy, A. M. Radiomonitoring. Zadachi, metody sredstva. / A. M. Rembovskiy, A.V. Ashikhmin, V.A. Koz'min. – Moscow: Publ. Goryachaya liniya – Telekom. 2012, p. 217.
4. Lyons, R. [Understanding digital signal processing] Tsifrovaya obrabotka signalov: Vtoroe izdanie. Per. s angl. / R. Lyons. – Moscow: ООО «Binom-press», 2006, p. 656.
5. Shie, Qian Joint time-frequency analysis / Shie Qian, Dapang Chtn // IEEE signal processing magazine. – 1999. – V. 16. – № 2. – p. 52–67.
6. Graupe, D. [Identification of systems] Metody identifikatsii sistem. Per. s angl. / D. Graupe. – Moscow: Mir, 1979.
7. Ljung, L. [System identification: Theory for the user] Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovateley. / L. Ljung. – Moscow: Nauka, 1984.
8. Sahu B. N. A simplified functional link net architecture for dynamic system identification with a UKF algorithm / B. N. Sahu, P. K. Dash, P. K. Nayak // International conference on Energy, Automation and Signal. – 2011. – P. 1–4.
9. Lei Y. A novel unscented Kalman filter for recursive state-input-system identification of nonlinear systems / Y. Lei, D. Xia, K. Erazo, S. Nagarajaiah // Mechanical Systems and Systems and Signal Processing. – 2019. – V. 127. – P. 120 – 135.

10. Cui T. Kalman filtering based gradient estimation algorithms for observer canonical state-space systems with moving average noises / T. Cui, F. Ding, X. Li, T. Hayat // Journal of the Franklin Institute. – 2019. – V.356. – P. 5485–5502.
 11. Mayne D.Q., Optimal non-stationary estimation of the parameters of a linear system with Gaussian inputs, / D.Q. Mayne // International journal of electronics. –1963. – V. 14 – P. 101–112.
 12. Merkulov, V.I. Aviatsonnye sistemy radioupravleniya. T.1 Printsipy postroyeniya sistem radioupravleniya. Osnovy sinteza i analiza. / V.I. Merkulov, V.V. Drogalin, A.I. Kanashchenkov, V.N. Lepin, O.F. Samarin, A.A. Solov'ev. – Moscow.: « Radiotekhnika », 2003. – P. 192.
 13. Unsal, D. Implementation of Identification system for IMUs based on Kalman Filtering / D. Unsal, M. Dogan // IEEE/ION Position, location and navigation symposium – 2014, – P. 236–240.
 14. Kühl S. Kalman filter based system identification exploiting the decorrelation effects of linear prediction / S. Kühl, C. Antweiler, T. Hübschen, P. Jax // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2017. – P.4790-4794.
 15. Schimmack M. Comparing data scaling based recursive least squares algorithms with Kalman Filter for nano parameters identification // M. Schimmack, P. Mercorelli, A. Georgiadis // Proceedings of 2014 International Conference on Modelling, Identification and Control. – 2014. – P.316-321.
-

НИКИТИН Николай Сергеевич, аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Южно-Уральский Государственный университет. 454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 76а. Email: nikitnikol@gmail.com.

NIKITIN Nikolay Sergeevich, postgraduate of Infocommunication technology department, South Ural State University (National Research University). 454080, Chelyabinsk, prsp. Lenina, 76a. Email: nikitnikol@gmail.com.

ДАРОВСКИХ Станислав Никифорович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Инфокоммуникационных технологий, Южно-Уральский Государственный университет, 454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 76а. Email: darovskih.s@mail.ru

DAROVSKIKH Stanislav Nikiforovich, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Head of Infocommunication technology department, South Ural State University (National Research University). 454080, Chelyabinsk, prsp. Lenina, 76a. Email: darovskih.s@mail.ru