

Научная статья
УДК 621.396.96
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180678>

ПОСТРОЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ПОМЕЩЕНИЙ ЧЕРЕЗ СТЕНУ

Константин Юрьевич Гаврилов^{1✉}, Роман Юрьевич Козлов²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

¹gvrk61@mail.ru✉

Аннотация. Для радиолокатора зондирования помещения через стену предложен алгоритм формирования траекторий целей, который позволяет на основе последовательности измеренных в течение нескольких кадров значений координат целей строить траекторию ее перемещения на основе линейной аппроксимации, использующей ограниченный временной интервал. Длительность этого временного интервала должна быть небольшой (считается, что это интервал линейного перемещения цели), он должен включать число кадров, не превышающее десяти (соответствует длительности интервала не более одной секунды).

Описана методика разработки алгоритма формирования сглаженной траектории цели, в котором вместо использования среднеарифметических усредненных значений координат целей в соседних кадрах предложено использовать медианное значение.

Путем статистического моделирования показано, что в случае наличия интерференционных помех, приводящих к появлению аномальных ошибок измерения координат целей, предложенный метод позволяет существенно – более чем в 2 раза, снизить значение среднеквадратической ошибки аппроксимирующей траектории цели.

Полученные результаты получили подтверждение при натурных испытаниях с макетом радара при формировании траекторий перемещения людей, зондируемого через кирпичную стену.

Ключевые слова: Радиолокационное зондирование помещений через стену, сигнал со ступенчатой частотной модуляцией, межпериодная обработка информации, оценка траектории перемещения людей, интерференционные помехи

Для цитирования: Гаврилов К.Ю., Козлов Р.Ю. Построение траекторий перемещения людей при радиолокационном зондировании помещений через стену // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180678>

Original article

CONSTRUCTION OF TRAJECTORIES OF MOVEMENT OF PEOPLE DURING RADAR SENSING OF PREMISES THROUGH A WALL

Konstantin Yu. Gavrilov^{1✉}, Roman Yu. Kozlov²

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,

Moscow, Russia

¹gvrk61@mail.ru[✉]

Abstract. The premises probing radars are mainly applied for detecting people, determining their number, location and trajectory of movement indoors. As in conventional radar, human detection procedures are based on threshold signal processing methods and reduced to the primary target markers forming. Here, however, the specifics of the operation of wall-sensing radars are manifested, associated with the presence of strong interference noises indoors (due to the signals re-reflections from walls, floor, ceiling, furniture) and leading to origination of a large number of false targets and abnormal values of the measured coordinates of targets.

Under these conditions, traditional algorithms for constructing plotting trajectories based on Kalman filtering methods require modifications that account for the presence of abnormal measurements and allow obtaining smoothed target trajectories close to the true ones.

The purpose of the article consists in developing an algorithm to plot a smoothed trajectories of people moving indoors based on the results of primary target markings, in which the of target coordinates abnormal measurements impact will be completely compensated or significantly suppressed.

The developed algorithm is based on the Kalman filtering procedure for a limited sample of measurements applying a linear model of target movement and trajectory approximation by a piecewise polyline. The abnormal measurements elimination is achieved herewith by the median estimate of the trajectory parameters instead of the arithmetic mean one.

In the time interval, several marks about the position of the person are obtained. These marks are being approximated by a linear function with the least squares method. After that, averaging of the mark located on the approximated line is performed.

The article considers two options of averaging, namely by the arithmetic mean and by the median value. The trajectory of human movement is being modeled in the form of a curved line with abnormal emissions superimposed on it. Trajectory smoothing by the median value gives much fewer outliers than that by the arithmetic mean, about two fold.

Thus, the article describes a method for developing an algorithm for the smoothed target trajectory forming, in which, a median value is being used instead of the arithmetic mean averaged values of trajectory parameters.

Statistical modeling demonstrated that in the case of interference noises leading to the abnormal errors occurrence in measuring targets coordinates, the proposed method allows significantly reducing the value of the RMS error of the target approximating trajectory by 1.5–2.5 times. A pollution model was employed herewith to simulate interference with abnormal values.

Keywords: Radar sensing of premises through a wall, a signal with stepwise frequency modulation, interperiodic information processing, estimation of the trajectory of human movement, interference noise

For citation: Gavrilov K.Yu., Kozlov R.Yu. Construction of trajectories of movement of people during radar sensing of premises through a wall. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180678>

Введение

Радиолокаторы зондирования помещений через стену применяются, в основном, для обнаружения людей, определения их числа, местоположения и траектории перемещения внутри помещения. Процедуры обнаружения людей, как и в традиционной радиолокации, основаны на методах пороговой обработки сигналов и сводятся к формированию первичных отметок целей. Здесь, однако, проявляется специфика работы радиолокаторов зондирования через стену (РЗЧС), связанная с наличием сильных интерференционных помех внутри помещений (из-за переотражений сигналов от стен, пола, потолка, мебели) и приводящая к появлению большого количества ложных целей и к аномальным значениям измеряемых координат целей.

В этих условиях традиционные алгоритмы построения траекторий целей, основанные на методах калмановской фильтрации, требуют модификаций, учитывающих наличие аномальных измерений и позволяющих строить сглаженные траектории целей, близкие к истинным.

Целью работы является разработка алгоритма построения сглаженной траектории перемещения людей внутри помещения на основе результатов первичных отметок целей, в котором влияние аномальных измерений координат целей будет полностью скомпенсировано или существенно подавлено.

В основе разработанного алгоритма лежит процедура калмановской фильтрации [14-16, 19] для ограниченной выборки измерений при использовании

линейной модели перемещения цели и аппроксимации траектории с помощью кусочно-ломаной линии. При этом устранение аномальных измерений достигается путем использования медианной оценки параметров траектории вместо среднеарифметической оценки.

1. Постановка задачи

Однократный обзор контролируемой зоны – помещения, приводит к формированию двумерной матрицы, называемой кадром (подробное описание принципов формирования кадров в РЗЧС приведено в [11, 13]). Период следования кадров T в РЗЧС составляет обычно значения порядка 0,01...0,5 с. Первичные отметки цели – единичные значения индикаторов обнаружения, которые для некоторой цели в кадре с номером k будем обозначать как $(x^{(k)}, y^{(k)})$. Здесь $x^{(k)}, y^{(k)}$ – координаты цели, $P(x^{(k)}, y^{(k)}) = 1$ – значение индикатора.

Пусть на интервале времени наблюдения, включающем K кадров, получены значения оценок координат некоторой цели: $\{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), \dots, (x^{(K)}, y^{(K)})\}$. Введем обозначения для векторов оценочных координат цели, полученные на k -м кадре и включающие k_0 предшествующих оценочных значений:

$$\mathbf{x} = [x^{(k-k_0+1)}, x^{(k-k_0+2)}, \dots, x^{(k)}], \quad \mathbf{y} = [y^{(k-k_0+1)}, y^{(k-k_0+2)}, \dots, y^{(k)}]. \quad (1)$$

В обозначениях векторов \mathbf{x} , \mathbf{y} их зависимость от номера текущего кадра k и числа значений k_0 в явном виде не отображается.

Вместо текущего значения оценки $y^{(k)}$ будем использовать аппроксимирующее значение $y_a^{(k)}$, которое получено на основе линейной аппроксимации зависимости $\mathbf{y} = f(\mathbf{x})$, имеющей вид:

$$\mathbf{y}_a = a\mathbf{x} + \mathbf{b}, \quad (2)$$

где $\mathbf{y}_a = [y_a^{(k-k_0+1)}, y_a^{(k-k_0+2)}, \dots, y_a^{(k)}]$; $\mathbf{b} = b\mathbf{e}$; $\mathbf{e} = [1, 1, \dots, 1]$ – вектор единичных значений длиной k_0 . Параметры a , b линейной аппроксимирующей зависимости определяются с помощью метода наименьших квадратов, согласно которому величина ошибки аппроксимации

$$\delta = \|\mathbf{y}_a - \mathbf{y}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^{k_0} (y_a^{(k-i+1)} - y^{(k-i+1)})^2} \quad (3)$$

должна быть минимальной, т.е.

$$(a_0, b_0) = \arg \min_{a, b} (\delta). \quad (4)$$

Здесь через (a_0, b_0) обозначены оптимальные значения искоемых параметров линейной аппроксимирующей функции.

2. Решение задачи

Нахождение оптимальных значений аппроксимирующих коэффициентов (a_0, b_0) может быть получено путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{da} = 0, \\ \frac{d\delta}{db} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

которая следует из свойств непрерывности и унимодальности функции $\delta(a, b)$. При вычислении производных функции $\delta(a, b)$ (3) с учетом (2) и обозначений (1) получаем систему уравнений

$$\begin{cases} a_0 \|\mathbf{x}\|^2 + b_0 k_0 \bar{x} - \mathbf{x} \mathbf{y}^T = 0, \\ a_0 k_0 \bar{x} + b_0 k_0 - \bar{y} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^{k_0} x^{(k-i+1)}, \quad \bar{y} = \frac{1}{k_0} \sum_{i=1}^{k_0} y^{(k-i+1)}, \quad (7)$$

– средние значения координат цели, полученные в течение k_0 кадров; $\|\mathbf{x}\|$ – евклидова норма вектора \mathbf{x} ; $()^T$ – операция транспонирования. Решая систему уравнений (6), окончательно получаем

$$a_0 = \frac{\mathbf{x} \mathbf{y}^T - k_0 \bar{x} \bar{y}}{\|\mathbf{x}\|^2 - k_0 (\bar{x})^2}, \quad b_0 = \bar{y} - a_0 \bar{x}. \quad (8)$$

Заметим, что формулы (8) допускают вариант рекуррентной реализации, которая, однако, при малых значениях $k_0 \leq 10$ оказывается нецелесообразной.

Результатом описанной обработки является построение траектории цели, координаты которой в каждом k -м кадре принимают значения $(x^{(k)}, y_a^{(k)})$, где для цели с номером l координаты $x^{(k)} = x_l^{(k)}$, $y_a^{(k)} = y_{a(l)}^{(k)}$. Эффективность построения аппроксимирующей траектории в значительной степени определяется выбором значения параметра k_0 (число кадров, используемых для вычисления параметров аппроксимирующей функции): с ростом k_0 сглаживающий характер обработки усиливается и траектория становится более прямолинейной, однако, в то же время увеличение этого параметра приводит к ухудшению динамических свойств алгоритма сглаживания – резкие изменения траектории движения цели отслеживаются с большим запаздыванием. Как показывают результаты натуральных экспериментов с макетом РЗЧС, наиболее целесообразно выбирать значения $k_0 = 3..7$. При больших значениях k_0 имеют место сильные искажения траекторий целей из-за инерционности алгоритма линейной аппроксимации.

Рассмотренный метод вычисления параметров линейной аппроксимации описан в [12]. Однако, особенностью использования полученного алгоритма для построения траекторий целей в РЗЧС является наличие аномальных измерений в данных координатах $\{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), \dots, (x^{(K)}, y^{(K)})\}$ целей. В результате появления аномальных измерений, оценочные значения средних величин \bar{x}, \bar{y} в (7) характеризуются весьма большим значением дисперсии, что приводит к большим

погрешностям оценок параметров a_0, b_0 . Следствием этого является появление больших «скачков» положения целей, которые приводят как к искажению их траектории, так и к возрастанию вероятности перепутывания отметок различных целей.

С целью снижения негативного воздействия указанного фактора предлагается вместо оценок (7) средних арифметических значений \bar{x}, \bar{y} использовать медианное значение, более устойчивое к аномальным выбросам, т.е.

$$x_{med} = \text{med}(\mathbf{x}), \quad y_{med} = \text{med}(\mathbf{y}). \quad (9)$$

Свойства устойчивости медианной оценки известно и подробно описано в [17].

Исследование эффективности медианных оценок вместо среднеарифметических, а также сравнение между собой этих двух оценок при использовании в алгоритме построения траектории движения целей, проводилось путем статистического моделирования. Результаты такого моделирования в среде Matlab приведены в следующем разделе.

3. Результаты моделирования алгоритма построения траектории цели

Рассмотрим процедуру построения траектории цели по результатам сформированных оценок $\{(x^{(1)}, y^{(1)}), (x^{(2)}, y^{(2)}), \dots, (x^{(K)}, y^{(K)})\}$. Зададимся истинной траекторией цели, описываемой зависимостью $y_n^{(k)} = f_n(x^{(k)})$, наблюдаемые значения которой подвергаются аддитивному воздействию помех и шумов, т.е. имеют вид

$$y^{(k)} = y_n^{(k)} + \eta^{(k)} + \xi^{(k)}, \quad (10)$$

где случайные процессы $\xi^{(k)}, \eta^{(k)}$ моделируют внутренние шумы приемника и внешние интерференционные помехи.

Процедура моделирования шумов стандартная – это дискретные значения белого гауссовского шума, для формирования которого используются стандартные датчики случайных чисел (ДСЧ) (заметим, что в среде Matlab для этого используется функция $\text{randn}(m,n)$).

Процедура формирования помех сложнее, т.к. она должна учитывать свойства интерференционных помех, характерные для РЗЧС. Исследования таких помех, показывают, что их отличительной особенностью является либо сильное замирание сигнала (вплоть до полного пропадания), либо искажения в направлении прихода сигнала и времени его задержки (т.е. дальности). Для формирования такого рода помех можно использовать модель коррелированного шума с аномальными значениями, описанную в [10].

Модель дискретного случайного процесса $\eta^{(k)}$ с аномальными выбросами, называемая также ε -загрязненным процессом, представляет собой комбинацию двух процессов, значения которых в каждый момент времени t_k появляются с вероятностью ε и $(1-\varepsilon)$ соответственно:

$$\eta^{(k)} = (1 - p_\varepsilon^{(k)}) \eta_1^{(k)} + p_\varepsilon^{(k)} \eta_2^{(k)}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (11)$$

где $p_\varepsilon^{(k)} \in \{0, 1\}$, $P\{p_\varepsilon^{(k)} = 1\} = \varepsilon$; $\eta_1^{(k)}$, $\eta_2^{(k)}$ – гауссовские процессы, с дисперсиями σ_1^2 и $\sigma_2^2 \gg \sigma_1^2$. Существенное отличие дисперсий позволяет моделировать аномальные значения процесса, появляющиеся достаточно редко, обычно в пределах (1...10)-процентной доли всего числа измерений.

Значение ε как раз и определяет эту долю аномальных, или как говорят «загрязненных», измерений, принимая значения из диапазона 0,1...0,01. При этом величины $p_\varepsilon^{(k)}$ ($k = 1, 2, \dots$) принимают бинарные значения 1 или 0 с вероятностью ε или $(1 - \varepsilon)$ соответственно.

В качестве модели траектории цели выбрано ее движение от радара в противоположную сторону помещения при линейном «змеевидном» перемещении влево, вправо и обратно. Описанная невозмущенная траектория движения цели $y_{\text{и}}^{(k)} = f_{\text{и}}(x^{(k)})$ представлена на рис. 1 а. На рис. 1 б представлена реализация траектории перемещения цели на основе модели (10)-(11). Как видно из рис. 1 б, аномальные измерения моделируют большие отклонения измеренных координат цели от истинных, обусловленные влиянием интерференционных помех.

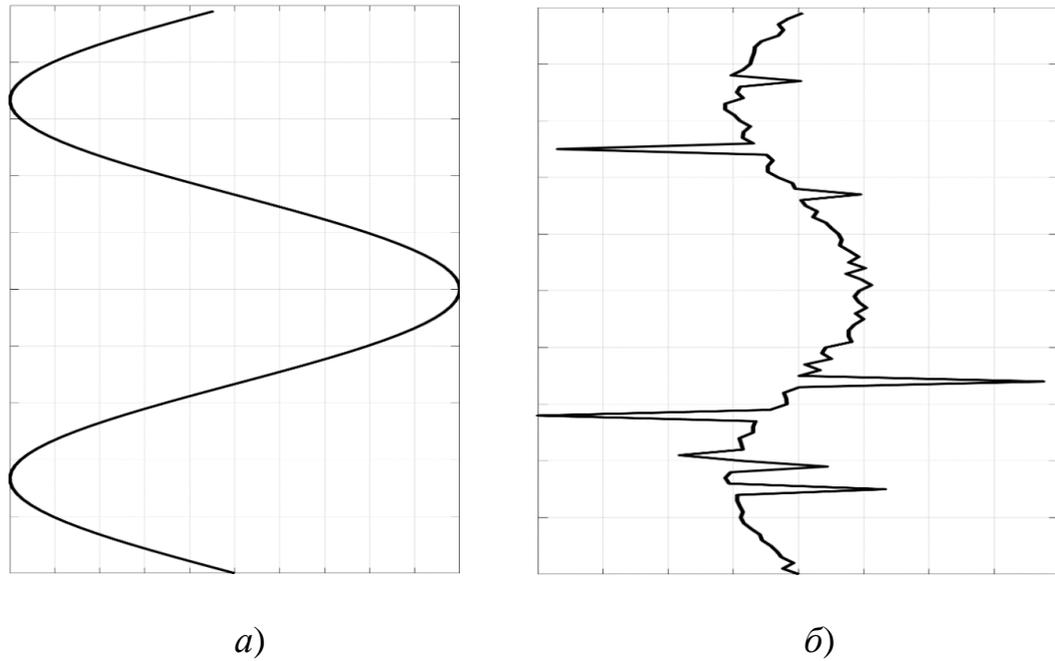


Рис. 1 – Модели траектории движения цели: *a)* истинная траектория;
б) результаты измерений при наличии помех и шумов

При моделировании помех использовано значение $\varepsilon = 0,1$ (10-процентное загрязнение) при величине отношения дисперсий помеховых процессов $\sigma_2^2 / \sigma_1^2 = 100$. Результаты межпериодной обработки измерений, т.е. сглаженные траектории, полученные на основе описанного алгоритма, представлены на рис. 2. При вычислении сглаженных координат принималось значение $k_0 = 7$. На рис. 2 *a* при вычислении аппроксимирующих коэффициентов a_0, b_0 (см. соотношение (8)) использовалось вычисление усредненных значений \bar{x}, \bar{y} на основе среднеарифметических значений, а на рис. 2 *б* – на основе медианных значений.

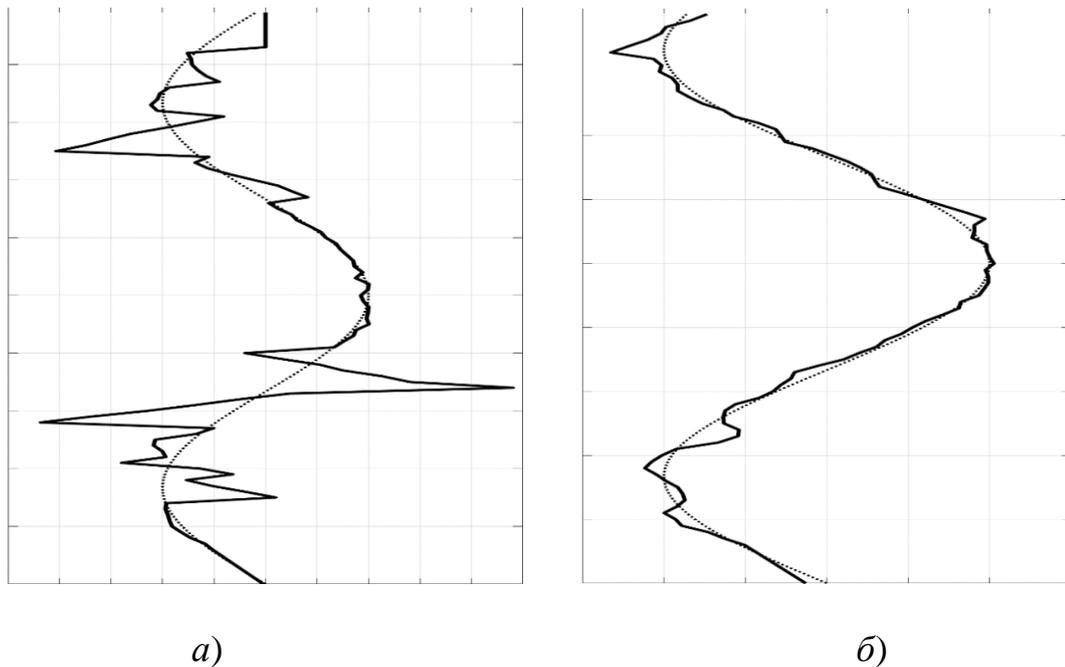


Рис. 2 – Истинная (пунктирные линии) и сглаженные (сплошная линия) траектории для случаев: *а)* среднеарифметического усреднения;
б) усреднения на основе медианного значения

Сравнение результатов сглаженных траекторий, представленных на рис. 2 *а, б* наглядно демонстрирует преимущества последнего подхода, основанного на использовании медианного значения вместо среднеарифметических оценок \bar{x}, \bar{y} . При этом на рис. 2 приведены лишь две типичные реализации. Оценка среднеквадратической ошибки δ аппроксимации в обоих случаях, рассчитанная путем статистического моделирования, показала, что при использовании медианной оценки значение этой ошибки оказывается меньше примерно в 1,5...2,5 раза.

Заключение

Рассмотрена процедура формирования траекторий целей (людей), предназначенная для использования в радиолокаторах зондирования помещений через стену, которая позволяет на основе последовательности измеренных в течение нескольких кадров значений координат целей строить траекторию их перемещения путем линейной аппроксимации на ограниченном временном интервале. Длительность этого интервала должна быть небольшой (считается, что это интервал линейного перемещения цели), порядка одной секунды, что, обычно, соответствует числу 3...10 кадров.

Описана методика разработки алгоритма формирования сглаженной траектории цели, в котором вместо использования среднеарифметических усредненных значений параметров траектории предложено использовать медианное значение.

Путем статистического моделирования показано, что в случае наличия интерференционных помех, приводящих к появлению аномальных ошибок измерения координат целей, предложенный метод позволяет существенно – примерно в 1,5...2,5 раза, снизить значение среднеквадратической ошибки аппроксимирующей траектории цели. При этом для моделирования помех с аномальными значениями использовалась модель \mathcal{E} -загрязнения.

Список источников

1. Безуглов В.А., Негодяев С.С., Царьков А.В. Алгоритм обработки данных сверхширокополосного радиолокатора для обнаружения подвижных объектов за оптически непрозрачными преградами // Спецтехника и связь. 2013. № 2. С. 33-39.
URL: <https://sciup.org/14966938>
2. Бугаев А.С., Ивашов И.С., Иммореев И.Я. Биорадиолокация. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 398 с.
3. Бугаев А.С., Васильев И.А., Ивашов С.И. и др. Обнаружение и дистанционная диагностика людей за препятствиями с помощью РЛС // Радиотехника. 2003. № 7. С. 42-47.
4. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. - М.: Советское Радио, 1971. – 328 с.
5. Вовшин Б.М., Гринев А.Ю., Фадин Д.В. Процедуры обнаружения подвижных объектов за преградами // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. № 1-2. С. 83.
6. Гаврилов К.Ю., Игонина Ю.В., Козлов Р.Ю. Обнаружение и сопровождение людей при радиолокационном зондировании помещений через стену // XII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» (Москва, 26-28 ноября 2018): сборник трудов. – М.: Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 2018. С. 78-79.
7. Гаврилов К.Ю., Игонина Ю.В., Линников О.Н. Анализ информативности признаков при вторичной обработке сигналов в РЛС малой дальности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 5. С. 11-17.

8. Гаврилов К.Ю., Игони́на Ю.В., Линников О.Н. Оценка ошибок измерения координат целей в радарх зондирования через стену // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2019. Т. 17. № 1. С. 46-54.
9. Гаврилов К.Ю., Игони́на Ю.В., Линников О.Н., Трусов В.Н. Метод вторичной обработки информации в РЛС малой дальности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2016. Т. 14. № 11. С. 4-15.
10. Гаврилов К.Ю., Каменский И.В., Кирдяшкин В.В., Линников О.Н. Моделирование и обработка радиолокационных сигналов в Matlab: Учебное пособие. – М.: Радиотехника, 2020. – 264 с.
11. Гаврилов К.Ю., Козлов Р.Ю. Метод обработки радиолокационных сигналов с частотной манипуляцией при обнаружении людей в помещениях через стену // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 4. С. 117-131. DOI: [10.18127/j00338486-202204-15](https://doi.org/10.18127/j00338486-202204-15)
12. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. – М.: Советское радио, 1978. – 384 с.
13. Козлов Р.Ю., Гаврилов К.Ю. Восстановление траекторий перемещения людей при радиолокационном зондировании через стену // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018» (Москва, 19-23 ноября 2018): тезисы. - М.: Люксор, 2018. С. 258-259.
14. Нгуен Н.Д., Доан Т.Т., Нгуен Т.Т., Чан К.М., Нгуен К.А., Нго В.Т. Оптимизация и моделирование посадочной траектории для мини-БПЛА с учетом ограничений на управление и посадочную скорость // Труды МАИ. 2023. № 130. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=174620>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-21)

15. Сычев М.И., Осипов П.В. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе многомодельного подхода // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173031>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-19)
16. Сычев М.И. Траекторная обработка радиолокационной информации на основе многомодельной фильтрации // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74830>
17. Шипко В.В. Метод и алгоритмы межканальной градиентной реконструкции многоспектральных изображений в оптико-электронных комплексах воздушной и космической разведки // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=102211>
18. Aftanas M.I. Through Wall Imaging with UWB Radar System. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering: 5.2.13 Electronics), Technical University of Kosice, 2009.
19. Bar-Shalom Ya., Li X.-Rong, Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation, John Wiley & Sons, 2001. DOI: [10.1002/0471221279](https://doi.org/10.1002/0471221279)
20. Genarelli G., Braca P., Vivone G., Soldovieri F. Multiple Extended Target Tracking for Through Wall Radars // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, December 2015, vol. 53, no. 12, pp. 6482-6494. DOI: [10.1109/TGRS.2015.2441957](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2441957)
21. Martone A.F. Ranney K., Le C. Noncoherent Approach for Through-the-Wall Moving Target Indication // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, January 2014, vol. 50, no. 1, pp. 193-206. DOI: [10.1109/TAES.2013.120329](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.120329)

22. Peabody J.E., Charvat G.L., Goodwin J., Tobias M. Through-Wall Imaging Radar // Lincoln Laboratory Journal, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 62-72.
23. Through-the-wall Radar Imaging. Edited by M.G. Amin. L – CRC Press, 2011.
24. Yan J., Hong H., Zhao H., Li Y., Gu C., Zhu X. Through-Wall Multiple Targets Vital Signs Tracking Based on VMD Algorithm // Sensors, 2016, vol. 16, pp. 1293.
25. Yinan Yu, Jian Yang, Tomas McKelvey, Borys Stoew. A Compact UWB Indoor and Through-Wall Radar with Precise Ranging and Tracking // International Journal of Antennas and Propagation, 2012, pp. 1687-5869. DOI: [10.1155/2012/678590](https://doi.org/10.1155/2012/678590)

References

1. Bezuglov V.A., Negodyaev S.S., Tsar'kov A.V. *Spetstekhnika i svyaz'*, 2013, no. 2, C. 33-39. URL: <https://sciup.org/14966938>
2. Bugaev A.S., Ivashov I.S., Immoreev I.Ya. *Bioradiolokatsiya* (Bioradiolocation), Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2010, 398 p.
3. Bugaev A.S., Vasil'ev I.A., Ivashov S.I. et al. *Radiotekhnika*, 2003, no. 7, pp. 42-47.
4. Bykov V.V. *Tsifrovoe modelirovanie v statisticheskoi radiotekhnike* (Digital modeling in statistical radio engineering), Moscow, Sovetskoe Radio, 1971, 328 p.
5. Vovshin B.M., Grinev A.Yu., Fadin D.V. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2009, no. 1-2, pp. 83.
6. Gavrilov K.Yu., Igonina Yu.V., Kozlov R.Yu. *XII Vserossiiskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz'»*: sbornik trudov. Moscow, Institut radiotekhniki i elektroniki im. V.A. Kotel'nikova RAN, 2018, pp. 78-79.

7. Gavrilov K.Yu., Igonina Yu.V., Linnikov O.N. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2018, vol. 16, no. 5, pp. 11-17.
8. Gavrilov K.Yu., Igonina Yu.V., Linnikov O.N. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2019, vol. 17, no. 1, pp. 46-54.
9. Gavrilov K.Yu., Igonina Yu.V., Linnikov O.N., Trusov V.N. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy*, 2016, vol. 14, no. 11, pp. 4-15.
10. Gavrilov K.Yu., Kamenskii I.V., Kirdyashkin V.V., Linnikov O.N. *Modelirovanie i obrabotka radiolokatsionnykh signalov v Matlab* (Modeling and processing of radar signals in Matlab), Moscow, Radiotekhnika, 2020, 264 p.
11. Gavrilov K.Yu., Kozlov R.Yu. *Radiotekhnika*, 2022, vol. 86, no. 4, pp. 117-131. DOI: [10.18127/j00338486-202204-15](https://doi.org/10.18127/j00338486-202204-15)
12. Zhdanyuk B.F. *Osnovy statisticheskoi obrabotki traektornykh izmerenii* (Fundamentals of statistical processing of trajectory measurements), Moscow, Sovetskoe radio, 1978, 384 p.
13. Kozlov R.Yu., Gavrilov K.Yu. 17-ya *Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika – 2018»*: tezisy. Moscow, Lyuksor, 2018, pp. 258-259.
14. Nguen N.D., Doan T.T., Nguen T.T., Chan K.M., Nguen K.A., Ngo V.T. *Trudy MAI*, 2023, no. 130. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=174620>. DOI: [10.34759/trd-2023-130-21](https://doi.org/10.34759/trd-2023-130-21)
15. Sychev M.I., Osipov P.V. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173031>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-19)

16. Sychev M.I. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74830>
17. Shipko V.V. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102211>
18. Aftanas M.I. Through Wall Imaging with UWB Radar System, *A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Electrical Engineering: 5.2.13 Electronics)*, Technical University of Kosice, 2009.
19. Bar-Shalom Ya., Li X.-Rong, Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*, John Wiley & Sons, 2001. DOI: [10.1002/0471221279](https://doi.org/10.1002/0471221279)
20. Genarelli G., Braca P., Vivone G., Soldovieri F. Multiple Extended Target Tracking for Through Wall Radars, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, December 2015, vol. 53, no. 12, pp. 6482-6494. DOI: [10.1109/TGRS.2015.2441957](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2441957)
21. Martone A.F. Ranney K., Le C. Noncoherent Approach for Through-the-Wall Moving Target Indication, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, January 2014, vol. 50, no. 1, pp. 193-206. DOI: [10.1109/TAES.2013.120329](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.120329)
22. Peabody J.E., Charvat G.L., Goodwin J., Tobias M. Through-Wall Imaging Radar, *Lincoln Laboratory Journal*, 2012, vol. 19, no. 1, pp. 62-72.
23. *Through-the-wall Radar Imaging*, Edited by M.G. Amin. L, CRC Press, 2011.
24. Yan J., Hong H., Zhao H., Li Y., Gu C., Zhu X. Through-Wall Multiple Targets Vital Signs Tracking Based on VMD Algorithm, *Sensors*, 2016, vol. 16, pp. 1293.

25. Yinan Yu, Jian Yang, Tomas McKelvey, Borys Stoew. A Compact UWB Indoor and Through-Wall Radar with Precise Ranging and Tracking, *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012, pp. 1687-5869. DOI: [10.1155/2012/678590](https://doi.org/10.1155/2012/678590)

Статья поступила в редакцию 26.05.2024

Одобрена после рецензирования 31.05.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 26.05.2024; approved after reviewing on 31.05.2024; accepted for publication on 27.06.2024