

СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

УДК 654.16

DOI 10.51955/2312-1327_2025_4_6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ

*Илья Николаевич Ростокин,
orcid.org/0000-0003-3698-2168,
доктор технических наук, доцент
Владимирский государственный университет
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Муromский институт (филиал),
ул. Орловская, 23
Муrom, 602264, Россия
rostokin.ilya@yandex.ru*

*Олег Анатольевич Горбачев,
orcid.org/0000-0002-6085-8661,
доктор технических наук, профессор
Московский государственный технический университет
гражданской авиации (Иркутский филиал),
ул. Коммунаров, 3
Иркутск, 664047, Россия
gorbachev_oa@mail.ru*

*Сергей Валентинович Снимщиков,
orcid.org/0009-0003-4356-3516,
кандидат технических наук
Московский государственный технический
университет гражданской авиации,
Кронштадтский бульвар, д. 20
Москва, 125493, Россия
info@mstuca.ru
s.snimshikov@mstuca.ru*

Аннотация. Концепция совершенствования наблюдения в системе управления воздушным движением (УВД) основывается на использовании современных технологических решений в интересах гражданской авиации РФ. В настоящее время высокоточное и непрерывное определение местоположения (МП) воздушных судов (ВС) может быть обеспечено за счет использования многопозиционной системы наблюдения (МПСН). В данной статье предложен алгоритм определения МП ВС в МПСН на основе модифицированного метода наименьших квадратов (ММНК). Отличительной особенностью предложенного алгоритма является формирование оценок координат ВС в условиях стохастического характера оцениваемого вектора состояния и ошибок измерений при нелинейной зависимости измерений от оцениваемых параметров. Для оценки точности предложенного алгоритма проводились экспериментальные исследования путем моделирования на ПЭВМ. Анализ полученных результатов продемонстрировал высокую точность определения координат ВС и соответствие теоретическим данным. Таким

образом, применение разработанного алгоритма на основе модифицированного метода наименьших квадратов позволяет производить оценку координат воздушных судов в многопозиционной системе наблюдения с высокой точностью при случайном характере оцениваемого вектора состояния и ошибок измерения.

Ключевые слова: многопозиционная система наблюдения, модифицированный метод наименьших квадратов, воздушное судно, местоположение, ковариационная матрица, среднеквадратическая погрешность.

AIRCRAFT POSITIONING IN A MULTI-POSITION SURVEILLANCE SYSTEM BASED ON A MODIFIED LEAST-SQUARES METHOD

*Ilya N. Rostokin,
orcid.org/0000-0003-3698-2168,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor
Murom Institute
of Vladimir State University,
23, Orlovskaya Street
Murom, 602264, Russia
rostokin.ilya@yandex.ru*

*Oleg A. Gorbachev,
orcid.org/0000-0002-6085-8661,
Doctor of Technical Sciences, Professor
Moscow State Technical University
Civil Aviation (Irkutsk Branch),
3, Kommunarov street
Irkutsk, 664047, Russia
gorbachev_oa@mail.ru*

*Sergey V. Snimshchikov
orcid.org/0009-0003-4356-3516,
Candidate of Technical Sciences
Moscow State Technical University of Civil Aviation,
20, Kronshtadtsky blvd
Moscow, 125493, Russia
info@mstuca.ru
s.snimshikov@mstuca.ru*

Abstract. The concept of improving surveillance within the air traffic control (ATC) system is based on the use of modern technological solutions for the benefit of civil aviation of the Russian Federation. Currently, high-precision and continuous determination of the aircraft position can be ensured through the use of a multi-position surveillance system (MPSS). This article proposes an algorithm for determining the aircraft position in the MPSS based on the modified least squares method (MLSM). A distinctive feature of the proposed algorithm is the obtaining of estimates of aircraft coordinates under the assumption of random measurement errors and the estimated state vector with a nonlinear dependence of measurements on the estimated parameters. To evaluate the accuracy of the proposed algorithm, experimental studies were conducted through computer simulation. Analysis of the obtained results demonstrated high accuracy of aircraft coordinate determination and consistency with theoretical data. Thus, the use of the developed algorithm based on the modified least squares method allows for the estimation of aircraft coordinates in a multi-position surveillance system with high accuracy under the random behavior of the estimated state vector and measurement errors.

Монаков, 2018б; Монаков, 2018в; Skrypnik и др., 2019] представлены результаты разработки алгоритмов навигационных определений в МПСН.

Так в работе [Development..., 2021] приведен алгоритм определения координат ВС использованием мультилатерационной технологии на основе классического метода наименьших квадратов (МНК). Предложенный алгоритм включает следующие этапы: ввод исходных данных, расчет расстояний между приемными станциями и воздушным судном, вычисление вектора невязки, расчет матрицы частных производных с учетом оценок координат воздушного судна на предыдущей итерации, вычисление поправки, расчет уточненных координат ВС. Достоинство классического МНК заключается в отсутствии необходимости привлечения априорной информации о статистических характеристиках переменных вектора состояния и измерений. В свою очередь отсутствие статистической информации не позволяет в полной мере решить задачу анализа точности разрабатываемых алгоритмов. Поэтому требуется введение гипотезы о стохастическом характере ошибок измерения и переменных оцениваемого вектора состояния [Степанов, 2017].

Предложенный в [Development..., 2021] алгоритм, основанный на минимизации суммы квадратов отклонений, является чувствительным к выбросам и аномальным значениям данных, которые снижают точность определения координат ВС. Ввиду того, что в реальных условиях при определении координат ВС в МПСН прием сигналов осуществляется на фоне шумов, то требуется разработка помехоустойчивых алгоритмов на основе модификации МНК.

Цель статьи – разработка алгоритма определения местоположения воздушных судов в многопозиционной системе наблюдения на основе модифицированного метода наименьших квадратов.

Теоретические исследования. Материалы и методы

Для определения МП в МПСН используется разностно-дальномерный метод [Измерение координат..., 2014; Кондратьев и др., 1986; Onalaja et al., 2014], согласно которому координаты ВС и ТС определяются на основе измеренных разностей моментов прихода сигнала на приемных пунктах, разнесенных в пространстве. Затем вычисляются разности времен прихода сигналов (цели Ц) $\Delta\tau_{01}, \Delta\tau_{02}$ от ВС до центрального (опорного НПО) и разнесенные наземные пункты (НП₁, НП₂) (рис. 2).

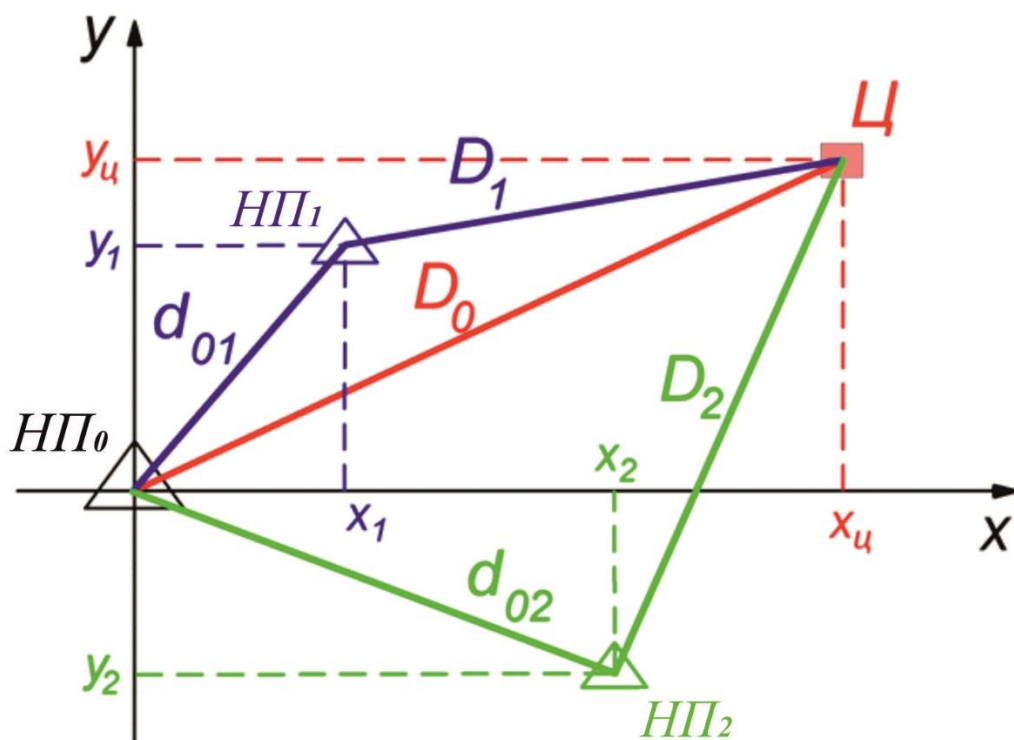


Рисунок 2 – Конфигурация МПСН

Считаем, что сигнал принимается на трёх приёмных позициях. Алгоритм определения координат на основе МПСН заключается в приеме антенной сигнала с борта ВС, обработке его в приёмном устройстве, где он выделяется на фоне шумов и помех, усиливается и переносится на промежуточную частоту; затем сигнал поступает на АЦП и преобразуется в цифровую форму для дальнейшей обработки; оцифрованный сигнал поступает на измеритель, на выходе которого получают данные о времени прихода сигнала (TOA – Time of Arrival); которые затем обрабатываются в вычислителе разности времён прихода сигнала (TDOA – Time Difference of Arrival), вместе с данными о TOA с других станций [Stefanski et al., 2018].

При обработке информации в МПСН разность дальностей между ВС, ТС и наземными приёмными станциями (НПС) определяется следующим образом:

$$\Delta R_{ij}(w, g_i, g_j) = c \Delta \tau_{ij}(w, g_i, g_j), \quad (1)$$

где $\Delta R_{ij}(w, g_i, g_j)$ – разность расстояний от ВС до i -ой и j -ой НПС; w – вектор координат ВС в декартовой системе координат; g_i, g_j – векторы координат НПС с номерами i или j ; количество НПС равно m ; $\Delta \tau_{ij}(w, g_i, g_j)$ – разность моментов прихода сигнала от ВС до i -го и j -го НПС, соответственно; c – скорость распространения радиоволн.

Вводя обозначения векторов координат ВС и НПС в форме $w(x_a, y_a, z_a)$, $g_i(x_i, y_i, z_i)$ и $g_j(x_j, y_j, z_j)$, выражение (1) перепишем в следующем виде (2):

$$\Delta R_{ij} = R_i - R_j = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 + (z_i - z_a)^2} + \Delta R_i - \sqrt{(x_j - x_a)^2 + (y_j - y_a)^2 + (z_j - z_a)^2} - \Delta R_j = c\Delta\tau_{ij} \quad (2)$$

Известно [Leonardi et al., 2009], что из всего множества измеренных разниц времени прибытия сигнала (ДТОА) только $(m-1)$ разниц моментов прибытия оказываются статистически независимыми. При реализации мультilaterационной технологии МП ВС определяется путём решения системы нелинейных уравнений (2) как точка пересечения линий положения, которые имеют форму гипербол.

Как уже отмечалось, в работе [Development..., 2021] приведён один из возможных алгоритмов определения МП ВС на основе МНК. Отличительная особенность которого в том, что оценивание неизвестных переменных вектора состояния w по измерениям u основано на выборе значений, обеспечивающих минимизацию критерия, характеризующего меру близости между измеренными и вычисленными значениями $s(w)$ или Hw [Степанов, 2017]:

$$J(w) = (u - s(w))^T (u - s(w)) = \sum_{i=1}^m (u_i - s_i(w))^2. \quad (3)$$

Разности $\mu_i = u_i - s_i(w)$ называются невязками измерений. Соответствующая критерию (3) оценка w определяется следующим образом:

$$\hat{w}(u) = \arg \min_w (u - s(w))^T (u - s(w)).$$

В процессе работы алгоритма МНК выбирается такое значение неизвестного параметра, при котором минимизируется сумма квадратов невязок измерений согласно (2) [Степанов, 2017].

В работе предлагается применить модифицированный метод наименьших квадратов (ММНК), при использовании которого минимизируемый критерий записывается следующим образом:

$$J(w) = (u - Hw)^T Q(u - Hw) + (w - \bar{w})^T D(w - \bar{w}), \quad (4)$$

где \bar{w} – вектор математических ожиданий, Q – весовая матрица учета вклада отличий измеренных и вычисленных значений, которые соответствуют различным компонентам вектора измерений, D – неотрицательно определенная матрица.

Исходя из реальных условий функционирования МПСН полагаем, что w является векторной случайной величиной с математическим ожиданием \bar{w} и дисперсиями σ_0^2 . Также полагаем, что погрешности измерений являются центрированными случайными величинами, не коррелированными между собой и с w , дисперсии которых принимают значения r_i^2 , $i = \overline{1, \dots, m}$ при неравноточных измерениях w и $r_i^2 = r^2$ при равноточных измерениях [Степанов, 2017].

Система (2) включает четыре неизвестных величины. Это три координаты источника сигнала ВС $w(x_a, y_a, z_a)$ и невязка $\Delta R_{dis} = \Delta R_i - \Delta R_j$, обусловленная смещением шкал времени НПС. Конкретизируем алгоритм ММНК применительно к задаче определения местоположения в МПСН. Минимизируемый критерий (4) перепишем в виде

$$J(w) = (u - s(w))^T Q(u - s(w)) + (w - \bar{w})^T D(w - \bar{w}). \quad (5)$$

В соответствии с заданным критерием (5) и выражение для соответствующей ему оценки запишем в виде:

$$\hat{w}(u) = \arg \min_w \left((u - s(w))^T Q(u - s(w)) + (w - \bar{w})^T D(w - \bar{w}) \right). \quad (6)$$

Ввиду нелинейной зависимости измерений от оцениваемых параметров в соответствии с выражением (2) задача разработки алгоритма оценивания значительно усложняется. Решение данной проблемы возможно путем сведения нелинейной задачи к линейной на основе линеаризации. Минимизируемый критерий (5) в данном случае запишем в виде:

$$J(x_a, y_a, z_a) = \sum_{i=1}^3 q_i (\tilde{u}_i - H_{i1}(w)(x - x_n) - H_{i2}(w)(y - y_n) - H_{i3}(w)(z - z_n) + \sum_{i=1}^n d_i (w - \bar{w})^2, \quad (7)$$

а его приближение, соответствующее линеаризованному описанию функции

$$s_i(w) = R_i(w) = \sqrt{(x_i - x_a)^2 + (y_i - y_a)^2 + (z_i - z_a)^2}, \quad (8)$$

в окрестности точки линеаризации имеет вид

$$J(w) = (\tilde{u}_i - H_{i1}(w)(w - w_n))^T Q(\tilde{u}_i - H_{i1}(w)(w - w_n)) + (w - \bar{w})^T D(w - \bar{w}) =$$

$$= \sum_{i=1}^3 q_i (\tilde{u}_i - H_{i1}(w)(x - x_n) - H_{i2}(w)(y - y_n) - H_{i3}(w)(z - z_n) + \sum_{i=1}^n d_i (w - \bar{w})^2), \quad (9)$$

где $H_{\mathcal{L}}(w) = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_i) & -\cos(\beta_i) & -\cos(\vartheta_i) \\ -\cos(\alpha_j) & -\cos(\beta_j) & -\cos(\vartheta_j) \\ -\cos(\alpha_k) & -\cos(\beta_k) & -\cos(\vartheta_k) \end{bmatrix}$ – матрица направляющих косинусов линии визирования ВС – НПС,

$$\tilde{u}_i(w^n) \triangleq u_i - R_i(w^n) = u_i - \sqrt{(x_i - x_a^n)^2 + (y_i - y_a^n)^2 + (z_i - z_a^n)^2}. \quad (10)$$

При этом справедливы обозначения:

$$H = \begin{bmatrix} H_i(w^n) \\ H_j(w^n) \end{bmatrix}, \quad \tilde{u} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_i(w^n) \\ \tilde{u}_j(w^n) \end{bmatrix}, \quad \delta w = w - w^n.$$

Алгоритм определения МП ВС на основе ММНК запишем в виде:

$$\hat{w}^{(\gamma+1)} = \bar{w} + K(\hat{w}^{(\gamma)}) \left[u - s(\hat{w}^{(\gamma)}) - H^{(\gamma)}(\hat{w}^{(\gamma)})(\bar{w} - \hat{w}^{(\gamma)}) \right]; \quad (11)$$

$$K(\hat{w}^{(\gamma)}) = P(\hat{w}^{(\gamma)}) H^T(\hat{w}^{(\gamma)}) V^{-1}; \quad (12)$$

$$P(\hat{w}^{(\gamma)}) = \left((P^w) + H(\hat{w}^{(\gamma)}) V^{-1} H^T(\hat{w}^{(\gamma)}) \right)^{-1}; \quad (13)$$

$$\gamma=0,1,2,\dots, \quad \hat{w}^{(0)} = \bar{w}.$$

где $P(\hat{w}^{(\gamma)})$ – расчетная матрица ковариаций ошибок оценивания; $K(\hat{w}^{(\gamma)})$ – матричный коэффициент усиления; V – диагональная матрица с элементами r_i^2 .

Формулу для вычисления матрицы ковариаций ошибок оценивания на основе ММНК с учётом сделанных предположений запишем в виде:

$$P(w^n) = \left((P^w) + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{r_i^2} M_i(w^n) \right)^{-1}, \quad (14)$$

где P^w – ковариационная матрица вектора $\delta w = w - w^n$,

$$M(w^n) \triangleq \begin{bmatrix} \frac{x_i - x_a}{R_i} & \frac{y_i - y_a}{R_i} & \frac{z_i - z_a}{R_i} \\ \frac{x_j - x_a}{R_j} & \frac{y_j - y_a}{R_j} & \frac{z_j - z_a}{R_j} \\ \frac{x_k - x_a}{R_k} & \frac{y_k - y_a}{R_k} & \frac{z_k - z_a}{R_k} \end{bmatrix}.$$

При выполнении условия $r_i^2 = r^2$ выражение (14) упрощается и приводится к виду:

$$P(w^n) = \left((P^w) + \frac{1}{r^2} \sum_{i=1}^3 M_i(w^n) \right)^{-1}.$$

Использование итерационного алгоритма для получения расчетной матрицы ковариаций предполагает необходимость принятия значения, сформированного на последней итерации. Кроме того, следует заметить, что предложенный алгоритм является работоспособным в случае, когда число измерений и количество НПС не совпадают между собой.

Детальный анализ выражений (11)-(13) показывает, что расчетная точность оценивания МП в МПСН определяется взаимным расположением НПС и ВС. В этом случае выражение для радиальной среднеквадратической сферической погрешности определения МП ВС σ_M можем записать в виде:

$$\sigma_M = \sqrt{P[1,1] + P[2,2] + P[3,3]} = r \sqrt{Sp \left(\sum_{i=1}^3 M_i(w^n) \right)^{-1}}, \quad (15)$$

где Sp – след матрицы.

Из (15) следует, что при одинаковой величине r погрешность σ_M будет определяться произведением среднеквадратической ошибки измерения ТОА на коэффициент, характеризующий взаимное расположение ВС и НПС, который называется геометрическим фактором (Position Dilution of Precision) [Степанов, 2017]:

$$PDOP = \sqrt{Sp \left(\sum_{i=1}^m M_i(w^n) \right)^{-1}}.$$

Следует отметить, что при увеличении количества применяемых НПС m радиальная среднеквадратическая погрешность определения МП ВС в МПСН будет уменьшаться.

Моделирование и исследование

При решении задачи разработки алгоритма определения МП ВС в МПСН важной особенностью является исследование статистических характеристик формируемых оценок на основе ММНК, т.е. анализа точности. Для оценки точности определения МП ВС на основе мультилатерационной технологии проводились экспериментальные исследования алгоритма определения координат на основе ММНК. Среднеквадратическая погрешность определения времени задержки ответного сигнала от ВС в точке приема $r_i^2 = 9\text{ м}$. Моделировалась ситуация использования НПС с известным месторасположением. Точность определения координат МП ВС оценивается с использованием статистического моделирования на основе метода Монте-Карло.

Результаты статистического моделирования процесса определения плановых координат ВС при полете по заданному маршруту в трехпозиционной МПСН представлены на рисунках 3-6. На рисунках 3, 4 представлены графики динамики изменения координат МП ВС в процессе полета и их оценки, полученные в МПСН при реализации синтезированного алгоритма.

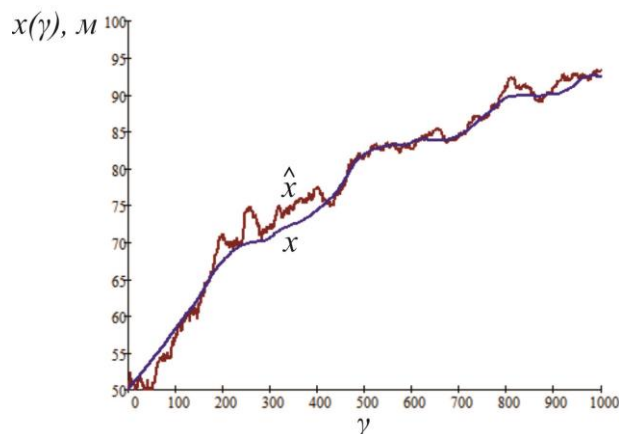


Рисунок 3 – Графики динамики координаты x ВС и её оценки

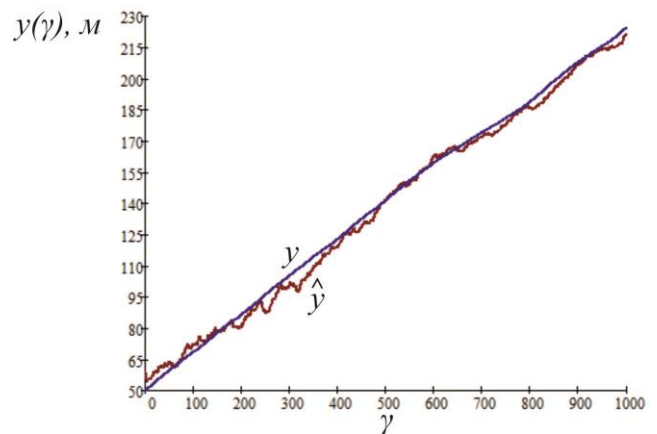


Рисунок 4 – Графики динамики координаты y ВС и её оценки

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 3, 4, показывает, что в процессе оценивания предложенный алгоритм обеспечивает минимизацию выбранного критерия, характеризующего меру близости между истинными и оценочными значениями координат ВС. Отклонение оценок от истинных значений координат полета ВС является следствием наличия ошибок измерения.

На рисунках 5, 6 представлены графики зависимости апостериорных среднеквадратических погрешностей (СКП) ошибок оценивания координат МП ВС, определяемые по расчетной матрице ковариаций ошибок оценивания $\sigma_x = \sqrt{P[1,1]}$ и $\sigma_y = \sqrt{P[1,1]}$.

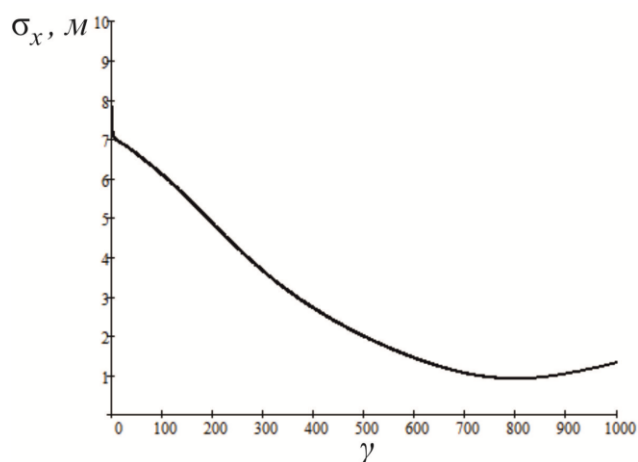


Рисунок 5 – СКП ошибка оценки координаты x ВС

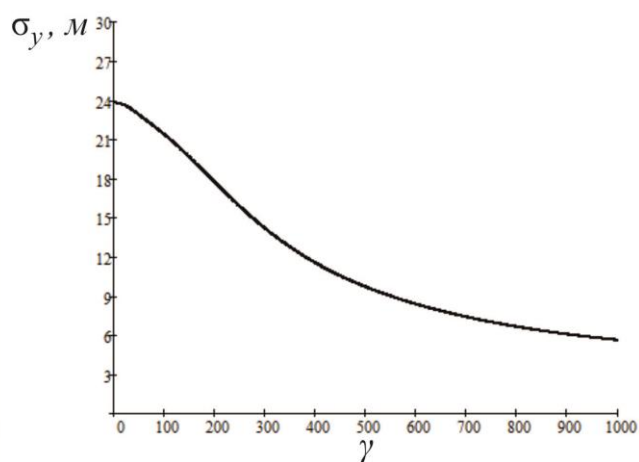


Рисунок 6 – СКП ошибка оценки координаты y ВС

Анализ результатов, представленных на рисунках 5, 6, демонстрирует высокую точность определения координат ВС на основе предложенного алгоритма. Нелинейный характер графиков обусловлен зависимостью СКП от взаимного расположения ВС и НПС, которое меняется в процессе полета относительно стационарно установленных станций. Полученные в ходе моделирования результаты исследования подтверждают известное теоретическое положение о том, что расчетная точность оценивания в задаче определения координат по навигационным опорным точкам с известным МП в значительной степени определяется взаимным расположением радиоориентиров и подвижных объектов.

Заключение

В статье излагаются принципы обработки навигационной информации с целью оценивания неизвестных координат ВС и ТС в предположении о случайном характере оцениваемого вектора и ошибок измерения. Рассматривается подход построения алгоритма оценивания на основе модифицированного метода наименьших квадратов в прикладном плане ориентированного на решение задачи определения МП ВС в МПСН. Решение поставленной задачи по оценке координат усложняется ввиду нелинейной зависимости измерений от оцениваемых параметров, поэтому в работе выполнено сведение исходной нелинейной задачи к линейной на основе линеаризации. В статье приведены результаты конкретизации алгоритма ММНК применительно к задаче определения МП ВС в МПСН, представлены результаты разработки алгоритма определения местоположения в МПСН на основе модифицированного метода наименьших квадратов в нелинейной постановке. Отличительной особенностью алгоритма является зависимость ошибки оценивания от значения самого оцениваемого вектора состояния.

При разработке алгоритма определения МП ВС в МПСН важной является задача исследования его точностных характеристик и анализа статистических свойств ошибок формируемых оценок. Для анализа точности предложенного алгоритма проведены экспериментальные исследования

методами машинного моделирования. Для оценки точности алгоритма определения МП ВС на основе мультилатерационной технологии проводились экспериментальные исследования определения координат на основе путем моделирования ситуации использования наземных приемных станций с известным месторасположением.

Анализ представленных результатов показывает высокую точность определения координат ВС на основе предложенного алгоритма. Нелинейный характер графиков обусловлен зависимостью погрешности оценки координат от взаимного расположения ВС и НПС, подтверждающий известное теоретическое положение о том, что расчетная точность оценивания в задаче определения координат по навигационным опорным точкам определяется взаимным расположением радиоориентиров и подвижного объекта. Сравнительный анализ характеристик предложенного алгоритма с известными данными подтвердил их достоверность.

Таким образом, применение разработанного алгоритма на основе модифицированного метода наименьших квадратов позволяет производить оценку координат воздушных судов в многопозиционной системе наблюдения с высокой точностью при случайном характере оцениваемого вектора состояния и ошибок измерения.

Библиографический список

- Измерение координат источников радиоизлучения многопозиционной пассивной разностно-дальномерной системой произвольной конфигурации / Б. В. Матвеев, В. П. Дубыкин, Д. Ю. Крюков [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10, № 5. С. 114-119. EDN SWENBV.
- Кондратьев В. С. Многопозиционные радиотехнические системы / В. С. Кондратьев, А. Ф. Котов, Л. Н. Марков; Под ред. проф. В.В. Цветнова. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
- Лаптенко С. А. Перспективные системы наблюдения как средство повышения эффективности управления воздушным движением / С. А. Лаптенко, Р. Б. Пергаменцев, С. Ш. Шарипов // Научные горизонты. 2019. № 4(20). С. 236-243. EDN ZQYFRJ.
- Михеев М. Д. Многопозиционные системы наблюдения, как перспективные средства наблюдения в авиации / М. Д. Михеев, Р. О. Мешалов // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем "РАДИОИНФОКОМ-2021": СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ V МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ, Москва, 15-19 ноября 2021 года. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2021. С. 95-97. EDN DYVHCV.
- Монаков А. А. Алгоритм оценки координат объектов для систем мультилатерации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018а. № 4. С. 38-46. DOI 10.32603/1993-8985-2018-21-4-38-46. EDN VBNQKS.
- Монаков А. А. Алгоритм оценки местоположения объекта в активных системах мультилатерации // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXIV Международной научно-технической конференции. В 5-и томах, Воронеж, 17–19 апреля 2018 года. Том 3. Воронеж: Общество с ограниченной ответственностью "Вэлборн", 2018в. С. 134-142. EDN MGJLAL.
- Монаков А. А. Модифицированный алгоритм Банкрофта для систем мультилатерации // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2018б. № 1. С. 50-55. EDN YWSQSD.
- Прохоров А. В. Анализ состояния и оценка возможности реализации средств многопозиционных систем наблюдения для аэродромных АС УВД / А. В. Прохоров,

Г. В. Столяров, Д. С. Бондарь // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2013. № 193. С. 63-69. EDN RAULGZ.

Степанов О. А. Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. 198 с. EDN ZXOGVF.

Стратегия развития Аэронавигационной системы Российской Федерации до 2030 года. Комплексная программа развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года. Утв. Распоряжением Правительства РФ от 25.06.2022 г. № 1694-р.

Development A Method For Determining The Coordinates Of Air Objects By Radars With The Additional Use Of Multilateration Technology / H. Khudov, O. Serdiuk, P. Mynko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 5, № 9-113. Pp. 6-16. DOI 10.15587/1729-4061.2021.242935. EDN BMBXRT.

Leonardi M. Two efficient localization algorithms for multilateration / M. Leonardi, A. Mathias, G. Galati // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2009. № 1(3). Pp. 223-229. DOI 10.1017/s1759078709000245.

Wide Area Multilateration. Report on EATMP TRS 131/04. Version 1.1. / W. H. L. Neven, T. J. Quilter, R. Weedon, R. A. Hogendoorn // National Aerospace Laboratory NLR // [Электронный ресурс]. – 2004. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/surveillance-report-wide-area-multilateration-200508.pdf>. (дата обращения: 23.10.2025)

Onalaja O. Ultra-widebandbased multilateration technique for indoor localization / O. Onalaja, M. Adjrad, M. Ghavami // IET Communications. 2014. № 8(10). Pp. 1800-1809.

Skrypnik O. Features of working areas of multilateration systems / O. Skrypnik, A. Shegidevich // The Aviation Herald. 2019. № 1(1). Pp. 10-16.

Stefanski J. TDOA versus ATDOA for wide area multilateration System / J. Stefanski, J. Sadowski // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2018. № 1. DOI 10.1186/s13638-018-1191-5.

References

Khudov H., Serdiuk O., Mynko P. [et al.] (2021). Development a method for determining the coordinates of air objects by radars with the additional use of multilateration technology. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5(9(113)): pp. 6-16. DOI 10.15587/1729-4061.2021.242935.

Kondratiev V. S., Kotov A. F., Markov L. N. (1986). Multiposition radio systems. Moscow: *Radio and Communications*, 1986. 264 p. (In Russian)

Laptenok S. A., Pergamenev R. B., Sharipov S. Sh. (2019). Advanced surveillance systems as a means of improving the efficiency of air traffic control. *Scientific horizons*. 4(20): pp. 236-243. (In Russian)

Leonardi M., Mathias A., Galati G. (2009). Two efficient localization algorithms for multilateration. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 1(3): pp. 223–229. DOI 10.1017/s1759078709000245.

Matveev B. V., Dubykin V. P., Kryukov D. Yu., Kuryan Yu. S., Salikov A. A. (2014). Measuring the coordinates of radio emission sources by a multi-position passive difference-range measuring system of arbitrary configuration. *Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 10(5): pp. 114-119. (In Russian)

Mikheev M. D., Meshalov R. O. (2021). Multi-position surveillance systems as promising means of surveillance in aviation. *Actual problems and prospects for the development of radio engineering and infocommunication systems "RADIOINFO-COM-2021": COLLECTION OF SCIENTIFIC ARTICLES OF THE V INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE*. Moscow: MIREA - Russian Technological University, 2021. Pp. 95-97. (In Russian)

- Monakov A. A. (2018a). Algorithm for estimating the coordinates of objects for multilateration systems. *News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 4: pp. 38-46. DOI 10.32603/1993-8985-2018-21-4-38-46. (In Russian)
- Monakov A. A. (2018b). Modified Bancroft algorithm for multilateration systems. *News of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 1: 50-55. (In Russian)
- Monakov A. A. (2018c). Algorithm for estimating the location of an object in active multilateration systems. *Radar, navigation, communication: Collection of works of the XXIV International scientific and technical conference*. Voronezh: Limited Liability Company "Velborn", 2018. 3: pp. 134-142. (In Russian)
- Neven W. H. L., Quilter T. J., Weedon R., Hogendoorn R. A. (2004). Wide Area Multilateration. Report on EATMP TRS 131/04. Version 1.1. *National Aerospace Laboratory NLR*. Available at: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/surveillance-report-wide-area-multilateration-200508.pdf> (accessed 23 October 2025).
- Onalaja O., Adjrad M., Ghavami M. (2014). Ultra-widebandbased multilateration technique for indoor localisation. *IET Communications*. 8(10): 1800-1809. (In English)
- Prokhorov A. V., Stolyarov G. V., Bondar D. S. (2013). Analysis of the state and assessment of the possibility of implementing multi-position surveillance systems for airfield automated control systems. *Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 193: pp. 63-69. (in Russian)
- Skrypnik O., Shegidevich A. (2019). Features of working areas of multilateration systems. *The Aviation Herald*. 1(1): pp.10-16. (In English)
- Stefanski J., Sadowski J. (2018). TDOA versus ATDOA for wide area multilateration System. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 1. DOI 10.1186/s13638-018-1191-5. (In English)
- Stepanov O. A. (2017). Methods of processing navigation measurement information. St. Petersburg: *ITMO University*, 2017. 196 p. (In Russian)
- Strategy for the Development of the Air Navigation System of the Russian Federation until 2030. Comprehensive Program for the Development of the Air Transport Industry of the Russian Federation until 2030. Approved by RF Government Order No. 1694-r of June 25, 2022. (In Russian)