

УДК 621.396.969.34

ВОПРОСЫ ИЗБЫТОЧНОСТИ В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА РАЗНОСТНО-ВРЕМЕННЫМ МЕТОДОМ

А.О. МАШОШИН

В статье рассмотрены основные методы решения уравнений с избыточностью для последующего моделирования наземной многопозиционной системы как части системы анализа аэронавигационных данных. Рассмотрены такие математические модели, как метод наименьших квадратов и метод рядов Тейлора. Произведено математическое моделирование с учетом случайных факторов, влияющих на результат работы системы. Определены факторы, оказывающие наибольшее влияние на точностные характеристики наземной многопозиционной системы, проведен сравнительный анализ математических моделей.

Ключевые слова: АЗН-В, информационная безопасность, РВП, линейный МНК, метод рядов Тейлора.

ВВЕДЕНИЕ

Автоматическое зависимое наблюдение-вещание (АЗН-В, ADS-B) и многопозиционные системы наблюдения рассматриваются как наиболее перспективные в будущей системе ОрВД России [1, 2], поскольку они обеспечивают реализацию разрабатываемых в ИКАО новых концепций организации воздушного движения (рис. 1). Система АЗН-В в первую очередь нацелена на повышение безопасности полетов ввиду того, что улучшается осведомленность о воздушной обстановке всех участников воздушного движения. Отличительной особенностью данной системы является передача информации о местоположении без предварительного запроса, в постоянном режиме в течение всего полета.

Однако проведенные недавно исследования [3–5] показали, что благодаря открытости используемого формата данных, отсутствию аутентификации и передачи данных без шифрования может быть произведено злоумышленное внедрение ложных целей в отображаемую аэронавигационную обстановку. В западной литературе [10] данная атака определяется как spoofing-атака (атака подмены).

Поскольку данная атака направлена на достоверность данных АЗН-В, необходимо осуществить проверку поступающей информации на истинность для ее последующей фильтрации либо внедрить механизмы аутентификации в существующий протокол АЗН-В.

В данной работе рассмотрен способ отражения spoofing-атаки с помощью дополнительного определения местоположения воздушного судна (ВС), что по сути является проверкой информации АЗН-В на истинность (рис. 2, 3). Поскольку принцип действия системы АЗН-В основан на передаче данных в активном режиме без осуществления предварительного запроса, то для проверки их достоверности был предложен гиперболический метод, основанный на расчете разностей времен прихода (РВП) сигнала. С помощью данного метода происходит пеленгация источника сигнала АЗН-В группой базовых станций (БС). В качестве БС используются приемники АЗН-В. Такой подход не требует дополнительного оборудования (например, классических радиолокационных станций), что позволяет



Рис. 1. Типичная архитектура системы наблюдения в целях ОВД

осуществлять проверку данных АЗН-В в любых регионах, где данная атака может быть реализована.

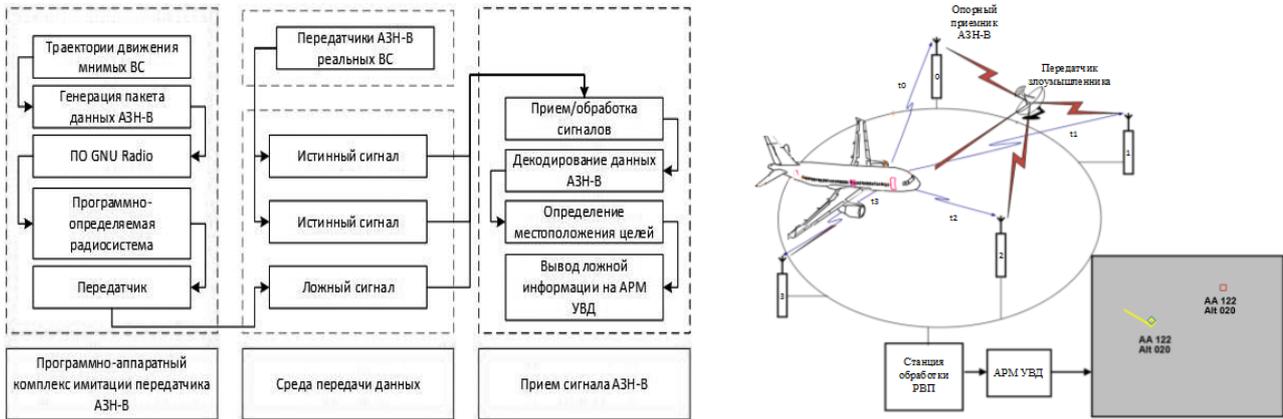


Рис. 2. Схема осуществления spoofing-атаки на АЗН-В и прототип системы противодействия

Соотношения (1) задают критерии (k_G, k_B), определяющие достоверность информации, а также необходимые условия точности:

$$\begin{aligned}
 k_G &= 2 \cdot |E_{AZH}|; & d_{AZH} &= d_{ист} + E_{AZH}; \\
 k_B &= |h_{min}|; & E_{РВП} &\leq E_{AZH}; & d_{РВП} &= d_{ист} + E_{РВП}; \\
 k_G &> d_{AZH} - d_{РВП}; & d_{min} &> E_{РВП} + E_{AZH}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь введены следующие обозначения: h_{min} – максимальная суммарная ошибка по высоте (90 м) [13]; d_{min} – максимально допустимое стандартное отклонение погрешности выдерживания траектории в боковой плоскости (550 м) [13]; E_{AZH} – точность АЗН-В (183 м) [14]; $E_{РВП}$ – необходимая точность гиперболического метода; d_{AZH} – расстояние от начала координат по АЗН-В; $d_{РВП}$ – расчетное расстояние от начала координат; $d_{ист}$ – истинное расстояние от начала координат.

Таким образом, если в полученном сообщении от АЗН-В передатчика указано положение 1 для ВС (рис. 4), расстояние до которого от расчетного не превышает величины двукратной ошибки E_{AZH} (366 м), то информация о координатах объекта полагается достоверной. В противном случае (положения ВС 2 и 3) такая информация будет считаться ложной. Такой подход позволяет, с одной стороны, избежать ошибок первого рода, благодаря чему сообщение ВС, содержащее координаты в пределах E_{AZH} (183 м), будет определено как истинное, а с другой стороны – избежать ошибок второго рода, пометив ложным сообщение ВС, содержащее координаты вне радиуса d_{min} (550 м).

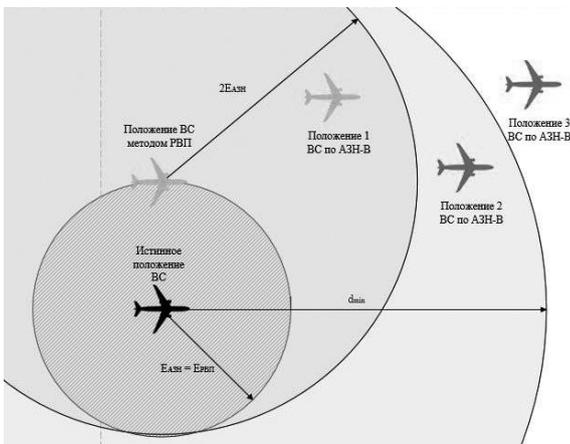


Рис. 3. Схема фильтрации в соответствии с критериями истинности (1)

Учитывая ограничение снизу на число ВС, их количество следует планировать с запасом, а это, в свою очередь, приводит к избыточности числа уравнений в задаче определения координат ВС. Для решения уравнения с избыточно-

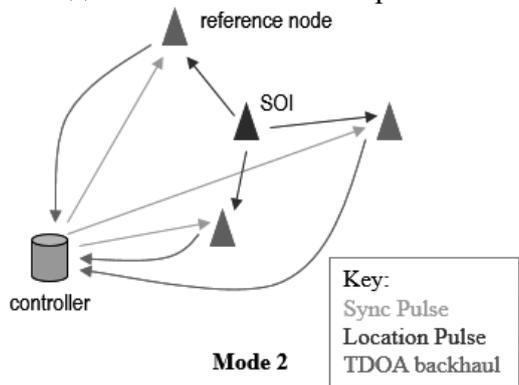
чество следует планировать с запасом, а это, в свою очередь, приводит к избыточности числа уравнений в задаче определения координат ВС. Для решения уравнения с избыточными данными будут рассмотрены линейный метод наименьших квадратов и метод рядов Тейлора.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Объектом исследования является система определения местоположения цели. При этом используется гиперболический (РВП) метод. Будем полагать, что БС расположены в вершинах правильного многоугольника.

Для точного определения момента времени прихода сигнала необходимо, чтобы группа БС имела единое время, то есть была синхронизирована с высокой точностью. Для достижения высокой точности могут применяться приемники временной синхронизации, например, СН-5831, среднеквадратическая погрешность которого составляет 15 нс [15].

Гиперболический метод основан на измерении разностей времен прихода сигналов (РВП) от объекта до пунктов приема, при этом существует 2 варианта работы данного метода. Первый метод используется в навигационных системах ЛОРАН-С, в этом случае источник производит самостоятельный расчет местоположения. Второй метод, который и был использован в



этой работе (рис. 5), применяется в системах экстренных служб (911/112) и расчет местоположения источника излучения происходит с помощью расчета РВП.

После определения РВП сигналов между парами БС ($T_{10}, T_{20}, T_{30}, T_{n0}$) производится расчет разностей расстояний ($d_{10}, d_{20}, d_{30}, d_{n0}$). Для определения местоположения источника радиоизлучения в пространстве с помощью пассивной РТС с фиксированной базой гиперболическим методом необходимо знать результаты независимых измерений двух разностей расстояний, для чего

требуется как минимум три пункта приема. Система уравнений, позволяющая определить координаты источника излучения, имеет вид

Рис. 4. Структурная схема применения гиперболического метода приема.

$$\begin{cases} \tilde{T}_{10} = T_1 - T_0 \Rightarrow \tilde{d}_{10} = \tilde{T}_{10} \cdot c, \\ \tilde{T}_{20} = T_2 - T_0 \Rightarrow \tilde{d}_{20} = \tilde{T}_{20} \cdot c, \end{cases} \text{ где } \begin{cases} d_{10} = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2} - \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \\ d_{20} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2} - \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \end{cases} \quad (2)$$

Положение источника радиоизлучения на плоскости определяется как точка пересечения двух гипербол с фокусами в точках расположения пунктов приема [16]. Иллюстрация к сказанному представлена на рис. 6.

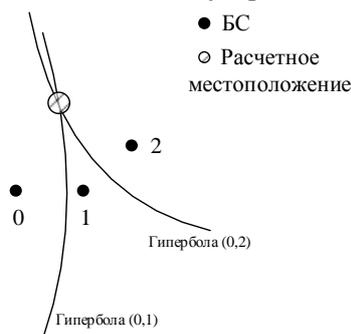


Рис. 5. Геометрическая иллюстрация к геометрическому методу определения местоположения

Моделирование системы определения местоположения цели проводилось в программно-прикладном пакете MATLAB. Для моделирования была задана функция

движения воздушного судна (ВС) от времени. В качестве поверхности для моделирования была выбрана декартова плоскость площадью 500 км² с расположенными на ней ВС в вершинах правильных многоугольников. На основе расстояния между ВС и ВС рассчитывались

временные задержки прихода сигналов на каждую из станций приема. К данным задержкам аддитивно добавлялась ошибка определения времени прихода сигнала. Затем рассчитывались разницы времен прихода сигналов для каждого последующего момента времени, алгоритм моделирования проиллюстрирован на рис. 6.

Таким образом, набор известных данных на входе состоит из информации о местоположении ВС, а также информации о РВП сигналов. После преобразования



входных данных и использования их согласно математическим моделям, на выходе были получены расчетные координаты ВС, данные значения сравнивались, и определялись ошибки для каждого из используемых математических методов или конфигураций приемных станций.

Рис. 6. Алгоритм моделирования

тематических методов или конфигураций приемных станций.

ЛИНЕЙНЫЙ МЕТОД МНК

Для успешного вычисления местоположения, оценки ошибки определения местоположения и, как следствие, успешной работы системы защиты информации от spoofing-атак была применена математическая модель гиперболической системы локации (разностно-дальномерный способ).

Пусть (x_s, y_s) будут координатами источника излучения, а (x_i, y_i) будут заранее известными координатами базовых станций, при $i = 1, 2, 3, \dots, M$, где M – конечное число базовых станций, принимающих участие в местонахождении источника излучения. Примем ВС № 1 в качестве опорной, тогда разности расстояний от пар ВС до источника сигнала будут определяться выражениями

$$\begin{aligned} \tau_{1i} &= \frac{1}{c} \|S - S_1\| - \frac{1}{c} \|S - S_i\| = \frac{1}{c} (D_1 - D_i); \quad d_{1i} = \tau_{1i} \cdot c = D_1 - D_i; \\ D_1^2 - D_i^2 &= \|S - S_1\|^2 - \|S - S_i\|^2 = x_1^2 - x_i^2 + 2x(x_1 - x_i) + y_1^2 - y_i^2 + 2y(y_1 - y_i), \\ D_1^2 - D_i^2 &= 2D_1^2 d_{1i} - d_{1i}^2, \end{aligned} \tag{3}$$

где c – скорость света; τ_{1i} – ВРП сигнала между i -й базовой станцией и опорной; d_{1i} – разности расстояний до источника сигнала (между i -й базовой станцией и опорной).

В соответствии с [12] выражение (3) примет вид

$$(x - x_1)(x_i - x_1) + (y - y_1)(y_i - y_1) + d_{1i} D_1 = \frac{1}{2} [(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2 - d_{1i}^2]. \tag{4}$$

Представим систему уравнений в матричной форме:

$$AX = b, \tag{5}$$

где

$$A = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & d_{12} \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & d_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_M - x_1 & y_M - y_1 & d_{1M} \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \\ D_1 \end{bmatrix} \quad b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - d_{21}^2 \\ (x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 - d_{31}^2 \\ \vdots \\ (x_M - x_1)^2 + (y_M - y_1)^2 - d_{M1}^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Учтем аддитивную ошибку определения времени прихода сигнала (ε)

$$AX = b + \varepsilon. \tag{7}$$

Произведем линейную аппроксимацию методом наименьших квадратов:

$$\hat{X} = \arg \min_x (AX - b)^T (AX - b) = (A^T A)^{-1} A^T b = A^+ b. \tag{8}$$

Метод рядов Тейлора

Разложение в ряд Тейлора может быть использовано для решения гиперболических уравнений. Обладая множеством накопленных данных о разностях времен прихода, данный метод подразумевает использование начального приближения и вычисляет отклонение оценки определения местоположения.

Уравнение (3) может быть переписано как функция:

$$f_i(x, y) = \sqrt{(x - X_{i+1})^2 + (y - Y_{i+1})^2} - \sqrt{(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2}, \tag{9}$$

где $i = 1, 2, \dots, N - 1$.

Пусть t_i будет временем приема сигнала БС i , тогда

$$f_i(x, y) = d_{i+1,1} + \varepsilon_{i+1,1}, \tag{10}$$

где

$$d_{i+1,1} = c \cdot (t_{i+1} - t_1); \tag{11}$$

ε – ошибка определения разности расстояний с ковариацией R .

Пусть (x_0, y_0) – начальное приближение координат цели, тогда

$$x = x_0 + \delta_x; \quad y = y_0 + \delta_y. \tag{12}$$

Разложив выражение (9) в ряд Тейлора, согласно [11], получаем:

$$f_{i,0} + a_{i,1}\delta_x + a_{i,2}\delta_y \approx d_{i+1,1} + \varepsilon_{i+1,1} \quad (13)$$

$$\begin{cases} f_{i,0} = f_i \cdot (x_0, y_0), \\ a_{i,1} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial x} \right|_{x_0, y_0} = \frac{X_1 - x_0}{d_1} - \frac{X_{i+1} - x_0}{d_{i+1}}, \\ \hat{d}_i = \sqrt{(x_0 - X_i)^2 + (y_0 - Y_i)^2}, \\ a_{i,2} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial y} \right|_{x_0, y_0} = \frac{Y_1 - y_0}{d_1} - \frac{Y_{i+1} - y_0}{d_{i+1}}. \end{cases} \quad (14)$$

Соотношение (13) может быть переписано в матричном виде:

$$A\delta = D + \varepsilon, \quad (15)$$

где

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \\ \vdots & \vdots \\ a_{N-1,1} & a_{N-1,2} \end{bmatrix}; \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} \hat{d}_{2,1} - f_{1,0} \\ \hat{d}_{3,1} - f_{2,0} \\ \vdots \\ \hat{d}_{N,1} - f_{N-1,0} \end{bmatrix}; \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{2,1} \\ \varepsilon_{3,1} \\ \vdots \\ \varepsilon_{N,1} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Тогда взвешенная оценка методом наименьших квадратов будет равняться

$$\delta = [A^T R^{-1} A]^{-1} \cdot A^T R^{-1} D, \quad (17)$$

где R – ковариационная матрица ошибок, определяемая в соответствии с [9] как

$$R = M(\varepsilon) \cdot \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0.5 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0.5 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Итерации продолжаются до тех пор, пока девиация x и y не станет пренебрежительно малой. Метод рядов Тейлора дает точные результаты в случае если начальное приближение выбрано верно [8]. В качестве начального приближения может использоваться как плановая информация, так и информация, получаемая от других источников.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Ошибки в оценке положения ВС порождались ошибками оценки времени прихода сигнала, которые для каждой БС были независимыми и в проведенном эксперименте полагались равномерно распределенными от 0 до 15 нс. Количество БС варьировалось от 4 до 8.

Для решения системы уравнений методом Тейлора использовалось 10 итераций, начальное приближение выбиралось случайно в радиусе 20 км (максимальная ширина воздушного коридора [17]) от истинного положения ВС. Поскольку траектория движения ВС непрерывна, для

последующих моментов времени в качестве начального приближения выбиралось расчетное местоположение ВС в предыдущий момент времени.

Для оценки точности определения местоположения для каждого метода рассчитывалось его СКО, определяемое по формуле

$$D(t) = M[(x(t) - \hat{x}(t, \omega))^2 + (y(t) - \hat{y}(t, \omega))^2]; \quad \sigma(t) = \sqrt{D(t)} \quad (24)$$

где (x, y) – реальные координаты объекта, (\hat{x}, \hat{y}) – расчетные координаты объекта, M – мат. ожидание, ω – элементарное событие.

Для заданной траектории движения рассчитывались несколько вариантов определения местоположения в соответствии с числом БС. Результаты расчетов приведены на рис. 7 и 8.

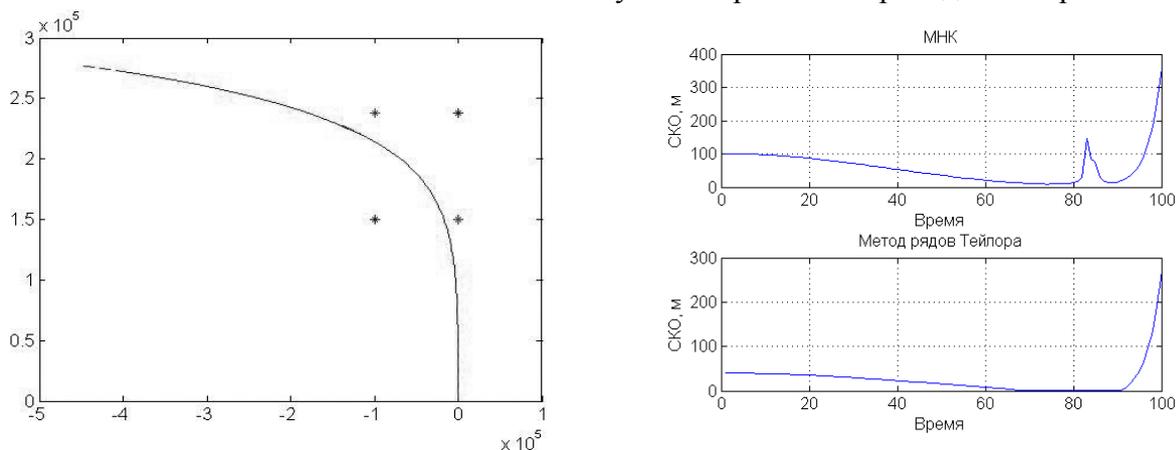


Рис. 7. Расчетная траектория ВС для 4-х БС и сравнение СКО ошибки для МНК и метода рядов Тейлора

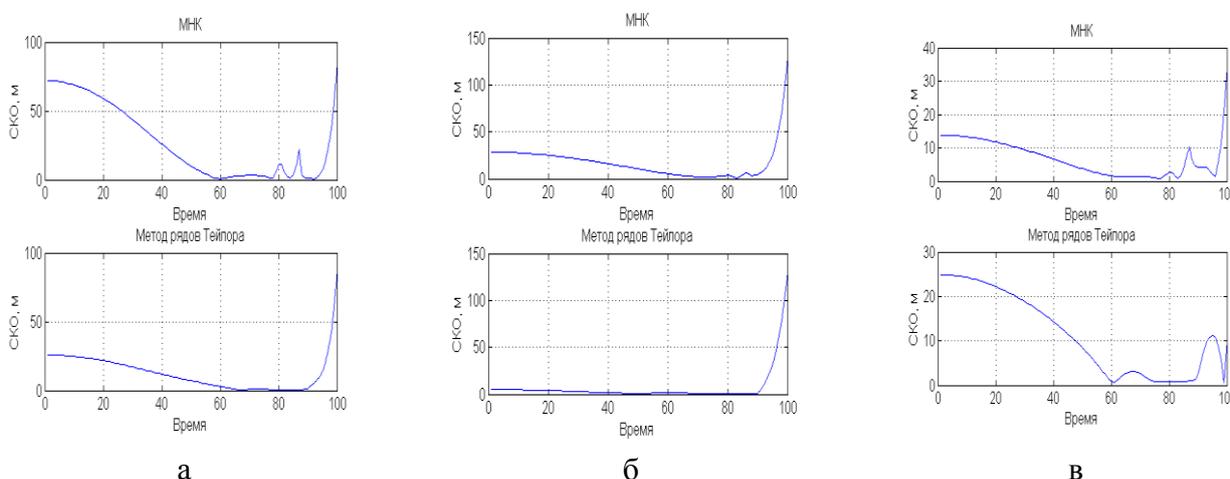


Рис. 8. СКО для МНК и метода рядов Тейлора для 5-ти (а), 6-ти (б) и 8-ми (в) БС, соответственно

Как видно из приведенных графиков, наименьшее СКО наблюдается от 80 до 90 секунды – время прохождения ВС через область группы БС.

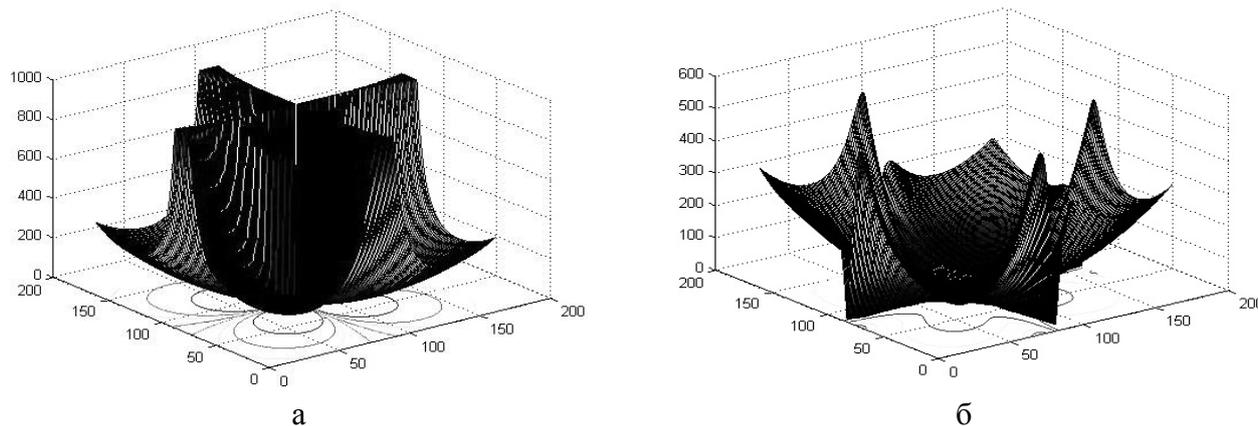


Рис. 9. Поверхность ошибок (СКО, м) при 4-х БС для МНК (а) и метода рядов Тейлора (б)

При четырех БС ошибки МНК в несколько порядков превышают ошибки, возникшие в результате определения местоположения методом рядов Тейлора (рис. 10). Этим объясняются всплески ошибок МНК на рис. 8 и 9.

При числе БС от 4 до 6-ти метод рядов Тейлора показывает наилучшие результаты.

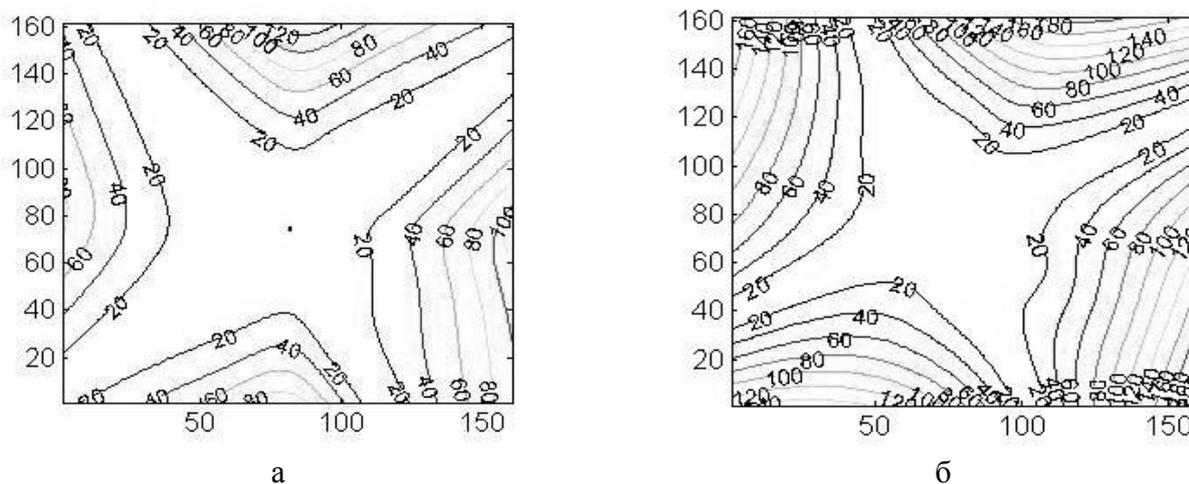


Рис. 10. Контурный график ошибок при 8-ми БС для МНК (а) и метода рядов Тейлора (б)

При неравномерных ошибках на БС и/или для группы из восьми БС, точность определения местоположения методом рядов Тейлора становится ниже, чем для МНК (рис. 11).

Проведенный имитационный эксперимент позволил выявить следующие особенности применения МНК и метода рядов Тейлора.

1. При количестве БС от 4 до 6-ти метод рядов Тейлора в задаче определения местоположения ВС является наиболее точным (на 15–40 % точнее МНК, в зависимости от состава группы БС).

2. При количестве БС от 8-ми и более метод рядов Тейлора показывает одинаковые либо более худшие точностные характеристики по сравнению с МНК.

3. При неравномерных ошибках (отличающихся в несколько раз) определения момента времени прихода сигналов, МНК показывает более точные результаты (количество БС больше 6).

4. Для метода рядов Тейлора СКО при числе БС от 4 до 8-ми гарантированно меньше критерия точности $E_{РВД}$ в радиусе 210 км от каждой из БС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция создания и развития Аэронавигационной системы России (одобрена на заседании Правительства Российской Федерации от 4 октября 2006 г.). [Электронный ресурс] URL: www.atminst.ru/upfiles/concept.pdf
2. Концепция модернизации и развития Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (утверждена 22 февраля 2000 г. № 144). [Электронный ресурс] URL: www.consultant.ru/document/consdoc_LAW_26256
3. Identification of ADS-B system vulnerabilities and threats, Australasian Transport Research Forum 2010 Proceedings, 29 September – 1 October 2010.
4. **McCallie D.L.** Exploring potential ads-b vulnerabilites in the faa’s nextgen air transportation system. Major, USAF AFIT/ICW/ENG/11-09, 2011.
5. **Costin A.** Ghost in the Air (Traffic): On insecurity of ADS-B protocol and practical attacks on ADS-B devices, Aur’elien Francillon, EURECOM, 2012.
6. **Smith A., Cassell R., Breen T., Hulstrom R., Evers C.** Rannoch Corporation, Methods to provide system-wide ADS-B back-up, validation and security, Alexandria, VA, 25th Digital Avionics Systems Conference, IEEE, October 15, 2006.
7. **Yang K., An J., Xu Zh.** A Quadratic Constraint Total Least-squares Algorithm for Hyperbolic Location // I.J. Communications. Network and System Sciences. 2008. Vol. 2. Pp. 105–206.
8. **Aatique M.** Evaluation of TDOA techniques for position location in CDMA systems. Virginia Polytechnic Institute and State University, September 1997.
9. **Chan Y.T.** A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location. IEEE Transactions on signal processing. Vol. 42. № 8. August 1994.
10. **Kovell B.** A Comparative Analysis of ADS-B Verification Techniques. University of Colorado, 2014.
11. **Foy W.H.** Position-location solutions by Taylor-series estimation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1976. No. 12 (2). Pp. 187–194.
12. **Smith J.O., Abel J.S.** Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1987. Vol. 35. No. 12. Pp. 1661–1669.
13. ICAO Manual on Implementation of a 300m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive, Doc 9574, ICAO, Second Edition – 2001.
14. Guidance Material on Comparison of Surveillance Technologies (GMST), ICAO, Edition 1.0 – September 2007.
15. <http://navis.ru/ru/katalog/grazhdanskoe-naznachenie/vremennaya-sinhronizaciya/sn-5831> – Конструкторское бюро навигационных систем НАВИС.
16. **Льонг Ч.В.** Гибридные алгоритмы оценивания координат источника радиоизлучения с применением неподвижного и подвижного пунктов приема. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Рязань: Рязанский Государственный Радиотехнический Университет, 2014.
17. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации, Постановление Правительства Российской Федерации от 11 марта 2010 г. N 138, г. Москва. [Электронный ресурс] URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98957

**REDUNDANCY IN TDOA METHOD
OF AIRCRAFT POSITION ESTIMATION****Mashoshin A.O.**

The paper deals with the main methods for solving equations with redundancy. It is subsequently used for modelling the ground many-positional system as a part of a system for analysis of air navigation data as a whole. In particular, the least square method and the Taylor series method are modelled taking into account the impact of stochastic factors influencing the system output. The factors with maximal effect on the accuracy of the functioning of the ground many-positional system are determined; a comparative analysis of the methods is carried on.

Key words: ADS-B, TDOA, Information Security, Least Squares, Taylor series.

REFERENCES

1. The concept of creation and development of Russian Air Navigation System (approved at a government meeting on October 4, 2006). URL: www.atminst.ru/upfiles/concept.pdf
2. The concept of modernization and development of the Unified Air Traffic Management System of the Russian Federation (approved on February 22, 2000. № 144). URL: www.consultant.ru/document/consdoc_LAW_26256
3. Identification of ADS-B system vulnerabilities and threats, Australasian Transport Research Forum 2010 Proceedings, 29 September – 1 October 2010.
4. Exploring potential ads-b vulnerabilities in the FAA's nextgen air transportation system, Donald L. McCallie, Major, USAF AFIT/ICW/ENG/11-09, 2011.
5. **Costin A.** Ghost in the Air (Traffic): On insecurity of ADS-B protocol and practical attacks on ADS-B devices. Aurélien Francillon, EURECOM, 2012.
6. **Smith A., Cassell R., Breen T., Hulstrom R., Evers C.** Methods to provide system-wide ADS-B back-up, validation and security. Rannoch Corporation, Alexandria, VA, 25th Digital Avionics Systems Conference, IEEE, October 15, 2006.
7. **Yang K., An J., Xu Zh.** A Quadratic Constraint Total Least-squares Algorithm for Hyperbolic Location. IJ. Communications, Network and System Sciences. 2008. Vol. 2. Pp. 105-206.
8. **Aatique M.** Evaluation of TDOA techniques for position location in CDMA systems. Virginia Polytechnic Institute and State University, September 1997.
9. **Chan Y.T.** A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location. IEEE Transactions on signal processing. Vol. 42. No. 8. August 1994.
10. **Kovell B.** A Comparative Analysis of ADS-B Verification Techniques. University of Colorado, 2014.
11. **Foy W.H.** Position-location solutions by Taylor-series estimation. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1976. Vol. 12. No. 2. Pp. 187–194.
12. **Smith J.O., Abel J.S.** Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Vol. 35. No. 12. Pp. 1661–1669. 1987.
13. Manual on Implementation of a 300m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive, Doc 9574, ICAO, Second Edition – 2001.
14. Guidance Material on Comparison of Surveillance Technologies (GMST), ICAO, Edition 1.0 – September 2007.
15. <http://navis.ru/ru/katalog/grazhdanskoe-naznachenie/vremennaya-sinhronizaciya/sn-5831> – Design office NAVIS navigation systems.
16. **Luong V.Ch.** Hybrid algorithms estimating the coordinates of the radio source with the fixed and mobile collection points, thesis for the degree of candidate of technical sciences. Ryazan: Ryazan State Radio Engineering University, 2014.
17. Federal Rules of using the airspace of the Russian Federation, Resolution of the Government of the Russian Federation N 138, March 11, 2010, Moscow. URL: www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98957

Машошин Антон Олегович, 1991 г.р., окончил МГТУ ГА (2014), аспирант МГТУ ГА кафедры ОРТЗИ, область научных интересов – защита информации в системе АЗН-В, электронный адрес: tonches918@gmail.com.