

УДК 519.68:15:681.5

В.М. Гриняк

Владивостокский государственный университет экономики и сервиса
Владивосток. Россия

Обработка навигационных данных при решении задачи выставки многопозиционной системы наблюдения*

Работа посвящена проблеме построения систем наблюдения на основе двухкоординатных радиолокационных станций кругового обзора. В статье обсуждается постановка и подходы к решению задачи выставки (глобальной и местной координатной привязки) многопозиционной системы, предназначенной для наблюдения как морских, так и воздушных объектов, движущихся над акваторией. Выделено три типа систем: радарная цепочка (несколько радиолокационных станций, передающих обслуживаемые объекты последовательно от одной станции к другой), централизованная (несколько РЛС, объединенных в сеть, информация от которых стекается в единый центр управления движением) и транспондерная (централизованная система, способная дополнительно использовать данные Автоматической идентификационной системы АИС). Сформулированы модельные представления задачи выставки, основанные на конечномерных представлениях метода наименьших квадратов. В силу исходной нелинейности задачи предлагается ее линеаризация около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления о состоянии системы наблюдения. При этом уделено внимание вопросу разрешимости задачи с точки зрения трех взаимосвязанных понятий: принципиальной разрешимости (наблюдаемости), разрешимости в условиях инструментальных погрешностей измерений и разрешимости в условиях конечной точности вычислений на ЭВМ. Первый аспект разрешимости интерпретируется полнотой ранга соответствующей системы линейных алгебраических уравнений, второй – обусловленностью задачи и сходимостью итерационной процедуры оценивания; для последнего сформулировано условие достаточного типа, учитывающее относительную точность представления вещественных чисел в ЭВМ. Приведены результаты численного моделирования задачи для типичных ситуаций, продемонстрирована разрешимость задачи как для двух-, так и для трехкоординатного случая. Показано, что достижимые точности выставки достаточны для качественного решения как 2D, так и 3D навигационных задач.

Ключевые слова и словосочетания: управление движением, воздушный объект, многопозиционная система, радар, выставка, измерение, высота объекта.

Гриняк Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий и систем Института информационных технологий; e-mail: Viktor.Grinyak@vvsu.ru.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект 15-08-00234.

V.M. Grinyak

Vladivostok State University of Economics and Service
Vladivostok, Russia

Measurement data processing for adjustment of multiposition observation system

Current paper is about problem observation system based on two dimensional radar. The paper discusses the formulation of the problem of multiposition observation system adjustment (global and local coordinate binding). This system is used for marine and air target observation. Three types of systems have been identified: a radar chain (several radar stations that transmit the serviced objects in sequence from one station to another), centralized (several radars connected to the network, information from which flows into a single traffic control center) and a transponder (a centralized system that can additionally use the data of the Automatic Identification System AIS). Model representations of the exhibition problem based on finite-dimensional representations of the method of least squares are formulated. Because of the initial nonlinearity of the problem, it is proposed to linearize it about some support solution that characterizes the a priori notions of the state of the observation system. Attention is paid to the problem of solvability of the problem from the point of view of three interrelated concepts: fundamental solvability (observability), solvability in conditions of instrumental measurement errors and solvability under conditions of finite accuracy of computation on a computer. The first aspect of solvability is interpreted by the completeness of the rank of the corresponding system of linear algebraic equations, the second by the conditionality of the problem and the convergence of the iterative estimation procedure; For the latter, a condition of sufficient type that takes into account the relative accuracy of the representation of real numbers in a computer is formulated. The results of numerical simulation of the problem for typical situations are presented, the solvability of the problem is demonstrated for both the two- and the three-coordinate case. It is shown that achievable exhibition accuracy is sufficient for a high-quality solution of both 2D and 3D navigation problems.

Keywords: traffic control, air target, multiposition system, radar, adjustment, measurement, target height.

Введение

Многопозиционные системы наблюдения являются важнейшим объектом приложения достижений современных информационных технологий и играют значительную роль в обеспечении навигации движущихся объектов различного типа [1–3]. Одной из наиболее актуальных функций таких систем является обеспечение безопасности движения в сложных географических районах. Если иметь в виду проблему обеспечения безопасности движения на море (преимущественно в этом контексте следует рассматривать настоящую работу), то такими важнейшими районами являются проливы, акватории морских портов, районы морской нефте- и газодобычи и т.п. [4, 5].

Построение и функционирование систем наблюдения связано с решением целого ряда специфических задач, обеспечивающих их целевое назначение. Так, функциональным ядром любой системы наблюдения являются навигационные

задачи, связанные с определением координат обслуживаемых объектов. При построении многопозиционных систем также имеют место навигационные задачи, но особого рода – так называемые задачи выставки, т.е. обеспечивающие привязку элементов многопозиционной системы к базовым системам отсчёта (в которых при последующей эксплуатации систем и оцениваются параметры движения объектов). В зависимости от системы отсчёта принято различать задачи глобальной и относительной выставки.

В настоящее время существует несколько подходов к решению проблемы выставки, выбор в пользу того или иного из них определяется базисной функцией системы и принятым механизмом комплексирования измерительной информации.

Так, в ряде акваторий (в своё время такие системы действовали в порту Роттердам, на Нижней Эльбе, Нижнем Везере и др.) получили распространение многопозиционные радиолокационные системы типа «радарная цепочка». Такие системы представляют собой несколько радиолокационных станций (РЛС) кругового обзора, предназначенных для обслуживания протяжённых водных путей с интенсивным движением, поддерживающих между собой радиосвязь и передающих обслуживаемые объекты последовательно от одной станции к другой. Поскольку наблюдение объектов отдельными РЛС в подобных системах происходит независимо друг от друга, то их (РЛС) выставляют также независимо, привязывая к геодезическим реперным точкам или согласно показаниям систем спутниковой навигации. Точности такой выставки оказывается вполне достаточно для решения основных задач радарной цепочки [5].

Другим типом многопозиционных радиолокационных систем являются централизованные системы (к ним относится большинство систем наблюдения, действующих в настоящее время в морских портах нашей страны и за рубежом) [6]. Такие системы представляют собой несколько РЛС, объединённых в сеть, информация от которых стекается в единый центр управления движением; при этом наблюдение объектов производится по возможности несколькими станциями и по этому признаку централизованные системы можно назвать «настоящими» многопозиционными системами в современном понимании этого термина [7] (в отличие от радарных цепочек, представляющих собой, по сути, несколько однопозиционных систем). В указанных условиях для достижения регламентируемой точности наблюдения необходима качественная совместная относительная выставка элементов системы в целом. Она проводится, как правило, на основании совместной обработки радиолокационных измерений по фиксированной группе объектов. Требуемая точность выставки зависит от типа целей, по которым система предназначена работать.

Наконец, качественно иным (и наиболее современным) типом многопозиционных являются транспондерные системы. Они сохраняют основные структурные принципы централизованных систем, но способные использовать (наряду с РЛС) дополнительную внешнюю (бортовую) информацию от специальных приёмо-передающих устройств – транспондеров (в настоящее время в этом качестве выступают главным образом транспондеры Автоматической идентификационной системы (АИС) [6]. В этом случае для максимально корректной и полной реализации нави-

рационных функций необходимы как относительная, так и глобальная совместная выставка и отдельных элементов, и системы в целом. Она может быть проведена, например, посредством комплексирования местной радиолокационной и глобальной спутниковой навигационной информации.

К основным достоинствам систем последнего типа (транспондерных) следует отнести высокую степень автоматизации и точность наблюдения, возможность реализации дополнительных сервисных функций, а систем первых двух типов – большую автономность.

В настоящей работе обсуждаются технологические особенности выставки многопозиционной системы наблюдения морской акватории централизованного или транспондерного типов, действующей на базе двухкоординатных радиолокаторов кругового обзора и предназначенной для наблюдения как морских, так и воздушных объектов [8].

Основные модельные представления и постановка задачи

Рассмотрим правую декартову систему координат $oxyz$, с осью oz , направленной в Зенит, осью oy , направленной (условно) на Север и осью ox , направленной, соответственно, на Восток. Пусть многопозиционная система наблюдения состоит из n радиолокационных станций с координатами $x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}$ ($i = \overline{1, n}$) и в поле её действия выделено m неподвижных объектов с координатами x_j, y_j, z_j ($j = \overline{1, m}$). Информационная ситуация пусть характеризуется N измерениями каждой станцией дальности и азимута каждого объекта. Тогда поставляемая системой РЛС навигационная информация может быть формализована mnN парами уравнений вида:

$$\begin{aligned} z_{rj}^{(i)} &= \sqrt{(x_j - x^{(i)})^2 + (y_j - y^{(i)})^2 + (z_j - z^{(i)})^2} + \xi_{rj}^{(i)}, \\ z_{\phi j}^{(i)} &= \arctg[(x_j - x^{(i)})^2 / (y_j - y^{(i)})^2] + \Delta\varphi^{(i)} + \xi_{\phi j}^{(i)}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m},$$

где $z_{rj}^{(i)}, z_{\phi j}^{(i)}$ – данные об измерении i -ой станцией дальности и азимута (соответственно) по j -му объекту, $\Delta\varphi^{(i)}$ – регулярная погрешность измерения азимута i -ой станцией (вызванная рассогласованием ориентации базовой системы отсчёта $oxyz$ и системы отсчёта реализуемой i -ой РЛС), $\xi_{rj}^{(i)}, \xi_{\phi j}^{(i)}$ – случайные инструментальные погрешности измерений дальности и азимута (некоррелированные, с нулевым средним и конечной дисперсией).

Целью решения задачи (1) является нахождение вектора s с компонентами $x_j, y_j, z_j, x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}, \Delta\varphi^{(i)}$ ($i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$) по N парам измерений $z_{rj}^{(i)}, z_{\phi j}^{(i)}$, который полностью определяет конфигурацию системы наблюдения централизованного типа. Таким образом, модель (1) может быть принята в качестве базовой для решения задачи выставки такой системы.

Что касается систем транспондерного типа, то их элементы должны быть привязаны не относительно, а к глобальной (в данном случае – географической) системе координат. В настоящее время такая привязка выполняется, как правило, с использованием данных спутниковых навигационных систем второго поколения (GPS, ГЛОНАСС) [9, 10]. Эти системы в настоящее время способны обеспечить точность определения местоположения до 5–10 м. Указанная точность вполне достаточна для выставки системы наблюдения, построенной на базе двухкоординатных РЛС и работающей по морским целям. Однако для систем наблюдения с навигационными функциями расширенного диапазона, например, работающим также и по воздушным объектам (находящимся над акваторией в зоне действия системы), такая выставка является слишком грубой [11, 12].

Нужная точность выставки, однако, может быть достигнута. Одним из путей к этому является использование специальных дифференциальных режимов работы глобальных спутниковых навигационных систем, позволяющих, наряду с определением глобальных координат, с высокой точностью (до нескольких десятков сантиметров) определять расположение нескольких объектов по отношению друг к другу. Другой путь повышения качества решения проблемы выставки – применение специальных алгоритмов комплексирования глобальной (спутниковой) и локальной (радиолокационной) навигационной информации. Технологические аспекты применения данного способа и являются главным предметом настоящей статьи.

В свете вышесказанного проблема выставки транспондерной системы наблюдения может быть, таким образом, естественно разделена на две задачи. Во-первых, задачу относительной выставки элементов по типу централизованной системы (1), обеспечивающей в дальнейшем работу системы в автономном режиме. Во-вторых, для поддержки транспондерного режима – задачу привязки системы $o_{\text{хуз}}$ к глобальной системе $\psi\lambda R$ (ψ – широта, λ – долгота, R – расстояние до центра Земли).

Концепция решения

Рассмотрим задачу (1). При решении задач такого типа (по сути – обратных задач) можно использовать два методологических подхода. Во-первых, непосредственную обработку данных всех $2mnN$ измерений, и, во-вторых, обработку измерений с предварительным осреднением согласно правилу

$$z_{rj}^{(i)} = \sum_{k=1}^N z_{rj}^{(i)}(k) / N, \quad z_{\phi j}^{(i)} = \sum_{k=1}^N z_{\phi j}^{(i)}(k) / N,$$

где $z_{rj}^{(i)}(k)$, $z_{\phi j}^{(i)}(k)$ – результат k -го измерения дальности и азимута i -ой станцией по j -му объекту. Второй подход, очевидно, предпочтительнее (во всяком случае, в данной задаче), так как позволяет перейти от системы $2mnN$ уравнений к $2mn$ уравнениям.

Что касается методов решения системы (1) с числом уравнений $2mn$, то в ряде простейших случаев, когда $2mn = \dim(s)$ (например, при $n=2$, $m=1$, $s=(x_1, y_1, x^{(2)}, y^{(2)})$) она вполне может быть разрешена аналитически как система алгебраических уравнений. При больших значениях m , n и $\dim(s)$, когда $2mn > \dim(s)$, для реше-

ния системы (1) может быть успешно применён метод наименьших квадратов с минимизацией функционала

$$J = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [((z_{rj}^{(i)} - \hat{z}_{rj}^{(i)})/\sigma_{rj}^{(i)})^2 + ((z_{\phi j}^{(i)} - \hat{z}_{\phi j}^{(i)})/\sigma_{\phi j}^{(i)})^2],$$

где $z_{rj}^{(i)}, z_{\phi j}^{(i)}$ – измеренные значения дальности и угла, $\hat{z}_{rj}^{(i)}, \hat{z}_{\phi j}^{(i)}$ – оцененные значения дальности и угла (при конкретных значениях \hat{s} – оценок искомого вектора), $\sigma_{rj}^{(i)}, \sigma_{\phi j}^{(i)}$ – значения соответствующих среднеквадратичных погрешностей измерений. При этом для анализа и решения задачи

$$\hat{s} = \arg \min_s J \quad (2)$$

целесообразно прибегнуть к методологически общему элементу решения многих нелинейных задач – линейаризации.

Линеаризация системы (1) около некоторого опорного решения, характеризующего априорные представления об искомым параметрах, позволяет привести её к следующей задаче «в малом»:

$$\begin{aligned} \delta z_{rj}^{(i)} &= \frac{x_j - x^{(i)}}{r_j^{(i)}} \delta x_j + \frac{y_j - y^{(i)}}{r_j^{(i)}} \delta y_j + \frac{z_j - z^{(i)}}{r_j^{(i)}} \delta z_j - \\ &- \frac{x_j - x^{(i)}}{r_j^{(i)}} \delta x^{(i)} - \frac{y_j - y^{(i)}}{r_j^{(i)}} \delta y^{(i)} - \frac{z_j - z^{(i)}}{r_j^{(i)}} \delta z^{(i)} + \xi_{rj}^{(i)}, \\ \delta z_{\phi j}^{(i)} &= \frac{y_j - y^{(i)}}{(x_j - x^{(i)})^2 + (y_j - y^{(i)})^2} \delta x_j - \frac{x_j - x^{(i)}}{(x_j - x^{(i)})^2 + (y_j - y^{(i)})^2} \delta y_j - \\ &- \frac{y_j - y^{(i)}}{(x_j - x^{(i)})^2 + (y_j - y^{(i)})^2} \delta x^{(i)} + \frac{x_j - x^{(i)}}{(x_j - x^{(i)})^2 + (y_j - y^{(i)})^2} \delta y^{(i)} + \delta \Delta \phi^{(i)} + \xi_{\phi j}^{(i)}, \\ &i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$r_j^{(i)} = \sqrt{(x_j - x^{(i)})^2 + (y_j - y^{(i)})^2 + (z_j - z^{(i)})^2}, \text{ или, в общем виде,}$$

$$\delta z = H \delta s + \xi. \quad (4)$$

Здесь δs – искомый вектор (с компонентами $\delta x_j, \delta y_j, \delta z_j, \delta x^{(i)}, \delta y^{(i)}, \delta z^{(i)}, \delta \Delta \phi^{(i)}$), δz – полный вектор невязок измерений (с учётом процедуры предварительного осреднения $\dim(\delta z) = 2mn$), H – матричный коэффициент, формируемый согласно равенствам (3) ($\dim(H) = 2mn \times \dim(s)$), ξ – вектор погрешностей измерений ($\dim(\xi) = 2mn$), причём введём обозначение $Q = M[\xi \xi^T]$ ($M[*]$ – оператор математического ожидания).

Функционал J примет для задачи (4) следующий вид:

$$J = (\delta z - \delta \hat{z})^T Q^{-1} (\delta z - \delta \hat{z}),$$

при этом решение задачи его минимизации (2) может быть записано следующей процедурной моделью

$$H^T Q^{-1} H \delta \hat{s} = H^T Q^{-1} \delta z. \quad (5)$$

Представление задачи (1) в виде (4) и (5) не только предоставляет конструктивный алгоритм её решения, но и даёт возможность априорного анализа свойств её решения, позволяет судить о разрешимости исходной задачи. При этом разрешимость задачи понимается как совокупность трёх связанных понятий [13, 14]: общесистемная разрешимость, или наблюдаемость по Калману; разрешимость при конечной точности модельных представлений (представления чисел в ЭВМ и инструментальных погрешностей, например, измерений) отождествляемая с понятием численной устойчивости; разрешимость проблемы ускорения вычислений.

В случае задачи (4) её общесистемная разрешимость определяется полнотой ранга матрицы H и не вырожденностью матрицы $H^T Q^{-1} H$. Что же касается ответа на вопрос об устойчивости процедуры (5) в условиях погрешностей вычислений (обусловленных конечностью разрядной сетки ЭВМ), то для этого имеет смысл обратиться к следующему условию достаточного типа [3]:

$$\mu < \mu^* \quad (6)$$

где μ – вычисленное значение числа обусловленности матричного оператора $H^T Q^{-1} H$ по отношению к его спектральной норме, а μ^* – некоторое критическое число, в частности, при решении задачи (5) с помощью ортогональных преобразований Хаусхолдера определяемое как [15]:

$$\mu^* = 1 / [\sqrt{u}(2u - 3)(4u + 27) + 1] \varepsilon_1,$$

где $u = \dim(s)$, ε_1 – относительная точность представления чисел в ЭВМ (например, при расширенной (extended, long double) точности ЭВМ IBM PC $\varepsilon_1 \approx 10-20$).

Обработка данных

Процедуру обработки измерительной информации при решении задачи выставки можно представить следующей схемой (рис. 1).

Заметим, однако, что при этом выделенные в ней этапы вовсе не обязательно реализуются как отдельные блоки в аппаратной части или в программном обеспечении – приведённая здесь схема просто представляет собой особый язык для представления уровня и способа обработки информации и их обсуждения.

На начальном этапе производится накопление данных измерений системой из n РЛС по m объектам. Измерения осредняются. Последующая обработка информации выполняется блоками: формирования системы уравнений (1), нахождения решения, комплексирования информации.

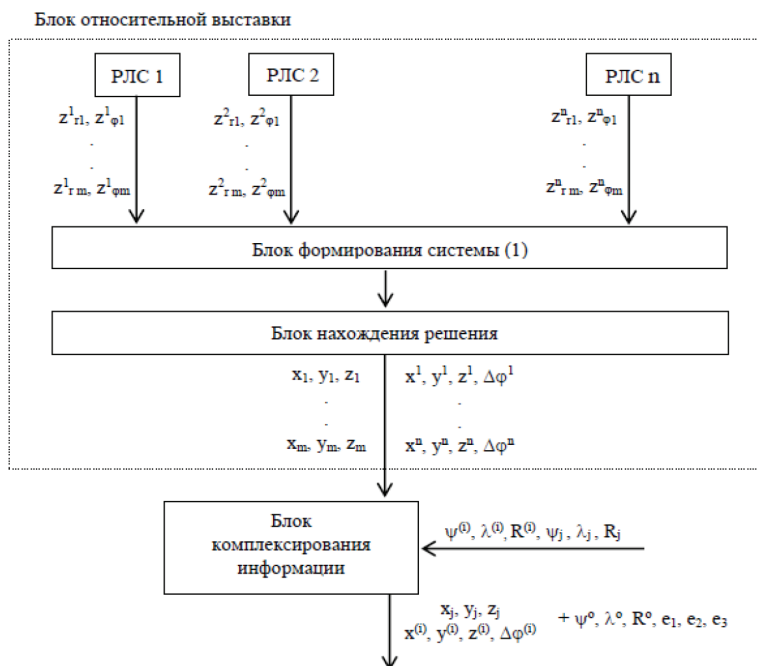


Рис. 1. Процедура обработки данных РЛС

Блок формирования системы (1). Полученная измерительная информация используется для формирования образа системы уравнений (1) в памяти вычислительного устройства.

Блок нахождения решения. С использованием описанной выше процедуры решение системы (1) можно представить следующей последовательностью действий:

- формирование первоначального опорного решения s системы (1) (из априорных представлений о расположении объектов и РЛС);
- линеаризация задачи возле выбранного опорного решения и формирование системы уравнений «в малом» (3) и (5);
- вычисление числа обусловленности μ матрицы $H^T Q^{-1} H$ системы (5) и сравнение его с вычисленным для конкретного метода решения и значений ϵ_1 критическим числом μ^* на предмет проверки условия (6);
- в случае выполнения условия (6) – решение системы уравнений (5) и «припасовка» найденных значений невязок δs к первоначальному опорному решению (по типу $s = s + \delta s$).

Данная последовательность повторяется необходимое количество раз (обычно 10–15 итераций бывает достаточно). Полученные на выходе данные о координатах и ориентациях станций $x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}, \Delta\varphi^{(i)}, i = \overline{1, n}$ полностью определяют конфигурацию многопозиционной системы наблюдения при её работе в автономном режиме.

Блок комплексирования информации. Для обеспечения корректной работы многопозиционной системы транспондерного типа необходимо, наряду с относительной, осуществить также глобальную выставку, которая в данном случае означает

привязку базовой системы координат $oxuz$ к географической системе $\psi\lambda R$. Такая привязка может быть осуществлена, например, с помощью GPS приёмников (или аналогичных приёмников Глонасс), соотнесённых с антеннами РЛС и/или наблюдаемыми объектами и предоставляющих информацию об их координатах $\psi^{(i)}, \lambda^{(i)}, R^{(i)}, \psi_{(j)}, \lambda_{(j)}, R_{(j)}$. Данные о координатах начала отсчёта системы $oxuz$ (значениях $\psi^{(o)}, \lambda^{(o)}, R^{(o)}$) и её ориентации в пространстве (направлениях ортов e_1, e_2 и e_3) получаются при этом посредством решения тривиальной геометрической задачи. Сбор и обработка спутниковой информации могут автоматизироваться с помощью GPS приёмников, реализованных в виде специальных плат с унифицированной интерфейсной шиной.

Таким образом, информация о координатах и ориентациях станций $x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}, \Delta\varphi^{(i)}, i = 1, n$ в системе отсчёта $oxuz$ и данные о расположении этой системы в пространстве географических координат $\psi^{(o)}, \lambda^{(o)}, R^{(o)}, e_1, e_2, e_3$ полностью определяют конфигурацию транспондерной многопозиционной системы наблюдения.

Ниже представлены результаты ряда вычислительных экспериментов, иллюстрирующие некоторые качества решения обсуждаемой задачи выставки многопозиционной системы в типичных ситуациях.

Результаты численного моделирования

Будем предполагать, что рассматриваемая система наблюдения состоит из двух береговых РЛС кругового обзора. Примем для них следующие свойства ошибок измерений: $\xi_{rj}^{(i)} \in [-6.25; 6.25]$ м, $\xi_{\varphi j}^{(i)} \in [-0.03^\circ; 0.03^\circ]$, причём ошибки распределены равномерно. Указанные значения интервалов являются типичными для многих современных РЛС (например, типа Raytheon) [6, 16].

2D задача выставки. Под 2D задачей выставки будем понимать выставку рассматриваемой многопозиционной системы наблюдения на плоскости oxy . Пусть система имеет следующую конфигурацию: $x^{(1)}=0, y^{(1)}=0, x^{(2)}=5000\text{ м}, y^{(2)}=0, \Delta\varphi^{(2)}=0$ и для проведения относительной выставки ею наблюдаются 3 объекта с координатами $x_1=2000\text{ м}, y_1=1000\text{ м}, x_2=3000\text{ м}, y_2=1000\text{ м}, x_3=4000\text{ м}, y_3=1000\text{ м}$. Первоначальные априорные представления о системе характеризуются следующими значениями ошибок: $\Delta x_j = 50\text{ м}, \Delta y_j = 50\text{ м}, \Delta x^{(2)} = 50\text{ м}, \Delta y^{(2)} = 50\text{ м}, \Delta[\Delta\varphi^{(2)}] = 5^\circ$. Таким образом, вектор искомых параметров задачи (1) имеет в данном случае следующий вид:

$$s = (x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x^{(2)}, y^{(2)}, \Delta\varphi^{(2)})^T.$$

Для указанных условий число обусловленности соответствующей задачи (5) равно в данном случае $\mu(H^T Q^{-1} H) \approx 5 \times 10^5$ (матрица $H^T Q^{-1} H$ предварительно нормируется по столбцам). При этом $\mu_* \approx 10^9$ для стандартной (float), $\mu_* \approx 10^{13}$ для удвоенной (double) и $\mu_* \approx 10^{17}$ для расширенной (extended) точности вычислений ЭВМ типа IBM PC. Таким образом, вычислительная устойчивость решения рассматриваемой задачи выставки во всех случаях надёжно гарантирована.

Что касается точности непосредственного определения искомых параметров, то представления о ней даёт рис. 2.

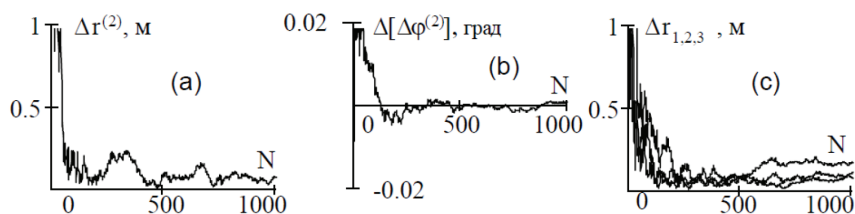


Рис. 2. Моделирование 2D задачи выставки

На рис. 2 показаны погрешности: определения положения второй станции (рис. 2a), определения рассогласования ориентации её системы отсчёта (рис. 2b) и определения координат наблюдаемых объектов (рис. 2c). Здесь $\Delta r^{(2)} = \sqrt{(x^{(2)} - \hat{x}^{(2)})^2 + (y^{(2)} - \hat{y}^{(2)})^2}$, $\Delta r_i = \sqrt{(x_i - \hat{x}_i)^2 + (y_i - \hat{y}_i)^2}$, $\Delta[\Delta\varphi^{(2)}] = \Delta\varphi^{(2)} - \Delta\hat{\varphi}^{(2)}$, N – число измерений. Видно, что погрешность представлений об относительном положении станций уменьшается до примерно 0,2 м, погрешность представлений об ориентации системы отсчёта уменьшается до 0,001°, погрешность представлений о расположении наблюдаемых объектов равна примерно 0,25 м.

3D задача выставки. Под 3D задачей выставки будем, соответственно, понимать выставку рассматриваемой многопозиционной системы в пространстве координат $охуз$. Пусть конфигурация системы характеризуется следующими значениями (если не оговорено другое): $x^{(1)} = 0$, $y^{(1)} = 0$, $z^{(1)} = 100$ м, $x^{(2)} = 5000$ м, $y^{(2)} = 0$, $z^{(2)} = 100$ м, $\Delta\varphi^{(2)} = 0$ и для проведения относительной выставки ею наблюдаются 3 объекта с координатами $x_1 = 2000$ м, $y_1 = 1000$ м, $z_1 = 0$, $x_2 = 3000$ м, $y_2 = 1000$ м, $z_2 = 0$, $x_3 = 4000$ м, $y_3 = 1000$ м, $z_3 = 0$ (то есть все объекты лежат на поверхности моря). Первоначальные априорные представления о системе характеризуются следующими значениями ошибок: $\Delta x_j = 50$ м, $\Delta y_j = 50$ м, $\Delta x^{(2)} = 50$ м, $\Delta y^{(2)} = 50$ м, $\Delta z^{(1)} = 50$ м, $\Delta z^{(2)} = -50$ м, $\Delta[\Delta\varphi^{(2)}] = 5^\circ$. Таким образом, вектор искомых параметров задачи (1) будет иметь в данном случае следующий вид:

$$s = (x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x^{(2)}, y^{(2)}, z^{(1)}, z^{(2)}, \Delta\varphi^{(2)})^T.$$

Результаты моделирования решения 3D задачи выставки в описанных условиях иллюстрирует рис. 3.

Так, на рис. 3f показаны значения числа обусловленности соответствующей задачи (5) для разных значений высоты станций. Видно, что для оговоренных высот ($z^{(1)} = 100$ м, $z^{(2)} = 100$ м) значение $\mu(H^T Q^{-1} H) \approx 5 \times 10^9$ (матрица $H^T Q^{-1} H$ предварительно нормируется по столбцам). Учитывая оговоренные выше критические значения μ_* , можно сделать вывод, что вычислительная устойчивость рассматриваемой 3D задачи выставки гарантируется только для вычислительного устройства удвоенной или расширенной точности. Что касается качества непосредственного определения искомых параметров, то видно, что погрешность представлений об относительном положении станций уменьшается до примерно 1 м (рис. 3a), погрешность представлений об ориентации системы отсчёта уменьшается до 0,03° (рис. 3b), погрешность

представлений о расположении наблюдаемых объектов равна примерно 1,5 м (рис. 3с), точность оценивания высот станций равна, примерно, 20 м (рисунки 3д и 3е).

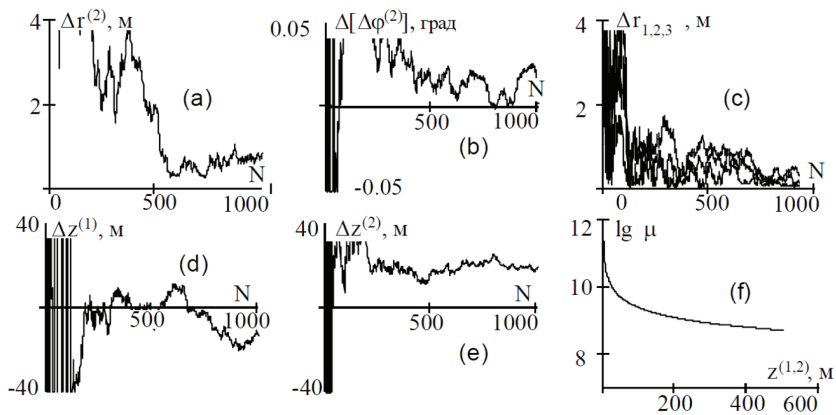


Рис. 3. Моделирование 3D задачи выставки

Как видно из приведённых графиков, переход от 2D к 3D задаче наблюдения приводит к некоторому ухудшению качества решения задачи относительной выставки по плоским координатам. Однако неплохая точность определения высот станций может, в свою очередь, быть использована для уточнения конфигурации системы путем решения 2D задачи. На рис. 4 показаны результаты решения 2D задачи выставки в условиях наличия погрешностей априорных представлений о высотах станций ($\Delta z^{(1)} = 20$ м, $\Delta z^{(2)} = -20$ м). Видно, что, хотя такие погрешности и влияют на качество решения задачи, они не очень существенны – ошибки оценивания искомых параметров повышаются по сравнению с идеальным случаем 2D задачи примерно в 2 раза (см. рисунки 2 и 4).

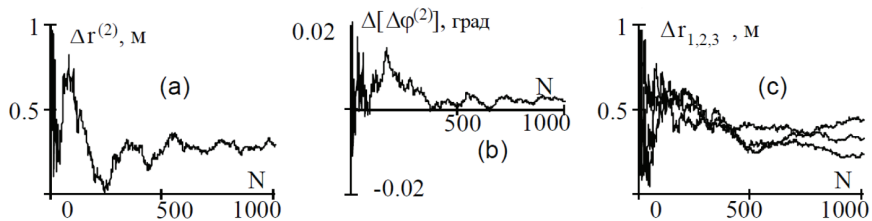


Рис. 4. Моделирование 2D задачи выставки в условиях погрешностей

Вывод о приемлемости тех или иных погрешностей выставки системы с точки зрения практики зависит от круга возложенных на неё задач. Так, для наблюдения системой двухкоординатных РЛС исключительно морских объектов погрешность относительной выставки станций в 5–10 м является вполне приемлемой. Такая точность легко достигается серийными средствами спутниковой навигации и проведения специальных работ по уточнению привязки в данном случае не требуется. Если же рассматриваемая нами система наблюдения призвана работать также и по воздушным объектам (например, вертолётам), то выставка с точностью в 5–10 м для неё слишком груба и уточнение конфигурации системы является обязательным [11].

На рис. 5 показаны результаты решения задачи трёхкоординатного наблюдения объекта [11] (высота объекта $h = 500$ м, скорость 20 м/с) системой из двух двухкоординатных РЛС кругового обзора.

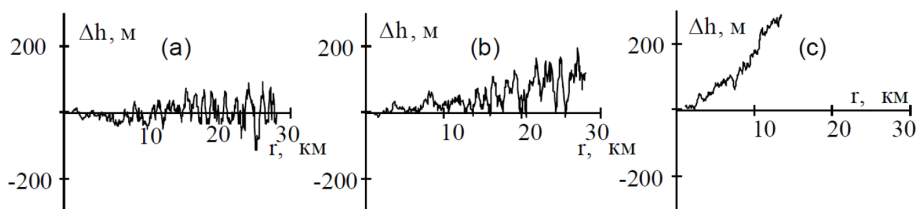


Рис. 5. Моделирование задачи 3D наблюдения объекта

Рис. 5а иллюстрирует процесс определения высоты объекта для случая идеально выставленной системы (Δh – погрешность определения высоты, r – расстояние до объекта), а на рис. 5б показан результат такого же определения высоты системой с погрешностью выставки $\Delta r^{(2)} = 1$ м, $\Delta z^{(2)} = 20$ м (такая точность вполне достигается предлагаемым в работе подходом). Видно, что при этом погрешность определения высоты объектов остаётся близкой к идеальной до дальности, примерно, 15–18 км (а также вполне пригодной для морской практики и далее). На рис. 5с показана попытка определения высоты объекта системой с большой погрешностью выставки $\Delta r^{(2)} = 5$ м. Видно, что в этом случае чрезмерно грубая выставка системы приводит к полному искажению представлений о навигационной обстановке (корректное трёхкоординатное наблюдение воздушных объектов возможно только в самой ближней зоне – не более 2–3 км). Таким образом, актуальность и конструктивность предлагаемого в работе к решению проблемы выставки подхода можно считать убедительно доказанными.

Заключение

Сформулируем основные результаты проведённого исследования. Предложена модельная интерпретация задачи выставки многопозиционной системы наблюдения, действующей на базе двухкоординатных измерителей; отмечены технологические аспекты модельных представлений, определяющие возможность разделения проблемы выставки многопозиционной системы транспондерного типа на задачи относительной и глобальной выставки; предложена методика обработки данных навигационных измерений, ориентированная на автоматизацию решения задачи выставки современными инструментальными и вычислительными средствами; наконец, симитировано решение задачи и продемонстрирована физическая достижимость выставки многопозиционной системы с высокой точностью, достаточной для последующего решения как 2D, так и 3D навигационных задач. Работа актуальна в свете проблем разработки и организации функционирования современных многопозиционных систем наблюдения, создаваемых на базе береговых (наземных) РЛС.

1. Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 1.

2. Дмитриев В.И., Соляков О.В., Турецкий Н.В. Автоматизированное рабочее место судоводителя – настоящее и будущее // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 4. С. 42–47.
3. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Динамическая выставка многопозиционной системы наблюдения по траекторным измерениям // Известия РАН. Теория и системы управления. 1999. № 1. С. 131.
4. Гладских Е.П., Костин В.Н., Максимов В.А., Репин Ю.М. Развитие средств навигационного оборудования прибрежной зоны Российской Федерации в соответствии с концепцией е-навигации // Навигация и гидрография. 2016. № 43. С. 13–21.
5. Катенин В.А., Дмитриев В.И. Навигационное обеспечение судовождения. М.: Академкнига, 2006.
6. Лентарёв А.А. Системы управления движением судов. Калининград: Всесоюзный институт повышения квалификации Минрыбхоза СССР, 1985.
7. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. М.: Радио и связь, 1986.
8. Гриняк В.М., Девятисильный А.С. Распознавание воздушных объектов двухкоординатными измерителями // Эксплуатация морского транспорта. 2012. № 3. С. 37–40.
9. Урличич Ю.М. Перспективы развития системы ГЛОНАСС // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2010. № 2. С. 10–14.
10. Игнатюк В.А., Сметанин С.И., Марус В.С. Способ организации расширенной системы спутникового GNSS мониторинга // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2015. № 1. С. 72–79.
11. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Нейроподобные алгоритмы высотной классификации движущихся объектов // Информационные технологии. 2001. № 12. С. 45–51.
12. Naba N., Bishop R.H. Estimate fusion for 2D search sensors // AIAA Guidance, Navigation and Control Proceedings. 1995. Vol. 1. Pp. 677–684.
13. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Информационно-технологические аспекты обеспечения безопасности движения на морских акваториях // Научно-техническая информация. Сер. 2. Информационные процессы и системы. 2003. № 7. С. 11–14.
14. Гриняк В.М., Иваненко Ю.С. О разрешимости задачи наблюдения воздушных объектов двухкоординатными измерителями // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2016. № 3. С. 109–118.
15. Малышев А.Н. Введение в вычислительную линейную алгебру. Новосибирск: Наука, 1991.
16. Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М. Технология компьютерного моделирования радиолокационного эхо-сигнала // Информационные технологии. 2002. № 3. С. 42–49.

Транслитерация

1. Chernyak V.S., Zaslavskii L.P., Osipov L.V. Mnogopozitsionnye radiolokatsionnye stantsii i sistemy, *Zarubezhnaya radioelektronika*, 1987, No 1.
2. Dmitriev V.I., Solyakov O.V., Turetskii N.V. Avtomatizirovannoe rabochee mesto sudovoditelya – nastoyashchee i budushchee, *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova*, 2014, No 4, pp. 42–47.

3. Grinyak V.M., Devyatisil'nyi A.pp. Dinamicheskaya vystavka mnogopozitsionnoi sistemy nablyudeniya po traektornym izmereniyam, *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, 1999, No 1, pp. 131.
4. Gladskikh E.P., Kostin V.N., Maksimov V.A., Repin Yu.M. Razvitie sredstv navigatsionnogo oborudovaniya pribrezhnoi zony Rossiiskoi Federatsii v sootvetstvii s kontseptsiei e-navigatsii, *Navigatsiya i gidrografiya*, 2016, No 43, pp. 13–21.
5. Katenin V.A., Dmiriev V.I. Navigatsionnoe obespechenie sudovozhdeniya, *M.: Akademkniga*, 2006.
6. Lentarev A.A. Sistemy upravleniya dvizheniem sudov, *Kaliningrad: Vsesoyuznyi institut povysheniya kvalifikatsii Minrybkhhoza SSSR*, 1985.
7. Kuz'min S.Z. Osnovy proektirovaniya sistem tsifrovoi obrabotki radiolokatsionnoi informatsii, *M.: Radio i svyaz'*, 1986.
8. Grinyak V.M., Devyatisil'nyi A.pp. Raspoznavanie vozdukhnykh ob"ektov dvukhkoordinatnymi izmeritelyami, *Ekspluatatsiya morskogo transporta*, 2012, No 3, pp. 37–40.
9. Urlichich Yu.M. Perspektivy razvitiya sistemy GLONASS, *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2010, No 2, pp. 10–14.
10. Ignatyuk V.A., Smetanin S.I., Marus V.pp. Sposob organizatsii rasshirennoi sistemy sputnikovogo GNSS monitoringa, *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*, 2015, No 1, pp. 72–79.
11. Devyatisil'nyi A.S., Dorozhko V.M., Grinyak V.M. Neiropodobnye algoritmy vysotnoi klassifikatsii dvizhushchikhsya ob"ektov, *Informatsionnye tekhnologii*, 2001, No 12, pp. 45–51.
12. Nabaa N., Bishop R.H. Estimate fusion for 2D search sensors, *AIAA Guidance, Navigation and Control Proceedings*, 1995, Vol. 1, pp. 677–684.
13. Devyatisil'nyi A.S., Dorozhko V.M., Grinyak V.M. Informatsionno-tekhnologicheskie aspekty obespecheniya bezopasnosti dvizheniya na morskikh akvatoriyakh, *Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Ser. 2, Informatsionnye protsessy i sistemy*, 2003, No 7, pp. 11–14.
14. Grinyak V.M., Ivanenko Yu.pp. O razreshimosti zadachi nablyudeniya vozdukhnykh ob"ektov dvukhkoordinatnymi izmeritelyami, *Territoriya novykh vozmozhnostei. Vestnik Vladivostokskogo gosudarstvennogo universiteta ekonomiki i servisa*, 2016, No 3, pp. 109–118.
15. Malyshev A.N. Vvedenie v vychislitel'nyuyu lineinuyu algebru, *Novosibirsk: Nauka*, 1991.
16. Devyatisil'nyi A.S., Dorozhko V.M., Grinyak V.M. Tekhnologiya komp'yuternogo modelirovaniya radiolokatsionnogo ekho-signalov, *Informatsionnye tekhnologii*, 2002, No 3, pp. 42–49.

© В.М. Гриняк, 2017

Для цитирования: Гриняк В.М. Обработка навигационных данных при решении задачи выставки многопозиционной системы наблюдения // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. 2017. Т. 9, № 2. С. 126–139.

For citation: Grinyak V.M. Measurement data processing for adjustment of multiposition observation system, *The Territory of New Opportunities. The Herald of Vladivostok State University of Economics and Service*, 2017, Vol. 9, No 2, pp. 126–139.

Дата поступления: 05.04.2017.