

**АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СОБСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ
ЛОКАЛЬНОЙ АВТОНОМНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

© 2016 А.Б. Борзов, С.В. Микаэльян

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Статья поступила в редакцию 10.06.2016

Рассматривается задача определения собственных координат системы базовых приемопередающих станций, образующих физическую основу локальной автономной радионавигационной системы (ЛАРНС), на основе последовательности замеров взаимной дальности, которые обеспечиваются возможностями самих этих станций за счет фиксации длительности цикла обмена специальными сообщениями в режиме «запрос-ответ». Предложен распределенный алгоритм решения данной задачи, позволяющий исключить необходимость создания высокоскоростного канала связи для передачи данных всех измерений в единый вычислительный центр. С помощью имитационного моделирования получены оценки точности и продолжительности построения собственной системы координат (ССК) ЛАРНС в зависимости от первичной точности измерения взаимной дальности между базовыми станциями.

Ключевые слова: локальная автономная радионавигационная система, построение системы координат, ансцентное преобразование.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для решения задач высокоточной навигации в пределах ограниченной области пространства активно развивается технология локальных радионавигационных систем (ЛРНС) [1, 2, 3], во многом основанная на адаптации для указанного применения идей и методов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [4]. Необходимым условием работоспособности ЛРНС является точное знание координат множества базовых станций – передатчиков навигационных сообщений, реализующих физическую основу ЛРНС [5]. Соответственно, этап развертывания ЛРНС, во время которого производится локализация базовых станций в некоторой координатной системе, оказывает определяющее воздействие на результирующую точность ее работы.

Во многих вариантах практического применения ЛРНС определение координат базовых станций может быть осуществлено «известными в топогеодезии методами» [6] с использованием соответствующего дополнительного оборудования. Однако значительный интерес представляют локальные автономные радионавигационные системы (ЛАРНС), в которых этап развертывания должен обеспечиваться собственными аппаратными средствами самих станций. При этом

Борзов Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автономные информационные и управляющие системы».

E-mail: borzov@rambler.ru

Микаэльян Самвел Вартанович, ассистент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы».

E-mail: smikl@nextmail.ru

предполагается удовлетворение следующих дополнительных условий, связанных с требованием автономности:

– процедура определения координат базовых станций не должна проводиться в едином центре обработки, поскольку необходимость создания каналов связи, обеспечивающих необходимую для этого передачу информации между этим центром и станциями, может свести на нет все преимущества автономности подобной ЛРНС;

– подключение новых базовых станций к уже работающей системе никак не должно влиять на функционирование остальной части ЛАРНС;

– развертывание ЛАРНС должно производиться достаточно быстро – время определения собственных координат базовых станций не должно превышать единиц минут.

Поддержка указанной возможности автономного развертывания ЛАРНС в аппаратуре базовых станций может быть обеспечена путем реализации способности определения взаимных расстояний между двумя любыми станциями сети, при помощи замера времени прохождения специального адресного сообщения в режиме «запрос-ответ» между этими станциями. Далее будем предполагать, что взаимодействие абонентов сети базовых станций осуществляется в режиме «множественного доступа с временным разделением» [7]. При этом в режиме развертывания ЛАРНС выполняется следующее:

– работа ЛАРНС в целом представляет собой последовательность циклов, в течение каждого из которых всем станциям по очереди отводится определенный временной интервал, на протяжении которого одна станция является активной, а все остальные находятся в режиме ожидания (рис. 1);

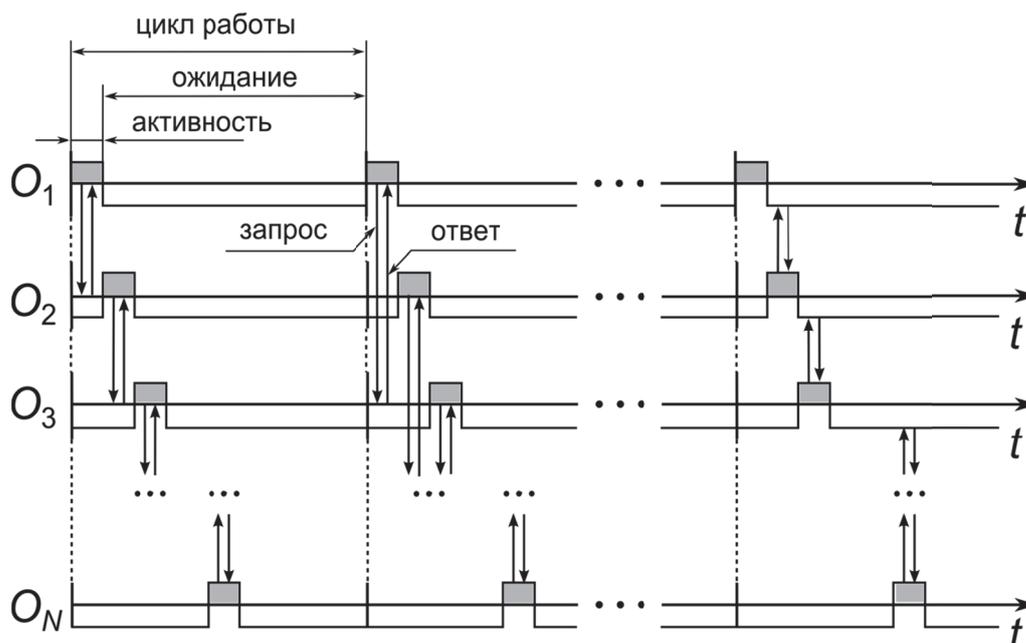


Рис. 1. Временная диаграмма работы ЛАРНС в режиме развертывания

– в течение своего такта активности i -ая станция инициирует адресный запрос на определение дальности, после чего адресат (j -ая станция) возвращает ответное сообщение, по задержке времени приема которого относительно времени излучения запроса вычисляется дальность;

– адресаты запросов активных станций при переходе к последующим циклам работы ЛАРНС последовательно перебираются.

Очевидно, что при помощи последовательности измерений относительных дальностей можно жестко зафиксировать взаимное расположение всех узлов сети базовых станций – ее геометрическую конфигурацию, однако однозначно определить координаты этих узлов нельзя – такая конструкция, подобно твердому телу, будет обладать шестью степенями свободы. Соответственно, для полного решения задачи определения координат станций к данным измерений требуется добавить необходимое число уравнений связей. При отсутствии аппаратуры, позволяющей привязать свободные координаты сети базовых станций к какой-либо уже существующей, глобальной, системе координат, эти уравнения связей могут быть заданы достаточно произвольно. Получаемую в этом случае координатную систему далее будем называть собственной системой координат (ССК) ЛАРНС, поскольку ее физической основой является непосредственно сеть базовых станций. При этом можно заметить, что, несмотря на отсутствие привязки ССК к какой-либо внешней, глобальной системе координат (ГСК), она вполне может быть использована для решения практических задач локальной навигации. При необходимости переход на использование ССК ЛАРНС от ГСК или наоборот может быть осуществлен непосредственно «на борту» объекта навигации,

если, например, в течение некоторого промежутка времени ему доступны оба вида координат.

С формальной точки зрения задача построения ССК ЛАРНС состоит в присвоении базовым станциям троек чисел – координат, в каком-либо смысле наилучшим образом удовлетворяющих последовательности измерений взаимных расстояний d_{ij} между ними, где i – номер станции, инициировавшей запрос измерения дальности, а j – номер станции, адресата данного запроса. При этом будем считать собственную систему координат ЛАРНС декартовой, предполагая, что линейные размеры зоны действия ЛАРНС не превышают одного-двух десятков километров, что позволяет либо вовсе пренебречь кривизной земной поверхности, либо учесть ее простой поправкой вертикальных координат. Таким образом, в процессе развертывания ЛАРНС каждой i -ой базовой станции необходимо сопоставить вектор координат $c_i = [x_i, y_i, x_i]^T$ (рис. 2).

Определим следующий порядок задания геометрических связей, необходимых для однозначного построения ССК, предполагая, что все базовые станции некоторым образом пронумерованы:

1) с первой станцией связывается начало системы координат ЛАРНС путем принудительного присвоения ей координат $c_1 = [0, 0, 0]^T$;

2) со второй станцией связывается ось OX ССК путем задания ей вектора координат $c_2 = [x_2, 0, 0]^T$, где координата x_2 подлежит определению в дальнейшем;

3) при помощи третьей станции фиксируется плоскость XOY с помощью присвоения ей координат $c_3 = [x_3, y_3, 0]^T$, где значения x_3 и y_3 подлежат дальнейшему определению на основе замеров взаимных дальностей.

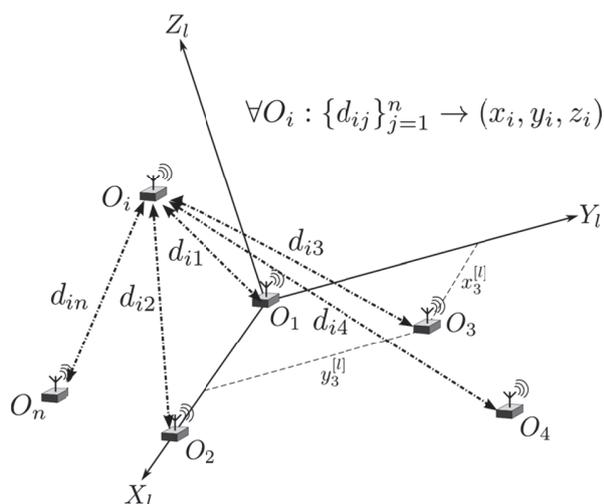


Рис. 2. Собственная система координат ЛАРНС

Или, в математической формулировке:

$$x_1 = y_1 = z_1 = y_2 = z_2 = z_3 = 0. \quad (1)$$

Строго говоря, указанная последовательность ограничений задает систему координат с точностью до зеркального отображения относительно плоскости XOY , поэтому требуется еще определить:

4) в направлении какой из базовых станций будут отсчитываться положительные координаты по оси OZ .

Понятно, что при практической реализации сформулированной последовательности геометрических связей необходимо учитывать исключительные случаи, связанные с возможным особым расположением базовых станций, что может привести к некоторому усложнению указанной процедуры, но не меняет ее суть.

Таким образом, задача формирования собственной системы координат состоит в определении процедуры задания координат узлов сети базовых станций ЛАРНС на основе множества измерений взаимных расстояний между ними с учетом уравнения связей (1), а также сформулированных выше условий автономности.

1. ЗАДАЧА ПОСТРОЕНИЯ ССК ЛАРНС С ПОЗИЦИЙ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА ТЕОРИИ СТАТИСТИЧЕСКОГО ОЦЕНИВАНИЯ

С теоретической точки зрения эта задача представляет собой задачу статистического оценивания вектора параметров, объединяющего все оставшиеся неизвестными координаты базовых станций ЛАРНС по множеству измерений взаимных расстояний, осуществляемых с некоторыми случайными ошибками, статистические свойства которых будем предполагать известными. При использовании системы ограничений (1) вектор оцениваемых параметров – координат, для множества из n базовых станций равен

$$C = [x_2, x_3, y_3, x_4, y_4, z_4, \dots, x_n, y_n, z_n]. \quad (2)$$

Размерность данного вектора равна $\dim C = 3 \cdot (N-2)$. Будем считать, что базовые станции неподвижны, так что $C = \text{const}$.

Вектор измерений представляет собой совокупность замеров дальностей

$$\{d_{ijl}\}_{i \in [1, \dots, n], j_l \in [1, \dots, n], l \in [1, \dots, k]} = [d_l]_{l=1}^k = D_k, \quad (3)$$

где n – число базовых станций, k – общее число измерений взаимной дальности, упорядоченных в порядке поступления, l – порядковый номер измерения дальности в последовательности, а

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} + \xi_{ij}, \quad (4)$$

где ξ_{ij} – ошибка измерения дальности, которую далее будем считать нормальной случайной величиной с нулевым средним и известной дисперсией, равной σ_{ξ}^2 .

Особенностью рассматриваемой задачи является тот факт, что вектор измерений является переменным – с течением времени его размерность увеличивается. При этом замеры дальностей между двумя конкретными базовыми станциями могут быть неоднократно повторены, и, более того, этот процесс может быть управляемым.

В силу последовательного характера измерений (3) для получения оценки вектора координат (2) наиболее удобным является байесовский подход, позволяющий обновлять существующую оценку по мере поступления новых измерений. Этот подход основан на использовании известной формулы Байеса, которая применительно к рассматриваемой ситуации записывается в виде

$$p(C | D_k) = p(C | d_k, D_{k-1}) = \frac{p(d_k | C)}{p(d_k)} \cdot p(C | D_{k-1}) \quad (5)$$

и показывает, как преобразуется условная плотность вероятности оцениваемого вектора в результате получения очередного k -го измерения. Как известно [8], на практике соотношение (5) в приведенном виде, как правило, неприменимо из-за невозможности выразить входящие в него плотности вероятности в конечной форме. Однако для случая гауссовых плотностей $p(C | D_{k-1})$ и $p(d_k)$, а также линейной модели измерений, приводящей также к гауссовости распределения $p(d_k | C)$, можно получить явные формулы преобразования математического ожидания и ковариации плотности вероятности оцениваемого вектора C , которые соответствуют шагу обновления в классическом фильтре Калмана [9]. В рассматриваемом случае модель измерений, задаваемая выражениями (4), нелинейна, однако, следуя обычной практике [9], можно воспользоваться гауссовой аппроксимацией соответствующих плотностей и получить приближенные формулы для расчета оценок двух первых

моментов вектора C . Один из наиболее удобных алгоритмов практического осуществления таких расчетов реализован в так называемом «ансцентном фильтре Калмана» – Unscented Kalman Filter (UKF) [10], предполагающем представление аппроксимирующего гауссовского распределения с помощью набора точек, определенным образом выбранных в пространстве оцениваемых параметров (сигма-точек [10]). В данном случае, поскольку оцениваемый вектор C неизменен, понадобится только та часть алгоритма, которая соответствует шагу обновления оценки. С применением введенных выше обозначений соответствующие формулы имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{C}_k &= \hat{C}_{k-1} + K_k \cdot (d_k - \hat{d}_{k-1}), \\ P_k &= P_{k-1} - K_k S_k K_k^T \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} K_k &= P_x S_k^{-1}, \\ S_k &= R_k + P_z, \\ P_x &= \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1}^i \cdot [\chi_{k-1}^i - \hat{C}_{k-1}] [h(\chi_{k-1}^i) - \hat{d}_{k-1}]^T, \\ P_z &= \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1}^i \cdot [h(\chi_{k-1}^i) - \hat{d}_{k-1}] [h(\chi_{k-1}^i) - \hat{d}_{k-1}]^T. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь под d_k понимается набор измерений – дистанций между базовыми станциями, получаемых на k -ом шаге работы алгоритма. Это может быть как одно, так и несколько, но, в общем случае, относительно небольшое число измерений.

Основной проблемой при непосредственном вычислении по приведенным формулам является то, что, несмотря на небольшую размерность вектора измерений на k -ом шаге, пересчитывать приходится *весь* вектор оцениваемых координат базовых станций C , включая те, которых не касаются измерения, входящие в d_k . При этом все необходимые для вычислений данные должны быть доступны в одном конкретном вычислительном устройстве. Как было указано ранее, такая организация вычислений противоречит требованию автономности ЛАРНС, поэтому для практического применения указанный классический подход в чистом виде неприменим.

2. ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ СОБСТВЕННЫХ КООРДИНАТ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ЛАРНС

Для преодоления данной проблемы предлагается параллельный аналог приведенного алгоритма, в котором каждый приемопередатчик, независимо от других, производит оценку только своих собственных координат, базируясь только на тех измерениях дальностей, которые инициированы им самим.

Обозначим набор координат m -ой базовой

станции как $c^{[m]} = [x^{[m]}, y^{[m]}, z^{[m]}]^T$. Соответственно, формируемая на k -ом шаге оценка этого набора координат будет обозначаться $\hat{c}_k^{[m]}$. Вектором измерений служит набор из нескольких замеров дальностей до других базовых станций с номерами n_1, n_2, \dots, n_l , для которых сформированы их собственные текущие оценки координат $\hat{c}_k^{[n_i]}$ и их ковариации $P_{k|k}^{[n_i]}$, обозначаемый далее $d_k^{[m]} = [d^{[mn_1]}, d^{[mn_2]}, \dots, d^{[mn_l]}]^T$, где $d^{[mn_i]}$

– значение замера дальности от m -ой базовой станции до n_i -ой. Этот набор измерений накапливается в памяти m -ой станции. Идея алгоритма состоит в том, чтобы в формуле (6) учитывать только координаты m -ой базовой станции, а при расчете коэффициента усиления фильтра (7) использовать оценки координат и их ковариации всех станций, от которых зависит вектор измерений $d_k^{[m]}$, т.е. $\hat{c}_{k-1} = [\hat{c}_{k-1}^{[m]}, \hat{c}_{k-1}^{[n_1]}, \hat{c}_{k-1}^{[n_2]}, \dots, \hat{c}_{k-1}^{[n_l]}]^T$ и

$$P_{k-1} = \text{diag} \left(P_{k-1}^{[m]}, P_{k-1}^{[n_1]}, P_{k-1}^{[n_2]}, \dots, P_{k-1}^{[n_l]} \right).$$

При этом оценки координат базовых станций $\hat{c}_{k-1}^{[n_i]}, (i = 1 \dots l)$ передаются m -ому приемопередатчику, инициировавшему запросы на измерения дальности, в ответных сообщениях от n_i -х станций.

Предлагаемую последовательность вычислений можно выразить в виде следующих шагов.

Шаг 1 – формирование сигма-точечного представления априорного распределения набора задействованных в измерениях координат базовых станций

1. В соответствии с имеющимся набором измерений определяется набор номеров базовых станций $\{n_i\}_{i=1}^l$, задействованных в замерах дальностей.

2. Формируются оценки математического ожидания и ковариации априорного распределения оценок координат, задействованных в измерениях базовых станций

$$\begin{aligned} \hat{c}_{k-1} &= [\hat{c}_{k-1}^{[m]}, \hat{c}_{k-1}^{[n_1]}, \hat{c}_{k-1}^{[n_2]}, \dots, \hat{c}_{k-1}^{[n_l]}]^T, \\ P_{k-1} &= \text{diag} \left(P_{k-1}^{[m]}, P_{k-1}^{[n_1]}, P_{k-1}^{[n_2]}, \dots, P_{k-1}^{[n_l]} \right). \end{aligned} \quad (8)$$

Размерность вектора \hat{c}_{k-1} равна $3 \cdot (l+1)$. При $l=3$ имеем $\dim(\hat{c}_{k-1}) = 12$.

3. В соответствии с (7) формируется набор сигма-точек и их весов.

$$\begin{aligned} \chi^0 &= \hat{c}_{k-1}, & W^0 &= k/(n+k), \\ \chi^i &= \hat{c}_{k-1} + \left(\sqrt{(n+k)P_{k-1}} \right)_i, & W^i &= 0.5/(n+k), \\ \chi^{i+n} &= \hat{c}_{k-1} - \left(\sqrt{(n+k)P_{k-1}} \right)_i, & W^{i+n} &= 0.5/(n+k), \end{aligned} \quad (9)$$

где $n = \dim(\hat{c}_{k-1})$, $i=0, \dots, 2 \cdot n$, k – масштабный коэффициент, при выборе которого можно использовать эмпирическое правило: $n+k = 3$ [9].

Шаг 2 – расчет коэффициента усиления фильтра

1. С использованием полученного набора сигма-точек рассчитываются значения:

$$\begin{aligned} \hat{d}_{k-1} &= \sum_{i=0}^{2n} W^i \cdot h(\chi^i), \\ P_x &= \sum_{i=0}^{2n} W^i \cdot [\chi^i - \hat{c}_{k-1}] [h(\chi^i) - \hat{d}_{k-1}]^T, \\ P_z &= \sum_{i=0}^{2n} W^i \cdot [h(\chi^i) - \hat{d}_{k-1}] [h(\chi^i) - \hat{d}_{k-1}]^T, \\ S_k &= R_k + P_z, \end{aligned} \quad (10)$$

где $h(\cdot)$ – функция измерений, определяющая детерминированную составляющую связи d и c ; R_k – ковариация ошибок измерений, которую в данном случае можно считать диагональной матрицей, составленной из дисперсий измерений отдельных измерений дальности

$$R_k = \text{diag}(\sigma_{d_{m_1}}^2, \sigma_{d_{m_2}}^2, \dots, \sigma_{d_{m_l}}^2).$$

Функция измерений представляет собой следующее:

$$h(c) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x^{[m]} - x^{[n_1]})^2 + (y^{[m]} - y^{[n_1]})^2 + (z^{[m]} - z^{[n_1]})^2} \\ \sqrt{(x^{[m]} - x^{[n_2]})^2 + (y^{[m]} - y^{[n_2]})^2 + (z^{[m]} - z^{[n_2]})^2} \\ \dots \\ \sqrt{(x^{[m]} - x^{[n_l]})^2 + (y^{[m]} - y^{[n_l]})^2 + (z^{[m]} - z^{[n_l]})^2} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

2. Из матрицы P_{xz} выделяется подматрица $P_{xz}^{[m]}$, соответствующая подвектору $c_{k-1}^{[m]}$. При приведенном выше порядке формирования этой матрицы, указанной подматрице соответствуют ее первые три строки.

3. С использованием матрицы $P_{xz}^{[m]}$ формируется коэффициент усиления фильтра

$$K_k = P_{xz}^{[m]} \cdot S_k^{-1}. \quad (12)$$

Шаг 3 – обновление оценок координат m -й базовой станции

Выполняется по формулам

$$\begin{aligned} \hat{c}_k^{[m]} &= \hat{c}_{k-1}^{[m]} + K_k \cdot (d_k - \hat{d}_{k-1}), \\ P_k^{[m]} &= P_{k-1}^{[m]} - K_k S_k K_k^T. \end{aligned} \quad (13)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ АЛГОРИТМА

Предлагаемый параллельный алгоритм оценки координат базовых станций ЛАРНС не эквивалентен рассмотренному ранее общему байесовскому алгоритму, в котором оценивается сразу весь вектор S , поскольку часть измерений,

строго говоря, теряется – те измерения дальности, которые иницированы m -ым приемопередатчиком, используются при вычислении оценок только его собственных координат, но не координат других приемопередатчиков, которые участвовали в формировании этих измерений. В силу достаточно сложного характера формирования данных измерений предлагаемого алгоритма его аналитическое исследование затруднительно, поэтому для проверки его работоспособности и определения рабочих характеристик была реализована имитационная модель в пакете Matlab.

Моделировалось формирование собственной системы координат ЛАРНС с использованием набора из 10-ти базовых станций, распределенных по области размером 2 на 2 км по горизонтали и 80 м по вертикали. При этом предполагалось следующее:

- в течение одного цикла работы ЛАРНС, общей длительностью 1 с, с тактом 0,01 с производятся последовательные адресные замеры дальностей между парами приемопередатчиков, в которых инициаторами запросов последовательно выступают все базовые станции системы, а номера адресатов измеряются при переходе к следующему циклу работы;

- после накопления 3-х измерений дальности каждая станция производит обновление собственных оценок координат в соответствии с приведенным выше алгоритмом;

- начальные значения оценок координат формируются некоторой внешней навигационной системой (например, ГНСС), обеспечивающей их определение со случайной ошибкой с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_0 = 10$ м по каждой координате, с реализацией условия (1) для первых трех базовых станций.

На рис. 3 приведены результаты моделирования, характеризующие скорость процесса установления значений оценок горизонтальных координат базовых станций ЛАРНС. Приведены кривые, характеризующие поведение средних и максимальных значений модуля отклонения оцененных горизонтальных координат станций от истинных по 100 испытаний для двух значений СКО измерений взаимных дальностей $\sigma_d = 0,5$ м и $\sigma_d = 1,5$ м.

На рис. 4 и рис. 5 приведены результирующие гистограммы ошибок определения, соответственно, горизонтальных и вертикальных координат базовых станций для различной точности измерений дальности.

Из приведенных результатов можно сделать заключение о работоспособности рассматриваемого алгоритма с точки зрения определения горизонтальных координат. Точность оценки вертикальных координат существенно хуже, однако это является ожидаемым результатом, исходя из малой разнесенности базовых станций по высоте.

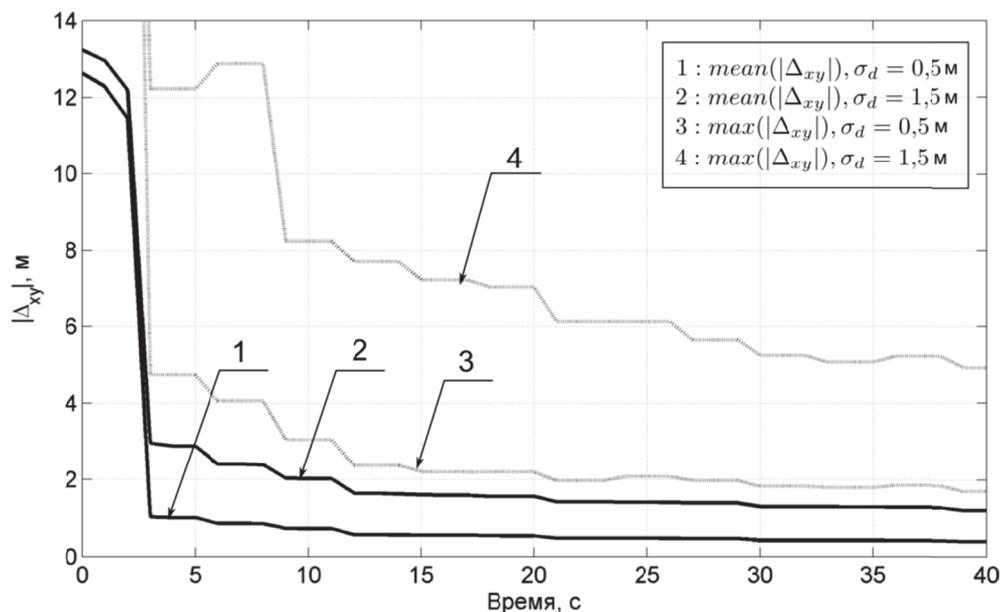


Рис. 3. Динамика изменения ошибок определения горизонтальных координат

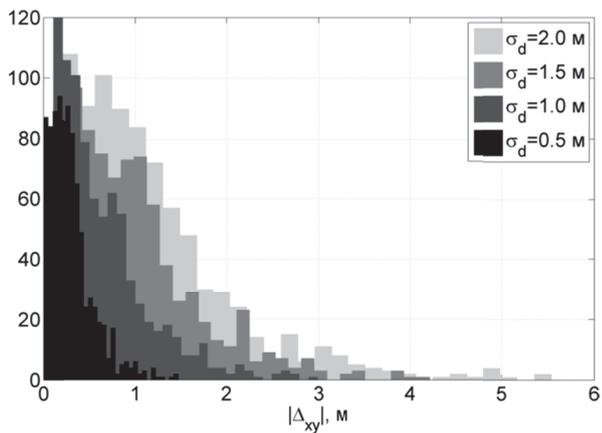


Рис. 4. Гистограмма ошибок определения горизонтальных координат

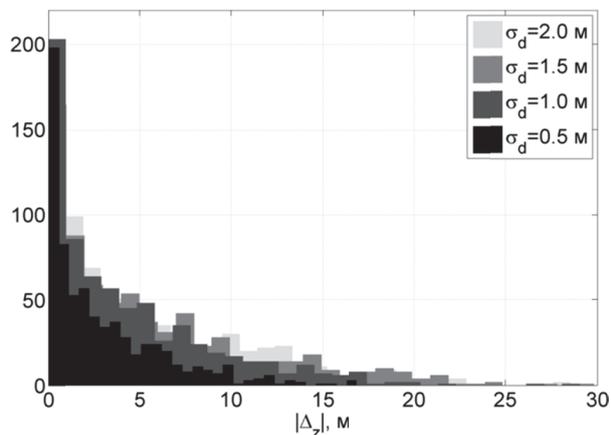


Рис. 5. Гистограмма ошибок определения вертикальных координат

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены особенности задачи формирования собственной системы координат локальной автономной радионавигационной системы. Рассмотрена возможность и сформулированы проблемы применения байесовского подхода для получения рекуррентного алгоритма формирования оценок координат набора базовых станций ЛАРНС.

На основе подхода, положенного в основу ансцентного фильтра Калмана, предложен практически применимый децентрализованный алгоритм вычисления оценок собственных координат базовых станций с использованием только тех измерений дальности, которые были инициированы этими станциями.

Методом имитационного моделирования установлено, что средняя ошибка оценки собственных координат в горизонтальной плоскости

за время моделирования, соответствующее 40 с, уменьшается до величин, меньших первичной ошибки измерения взаимных дальностей между базовыми станциями, что делает предложенный алгоритм пригодным для практического использования на этапе развертывания ЛАРНС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВедаПроект [сайт]. URL: <http://www.vedapro.ru/pseudo.php> (дата обращения 28.03.2016).
2. Deckfinder | Reliability when you need it most [сайт]. – URL: <http://deckfinder.net> (дата обращения 28.03.2016).
3. Нигруца И.В., Гребенников А.В., Казанцев М.Ю. Система посадки по сигналам псевдоспутников // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 1. С. 96–99.
4. Wang J. Pseudolite Applications in Positioning and Navigation: Progress and Problems // Journal of Global

- Positioning Systems. 2002. Vol.1. No.1. P. 48–56.
5. Борзов А.Б., Микаэлян С.В. Перспективы реализации локальных радионавигационных систем на базе многопозиционных РЛС // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 198–208.
 6. Ульянов Г.Н., Колесниченко С.В., Иванов С.А. Развитие систем локальной навигации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2011. № 2(10). С. 142–147.
 7. Локально-глобальная навигационно-информационная радиотехническая система / В.И. Бабуров, А.Г. Герчиков, А.И. Козлов, В.К. Орлов, Е.Е. Нечаев, Ю.Г. Шатраков // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2012. № 180. С. 123–128.
 8. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей [пер. с англ.]. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
 9. Ristic Branko, Arulampalam Sanjeev, Gordon Neil. Beyond the Kalman filter : Particle Filters for Tracking Applications. Boston, London: Artech House, 2004. 309 p.
 10. Julier Simon J., Uhlmann Jeffrey K. Unscented Filtering and Nonlinear Estimation // Proceedings of the IEEE. 2004. P. 401–422.

ALGORITHM OF CONSTRUCTING A DOMESTIC COORDINATE SYSTEM OF LOCAL AUTONOMOUS RADIO-NAVIGATION SYSTEM

© 2016 A.B. Borzov, S.V. Mikaelyan

Bauman Moscow State Technical University

Here is considered the problem of defining a domestic coordinates of a set of reference transceiver stations, which is forming the physical basis of a local autonomous navigation system (LARNS), based on the sequence of measurements of distance between stations, which are provided with their own abilities by fixing the duration of transfer cycle of a special message in “request-response” mode. A distributed algorithm for solving this problem, allowing to avoid the need for the creation of a high-speed communication channel for all measurements data transfer into a single general computer center, is offered. With the simulation model are obtained estimates of the accuracy and duration of the construction of the LARNS domestic coordinate system depending on the accuracy of distance measuring between reference stations.

Keywords: local autonomous radio-navigation system, coordinate system constructing, Unscented Transformation.

*Andrey Borzov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Autonomous Information and Control Systems Department.
E-Mail: borzov@rambler.ru
Samvel Mikaelyan, Assistant Lecturer at the Autonomous Information and Control Systems Department.
E-mail: smikl@nextmail.ru*