

Перспективы реализации локальных радионавигационных систем на базе многопозиционных РЛС

А.Б. Борзов, С.В. Микаэльян

Рассматриваются перспективы использования локальных радионавигационных систем в составе многопозиционных РЛС как автономной помехозащищённой альтернативы глобальным навигационным спутниковым системам в части анализа и оценки потенциальной точности навигации объекта в локальных радионавигационных полях с учётом использования данных собственной инерциальной навигационной системы.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система, локальная автономная радионавигационная система, потенциальная точность навигации, нижняя граница Крамера-Рао, информационная матрица Фишера, фильтр Калмана, инерциальная навигационная система.

1. Введение

В настоящее время класс многопозиционных радиолокационных систем (МПРЛС) представляет собой бурно развивающийся сегмент радиолокационных средств военного и гражданского назначения, в связи с возможностью преодолеть или компенсировать ряд функциональных ограничений, присущих традиционным РЛС обнаружения и сопровождения воздушных целей. Наиболее значимыми из них являются скрытность, живучесть, преимущества по обнаружению целей, выполненных по стелс-технологии. При этом возможность размещения МПРЛС на мобильных носителях и управление их положением в пространстве позволяет оптимизировать топологию сети применительно к тактической ситуации и типу поражаемых целей.

Для обеспечения работоспособности МПРЛС необходимо решить три ключевые задачи: реализовать прецизионную шкалу единого времени в рамках МПРЛС, выполнить высокоточное позиционирование радиотехнических средств МПРЛС в некоторой единой системе координат и реализовать каналы передачи данных для организации совместной обработки информации о наблюдаемых объектах. Для решения этих задач в состав МПРЛС должны входить соответствующие средства, объединенные в систему синхронизации и передачи данных (ССПД), представляющих совокупность пространственно-распределенных приемопередатчиков (в дальнейшем – пунктов), снабженных высокоточными часами и способных излучать и принимать друг от друга сигналы точного времени. Обмен такими сигналами в режиме «запрос-ответ» позволяет выполнить взаимное позиционирование приемопередатчиков СПД и задать тем самым в пространстве локальную систему координат (ЛАРНС), а также обеспечить синхронизацию хода встроенных часов. Методически этот подход подобен функциональному построению глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и может быть основан либо на дальномерном, либо на разностно-дальномерном способах определения местоположения [1]. Поэтому локализуемый объект, координаты которого необходимо определить, должен быть снабжен приемником навига-

онных сигналов ССПД, а также, при использовании дальномерного способа позиционирования, часами, синхронизированными с единой временной шкалой ССПД. По сути, ССПД формирует локальную автономную радионавигационную систему (ЛАРНС), интегрированную с МПРЛС. Очевидно, что важнейшей характеристикой такой системы является потенциальная точность навигации как функция параметров ССПД.

2. Постановка задачи

Сегодня актуален ряд разработок ЛАРНС, среди которых следует отметить систему DeckFinder [2] фирмы Astrum и отечественный проект «Псевдоспутник» [3]. Обе системы позиционируются как высокоточные системы навигации, позволяющие преодолеть основные проблемы, связанные с применением ГНСС, в частности, уязвимость для средств радиоэлектронной борьбы, невозможность применения в закрытых помещениях и условиях плотной застройки, а также недостаточная точность для решения ряда задач, например, для автоматизации посадки летательных аппаратов. При этом, по информации фирм разработчиков, упомянутые системы ЛНС позволяют достичь чрезвычайно высокой точности локализации объектов, вплоть до единиц сантиметров. Однако, подобная точность достижима только в сравнительно малой области пространства – в непосредственной близости от наземных приемо-передатчиков, составляющих основу данных систем. Так, для системы DeckFinder дальность действия составляет 1.1 км, а расчет точности системы «Псевдоспутник» предполагает, что объект навигации находится в пределах квадрата 10×10 км, фактически внутри области расположения пунктов ЛАРНС [3].

В данной работе рассматривается возможность применения ССПД, интегрированной с МПРЛС, в качестве основы для построения навигационной системы на значительном удалении от области расположения приемо-передатчиков этой системы для решения таких задач, как, например, выполнение разведки с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для решения подобных задач не требуется сантиметровой точности локализации объектов в пространстве, но чрезвычайно актуально требование защищенности системы от средств радиоэлектронного противодействия, что фактически не позволяет использовать ГНСС. Таким образом, целью данной статьи является анализ и оценка потенциальной точности навигации в локальном информационно-навигационном поле многопозиционной радиолокационной системы.

3. Потенциальная точность первичного определения местоположения объекта в локальном навигационном поле ССПД

При проведении анализа будем предполагать, что в ССПД используется временное разделение каналов передачи широкополосных навигационных сообщений в пунктах ЛАРНС. Навигационные сообщения передаются в соответствии с временной диаграммой, жёстко «привязанной» к шкале единого времени, при этом за каждым приемо-передатчиком пункта ЛАРНС закреплён индивидуальный временной слот. В самих навигационных сообщениях передаются точные координаты соответствующего приемо-передающего пункта. Для определения местоположения объекта в ЛАРНС используется дальномерный метод, т.е. вычисление координат объекта базируется на анализе времен распространения сигналов Δt_i от пунктов ССПД до объекта навигации. Под первичным определением местоположения будем понимать оценку координат, скорости и ускорения объекта на основе анализа навигационных сигналов в течение одного рабочего цикла ССПД, который составляет

последовательность всех временных слотов, соответствующих приемо-передающим пунктам (рис. 1).

Для оценки потенциальной точности определения навигационных параметров может быть использован анализ нижней границы для ковариационной матрицы несмещенных оценок координат по критерию Крамера-Рао (НГКР), в соответствии с которым [4] справедливо условие:

$$\text{cov}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}_0) \geq \mathbf{J}^{-1}, \quad (1)$$

где $\hat{\mathbf{x}}$ – оценка информационного параметра, точное значение которого равно \mathbf{x}_0 , а \mathbf{J} – информационная матрица Фишера, равная

$$\mathbf{J} = -E \left\{ \nabla_{\mathbf{x}} \nabla_{\mathbf{x}}^T \ln \Lambda(\mathbf{x}) \right\} = E \left\{ [\nabla_{\mathbf{x}} \Lambda(\mathbf{x})][\nabla_{\mathbf{x}} \Lambda(\mathbf{x})]^T \right\}, \quad (2)$$

где $\Lambda(\mathbf{x})$ – функция правдоподобия для параметра \mathbf{x} .

В случае ЛАРНС, вектором измерений, на основе которого производится оценка местоположения, является набор $\mathbf{z} = \{\Delta t_i\}_{i=1}^N$. При этом

$$\Delta t_i = \frac{1}{c} |\mathbf{r}(t_i) - \mathbf{p}_i - \delta \mathbf{p}_i| + \delta t_i + \delta t + \xi_i,$$

где c – скорость света, $\mathbf{r}(t_i)$ – радиус-вектор, определяющий положение объекта навигации в момент начала i -го временного слота рабочего цикла, \mathbf{p}_i – расчетный радиус-вектор, определяющий местоположение i -го приемо-передатчика ССПД в локальной системе координат, $\delta \mathbf{p}_i$ – ошибка определения местоположения i -го передатчика в ЛАРНС, δt_i – систематическое смещение (уход) часов i -го приемо-передатчика по отношению к общей временной шкале ССПД, δt – уход часов на объекте навигации, ξ_i – случайная ошибка определения момента прихода радиосигнала от i -го опорного пункта.

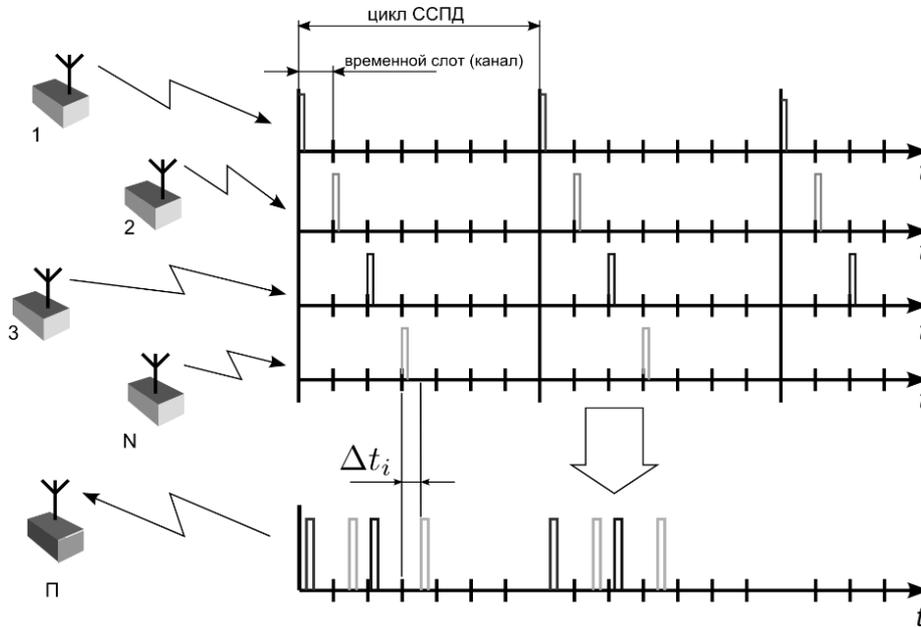


Рис. 1. Рабочий цикл ССПД

Систематические ошибки по сравнению со случайными могут быть аппаратно снижены (устранены) внутренними средствами калибровки ЛАРНС, и поэтому ими можно пренебречь, тогда:

$$\Delta t_i = \frac{1}{c} |\mathbf{r}(t_i) - \mathbf{p}_i| + \xi_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Поскольку в процессе формирования вектора измерений положение объекта навигации

не остается постоянным, для получения выражения для функции правдоподобия требуется конкретизировать вид функции $\mathbf{r}(t)$. Предположим, что на протяжении рабочего цикла ССПД движение объекта навигации можно считать равномерным. Такое предположение можно считать оправданным, поскольку, во-первых, в данном случае речь идет об оценке потенциальной точности, а, во-вторых, продолжительность рабочего цикла ССПД невелика.

Введение предположения о конкретном виде движения объекта навигации приводит к тому, что число неизвестных кинематических параметров, подлежащих определению, увеличивается – помимо собственно координат объекта требуется оценить его скорость. Полный вектор оцениваемых параметров в данном случае можно определить в виде

$$\mathbf{x} = [\mathbf{r}_0 \mathbf{v}_0]^T, \quad (4)$$

где \mathbf{r}_0 и \mathbf{v}_0 – соответственно, радиус-вектор и скорость объекта навигации в момент начала рабочего цикла ССПД t_0 .

С использованием (4) выражение для элементов вектора измерений (3) можно представить в виде:

$$\Delta t_i = \frac{1}{c} |\mathbf{r} + \mathbf{v} \cdot (t_i - t_0) - \mathbf{p}_i| + \xi = \frac{1}{c} |\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{x} - \mathbf{p}_i| + \xi_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

где $\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} 1 & t_i - t_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Предположим, что случайные ошибки измерений ξ_i распределены по нормальному закону с нулевым матожиданием и известными дисперсиями σ_i^2 . Считая все измерения Δt_i независимыми, функцию правдоподобия для всего набора измерений можно представить в виде

$$\Lambda(\mathbf{x}) = c_2 \cdot \exp \left(- \sum_{i=1}^N \frac{\left(\Delta t_i - \frac{1}{c} |\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{x} - \mathbf{p}_i| \right)^2}{2\sigma_i^2} \right).$$

Соответственно, логарифм функции правдоподобия

$$\ln \Lambda(\mathbf{x}) = \ln c_2 - \sum_{i=1}^N \frac{\left(\Delta t_i - \frac{1}{c} |\mathbf{F}_i \cdot \mathbf{x} - \mathbf{p}_i| \right)^2}{2\sigma_i^2}. \quad (6)$$

Используя (4–6) можно конкретизировать выражение для информационной матрицы Фишера (2) в виде

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} E \left\{ (\nabla_{\mathbf{r}} \ln \Lambda(\mathbf{x})) (\nabla_{\mathbf{r}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))^T \right\} & E \left\{ (\nabla_{\mathbf{r}} \ln \Lambda(\mathbf{x})) (\nabla_{\mathbf{v}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))^T \right\} \\ E \left\{ (\nabla_{\mathbf{r}} \ln \Lambda(\mathbf{x})) (\nabla_{\mathbf{v}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))^T \right\} & E \left\{ (\nabla_{\mathbf{v}} \ln \Lambda(\mathbf{x})) (\nabla_{\mathbf{v}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))^T \right\} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $E \left\{ (\nabla_{\mathbf{r}} \ln \Lambda(\mathbf{x})) (\nabla_{\mathbf{r}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))^T \right\} = \frac{1}{c^2 \sigma^2} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta x_i^2}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} & \sum_{i=1}^N \frac{\Delta x_i \Delta y_i}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} & \sum_{i=1}^N \frac{\Delta x_i \Delta z_i}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} \\ \sum_{i=1}^N \frac{\Delta y_i \Delta x_i}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} & \sum_{i=1}^N \frac{\Delta y_i^2}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} & \sum_{i=1}^N \frac{\Delta y_i \Delta z_i}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} \\ \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_i \Delta x_i}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} & \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_i \Delta y_i}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} & \sum_{i=1}^N \frac{\Delta z_i^2}{|\Delta \mathbf{r}_i|^2} \end{bmatrix}$,

аналогичные выражения можно получить для $E\left\{(\nabla_{\mathbf{r}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))(\nabla_{\mathbf{v}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))^T\right\}$ и $E\left\{(\nabla_{\mathbf{v}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))(\nabla_{\mathbf{v}} \ln \Lambda(\mathbf{x}))^T\right\}$. Здесь $\Delta \mathbf{r}_i = [\Delta x_i \ \Delta y_i \ \Delta z_i]^T$ – вектор перемещения объекта навигации в течение промежутка времени от момента начала рабочего цикла ССПД до момента начала i -го временного слота.

Приведенные выражения для элементов информационной матрицы позволяют определить минимальные дисперсии несмещенных оценок элементов вектора оцениваемых параметров в соответствии с (1) для различных положений объекта навигации в пространстве в зависимости от числа и пространственного размещения опорных приемо-передающих пунктов ССПД, а также от точности определения моментов времени получения навигационных сигналов.

Решение модельной задачи расчёта минимального значения СКО ошибки несмещенной оценки местоположения объекта навигации является наглядной иллюстрацией данного метода по точностным характеристикам ЛАРНС, параметры которой были приняты следующими:

- конфигурация сети: прямоугольная область размером 40×30 км, а расположение приемо-передатчиков ССПД и порядок передачи ими навигационных сигналов иллюстрируются рис. 2. Здесь пункты с номерами $n = 4 \dots 8$ расположены в горизонтальной плоскости с высотой $h = 0$;

- высота полета объекта навигации $h = 1000$ м, вектор скорости $\mathbf{v} = [5000]^T$ м/с;
- СКО ошибки фиксации времени получения навигационных сигналов $\sigma_t = 3$ нс;
- длительность временного слота для передачи навигационного сигнала одним источником $\sigma_t = 3$ нс.

Результаты расчётов представлены на рис. 3 и 4. Отдельно представлены оценки минимальной СКО несмещенных оценок для горизонтальных координат и высоты, поскольку заданное множество приемо-передатчиков ССПД имеет в основном плоское распределение, что приводит к значительным отличиям в точности оценки местоположения объекта по вертикали и по горизонтали.

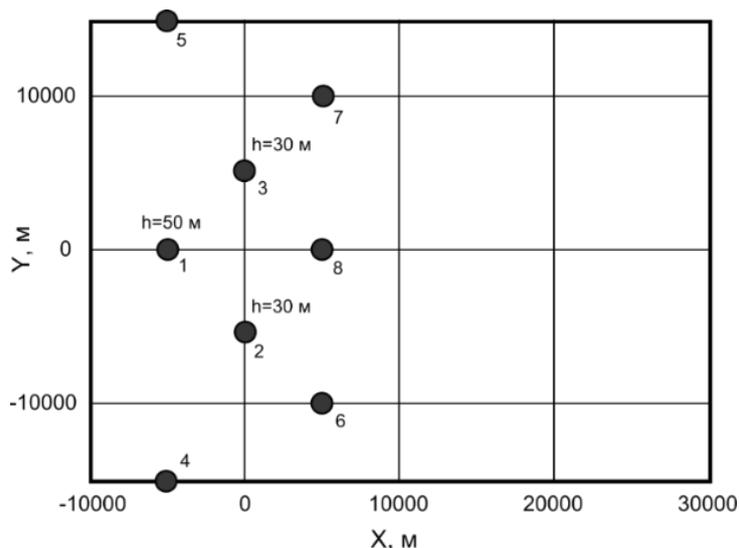


Рис. 2. Расположение приемо-передающих пунктов ССПД

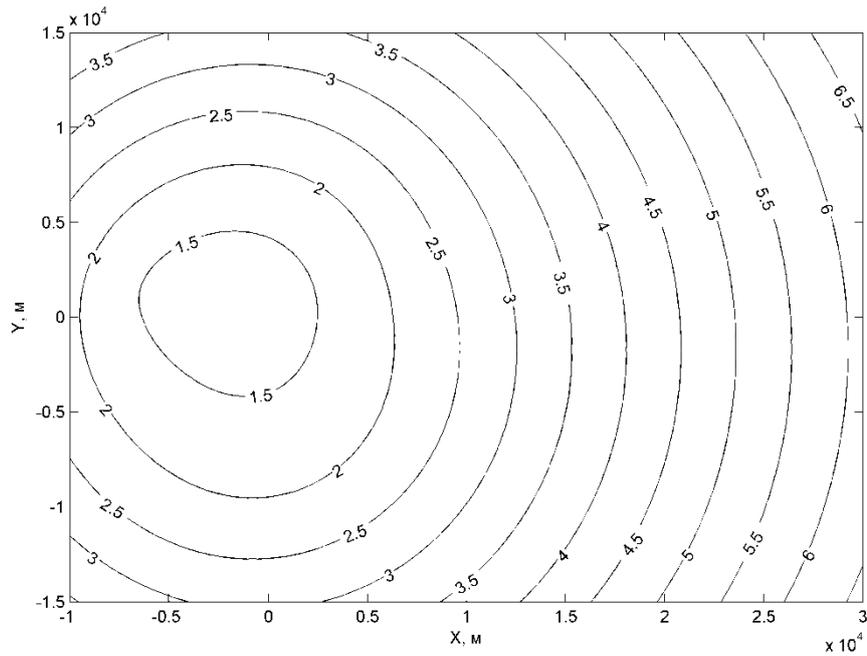


Рис. 3. СКО несмещенных оценок в соответствии с НКГР для горизонтальных координат

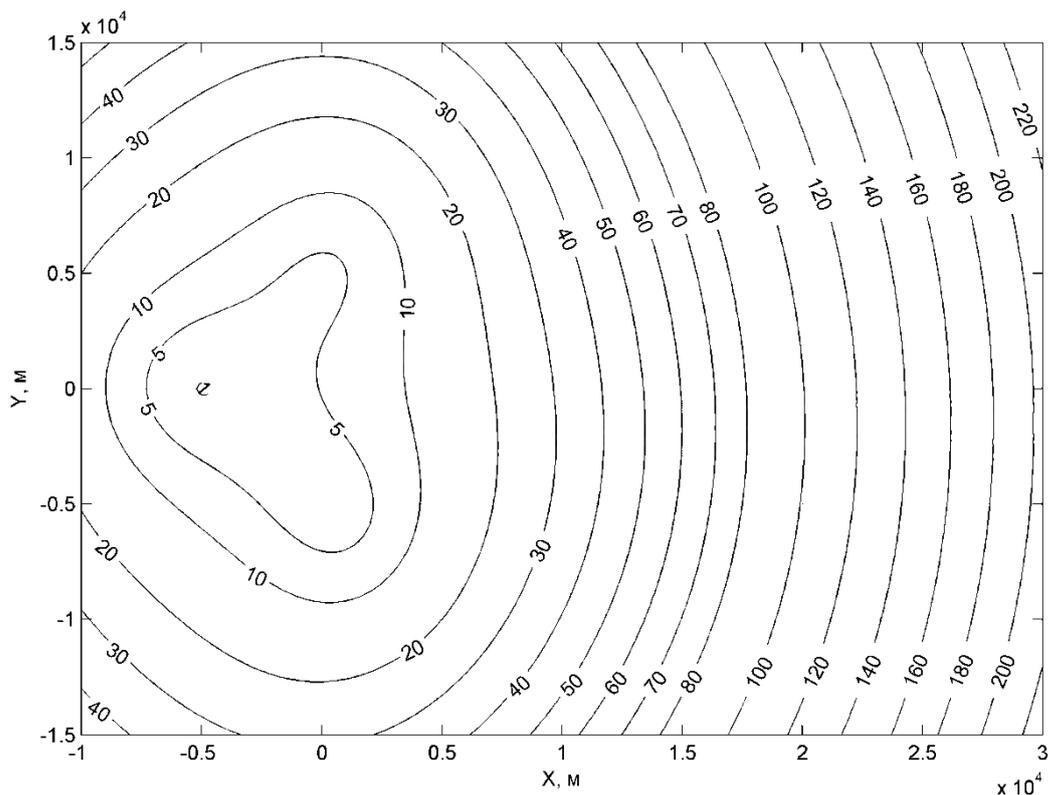


Рис. 4. СКО несмещенных оценок в соответствии с НКГР для высоты

Анализ результатов модельной задачи позволяет сделать следующие выводы:

- потенциальную точность определения горизонтальных координат объекта навигации в течение одного рабочего цикла ССПД в условиях данной модельной ситуации можно считать приемлемой для решения упомянутых выше практических задач, особенно с учетом возможности фильтрации множества первичных навигационных определений в процессе движения объекта;
- определение высоты полета объекта навигации возможно фактически только внутри

области расположения приемо-передатчиков ССПД – при удалении объекта от границ этой области ошибки определения высоты резко увеличиваются и быстро достигают неприемлемых величин, что делает невозможным создание полноценной 3-координатной навигационной системы, основанной только на рассматриваемых принципах определения местоположения.

4. Построение комплексной системы навигации с использованием инерциальных датчиков

В качестве практического решения, позволяющего существенно улучшить точность навигации объекта в информационно-навигационном поле МПРЛС, можно предложить комплексирование средств ЛНС на базе ССПД со средствами инерциальной навигационной системы (ИНС). Такое решение сохраняет автономность системы навигации, что является важнейшим эксплуатационным качеством.

Реализация комплексной навигационной системы основана на следующих соображениях.

1. На любом промежутке времени для перемещения объекта навигации справедливо представление

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 \cdot (t_i - t_0) + \int_{t_0}^{t_i} \int_{t_0}^t \mathbf{a}(\tau) d\tau, \quad (8)$$

где \mathbf{r}_0 и \mathbf{v}_0 – соответственно, радиус-вектор и скорость объекта в начальный момент, а $\mathbf{a}(t)$ – его ускорение как функция времени, которое измеряется соответствующими датчиками ИНС и может считаться известным.

2. Подстановка (8) в (3) приводит к выражению

$$\Delta t_i = \frac{1}{c} \left| \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 \cdot (t_i - t_0) + \int_{t_0}^{t_i} \int_{t_0}^t \mathbf{a}(\tau) d\tau - \boldsymbol{\rho}_i \right| + \xi_i, \quad (9)$$

здесь \mathbf{r}_0 и \mathbf{v}_0 интерпретируются как радиус-вектор и скорость объекта навигации на момент начала очередного рабочего цикла ЛНС t_0 , а t_i – момент начала временного слота, закрепленного за i -м приемо-передатчиком.

3. Поскольку $\boldsymbol{\rho}_i$ и $\mathbf{a}(t)$ известны, введём фиктивный радиус-вектор i -го приемо-передатчика с помощью выражения

$$\tilde{\boldsymbol{\rho}}_i = \boldsymbol{\rho}_i - \int_{t_0}^{t_i} \int_{t_0}^t \mathbf{a}(\tau) d\tau. \quad (10)$$

При этом подстановка (10) в (9) дает выражение

$$\Delta t_i = \frac{1}{c} \left| \mathbf{r}_0 + \mathbf{v}_0 \cdot (t_i - t_0) - \tilde{\boldsymbol{\rho}}_i \right| + \xi_i, \quad (11)$$

которое по форме совпадает с (3) за исключением того, что вместо истинного радиус-вектора i -го приемо-передатчика в него входит фиктивный, вычисляемый в соответствии с (10).

4. Сравнение моделей измерений (11) и (3) показывает их формальную эквивалентность. При этом модель (11), в отличие от (5), справедлива при произвольном, а не только при равномерном движении объекта навигации в течение цикла первичного определения местоположения. Структурная схема комплексной навигационной системы изображена на рис. 5. В этой системе, с одной стороны, по данным ИНС рассчитывается приращение положения объекта навигации, вызванное его ускорением, а с другой – определяется поправка началь-

ного положения и начальной скорости по данным ЛНС. Для фильтрации данных первичных навигационных определений от ЛНС используется фильтр Калмана, основанный на модели приблизительно равномерного движения объекта навигации [4]. Возмущениями, воздействующими на объект, в данной модели будут случайные ошибки инерциальных датчиков. Оценка истинного радиус-вектора объекта получается в результате суммирования этих величин. По существу, на основе данных ЛНС выполняется компенсация уходов инерциальных датчиков, что позволяет достичь определения текущего положения объекта навигации с достаточно высокой точностью.

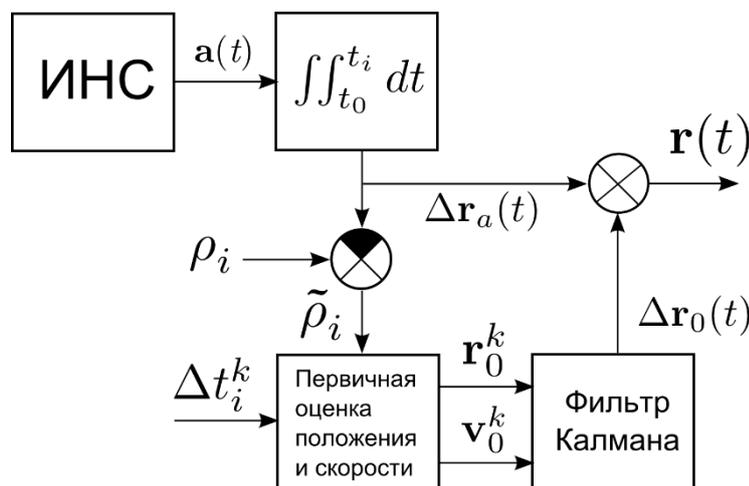


Рис. 5. Структурная схема комплексной навигационной системы

Для оценки результирующей точности такой системы воспользуемся данными об ошибках микромеханического инерциального датчика ADIS16480 фирмы Analog Devices [5]. В соответствии с паспортными данными СКО случайной ошибки измерения ускорения σ_a составляет величину 1.5 mg или $1.5 \cdot 9.81 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$. В рассматриваемой схеме комплексной навигационной системы эта ошибка играет роль случайного возмущения в модели движения объекта навигации. Для оценки ковариационной матрицы результирующей оценки координат объекта можно воспользоваться известными формулами калмановской фильтрации [4]:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_{k+1|k} &= \mathbf{F}_k \mathbf{P}_{k|k} \mathbf{F}_k^T + \mathbf{Q}_k \\
 \mathbf{K}_{k+1} &= \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T \left(\mathbf{H}_{k+1} \mathbf{P}_{k+1|k} \mathbf{H}_{k+1}^T + \mathbf{R}_{k+1} \right)^{-1} \\
 \mathbf{P}_{k+1|k+1} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k+1} \mathbf{H}_{k+1}) \mathbf{P}_{k+1|k}.
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Здесь переходная матрица состояния объекта \mathbf{F}_k соответствует модели равномерного движения, ковариационная матрица возмущений \mathbf{Q}_k определяется ошибками инерциальных датчиков ускорения, а ковариационную матрицу шумов измерений \mathbf{R}_{k+1} можно принять равной ковариации, рассчитанной в соответствии с определённой ранее НГКР.

На рис. 6 и 7 представлены зависимости точностных характеристик комплексной ЛАРНС, с прежней конфигурацией сети (рис. 2), при коррекции первичных измерений координат объекта данными от ИНС по алгоритму (12). В расчётах, для наглядности результатов, предполагалось, что ошибки первичного определения положения объекта соответствуют данным, представленным на рис. 3 и 4, а СКО случайных ошибок измерения отдельных составляющих ускорения составляют величину $\sigma_a = 0.015 \text{ м/с}^2$, что соответствует

паспортным данным датчика ADIS16480. Также в расчетах предполагалось, что объект навигации в горизонтальной плоскости движется по эллипсу, вписанному в прямоугольную область ЛАРНС (рис. 2), с началом в точке с горизонтальными координатами $x = -1000$ м, $y = 0$ м. Высота полета предполагалась постоянной, при этом на рисунках приведены результаты расчётов для трех значений высоты h , равных, соответственно, 250, 500 и 1000 м. Точность фиксации моментов получения сигналов передатчиков ССПД была задана равной $\sigma_t = 3$. Приведенные данные соответствуют одному полному циклу пролета объекта по указанной эллиптической траектории.

Полученные результаты показывают, что в горизонтальной плоскости расчётная точность определения положения мало изменяется на всём протяжении полета, что можно объяснить тем, что основной вклад в ошибки определения местоположения в данном случае вносят шумы акселерометров, играющие в данном расчёте роль возмущений в модели объекта в фильтре Калмана. При этом результирующая точность позиционирования объекта навигации в горизонтальной плоскости вполне позволяет обеспечить выполнение указанных во введении практических задач.

Расчётная точность оценки высоты существенно ниже, и в данном случае она зависит в первую очередь от точности первичных измерений высоты с помощью ЛНС. В результате СКО ошибки определения высоты сильно зависит от удаленности объекта от области расположения передатчиков ССПД, а также от высоты его полета. При этом, однако, результирующая точность определения высоты в комплексной системе навигации может быть вполне приемлемой для решения, например, задачи ведения разведки при помощи БПЛА.

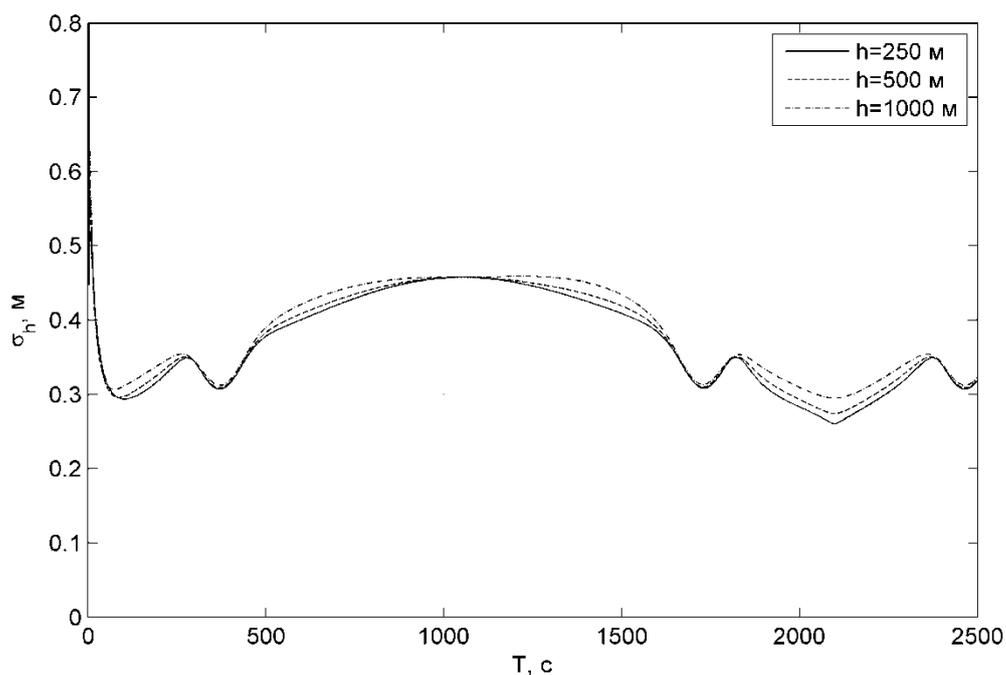


Рис. 6. Расчетные результаты оценки точности определения местоположения в комплексной навигационной системе в горизонтальной плоскости

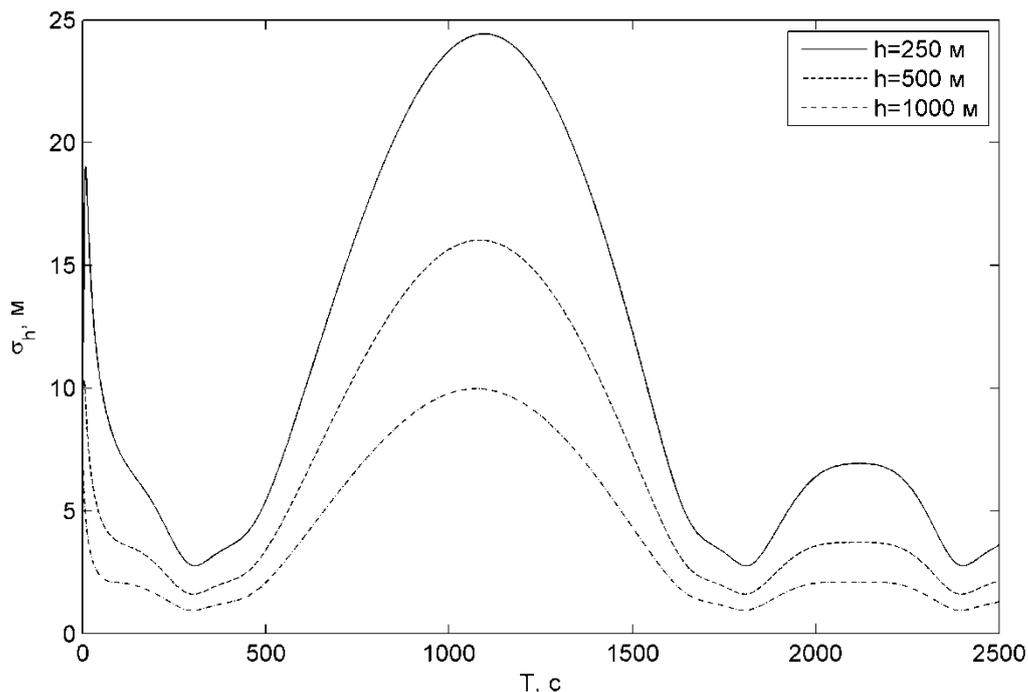


Рис. 7. Расчётные результаты оценки точности определения местоположения в комплексной навигационной системе по высоте

5. Заключение

В работе произведена оценка точности определения местоположения объекта при помощи ЛНС, реализованной на основе множества приемо-передатчиков ССПД МПРЛС, использующих временное разделение каналов передачи навигационных сигналов, на значительном удалении от области их размещения. Полученные результаты показывают, что такая ЛНС обеспечивает достаточно хорошую точность определения горизонтальных координат объекта (СКО составляет величину от 3 до 6 м при удалении объекта на расстояние от 10 до 30 км), однако точность позиционирования объекта по высоте можно считать более-менее приемлемой только в пределах области размещения передатчиков ССПД.

В качестве варианта построения практически применимой навигационной системы предложена комплексная система, предусматривающая интеграцию рассматриваемой ЛНС со средствами инерциальной навигации. Произведена оценка результирующей точности подобной системы. Из полученных результатов можно сделать вывод, что подобная комплексная система работоспособна и может быть использована для решения, по крайней мере, таких задач, как обеспечение навигации БПЛА при ведении воздушной разведки.

Литература

1. Радиотехнические системы: учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов [и др.]; под ред. Ю. М. Казаринова. – М.: Высш. шк., 1990. – 496 с.: ил.
2. Decfinder | Reliability when you need it most [сайт]. URL: <http://deckfinder.net> (дата обращения: 28.03.2015).

3. ВедаПроект [сайт]. URL: <http://www.vedapro.ru/pseudo.php> (дата обращения: 28.03.2015).
4. Бар-Шалом Я. Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы: в 2 ч., Часть 1 / Я. Бар-Шалом, Х.-Р. Ли; [пер. с англ. Д.Д. Дмитриева]. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
5. Ten Degrees of Freedom Inertial Sensor with Dynamic Orientation Outputs. ADIS16480 Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADIS16480.pdf> (дата обращения: 28.03.2015).

Статья поступила в редакцию 23.04.2015

Борзов Андрей Борисович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Госпитальный пер., д. 10), тел. 8(499) 263-68-60, e-mail: borzov@rambler.ru

Микаэльян Самвел Варганович

ассистент кафедры «Автономные информационные и управляющие системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, Госпитальный пер., д. 10), тел. 8(499) 263-64-06, e-mail: smikl@newmail.ru

Prospects of implementing local navigation systems based on multi-static radars

Andrey B. Borzov, Samvel V. Mikaelyan

Prospects of using local radio-navigation systems based on multi-static radars as noise-immune autonomous alternative to global navigation satellite systems in the analysis of potential accuracy of object navigation in local radio-navigation fields taking into account the use of on-board inertial navigation system are considered.

Keywords: multi-static radar, local autonomous radio-navigation system, potential navigation accuracy, Cramer-Rao lower bound, Fisher information matrix, Kalman filter, inertial navigation system.