

# АСИНХРОННЫЙ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫЙ АЛГОРИТМ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНОЙ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

## ASYNCHRONOUS DIFFERENTIAL-RANGE ALGORITHM FOR POSITIONING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE IN THE ABSENCE OF GLOBAL SATELLITE NAVIGATION SYSTEM SIGNALS

V. Kopyltsov

*Summary.* The paper considers the problem of positioning a UAV performing a target task in conditions of GNSS signal suppression. The source of the navigation signal, which is a sequence of pulses, is a navigation object (UAV), which transmits this signal to reference points for estimating the pulse arrival time and then determining the coordinates of the navigation object. As a positioning method, an asynchronous differential-range method is analyzed, the essence of which is to find the differences in the pulse arrival time between N reference points and their shifted, for the pulse repetition interval, copies. Modeling has shown the efficiency of the proposed approach for determining the coordinates of the UAV.

*Keywords:* local navigation systems, asynchronous total-range method, radiotechnical control, determination of UAV coordinates.

**Копыльцов Владимир Юрьевич**

Заместитель генерального конструктора,  
начальник направления, ООО «Специальный  
технологический центр» г. Санкт-Петербург  
vkopyltcov@yandex.ru

*Аннотация.* В работе рассмотрена задача позиционирования БЛА, выполняющий целевую задачу в условиях подавления сигналов ГНСС. Источником навигационного сигнала, представляющий собой последовательность импульсов, является объект навигации (БЛА), который передает данный сигнал на опорные пункты для оценивания времени прихода импульсов и последующего определения координат объекта навигации. В качестве метода позиционирования анализируется асинхронный разностно-дальномерный метод, суть которого состоит в нахождении разностей времени прихода импульсов между N опорными пунктами и их смещенными, за интервал следования импульсов, копиями. Моделирование показало работоспособность предложенного подхода для определения координат БЛА.

*Ключевые слова:* локальные навигационные системы, асинхронный суммарно-дальномерный метод, радиотехнический контроль, определение координат БЛА.

### Введение

В последние годы широкое распространение получают автономные беспилотные летательные аппараты (БЛА), способные функционировать длительное время в неопределенной и изменяемой обстановке в соответствии с поставленной целевой задачей [1]. Эффективность выполнения целевой задачи в определяющей степени зависит от работы навигационной системы. Большинство существующих систем позиционирования обеспечивают достаточную точность определения положения и ориентации аппарата при устойчивой работе глобальной спутниковой навигационной системы (ГНСС). Однако, при отсутствии сигналов ГНСС, ошибки позиционирования объекта навигации могут оказаться недопустимыми. Поэтому, одним из важных направлений модернизации бортового оборудования малоразмерных БЛА является разработка локальной навигационной системы (ЛНС), обеспечивающих полет в условиях отсутствия сигналов ГНСС.

Сегодня актуален ряд разработок ЛНС, 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 опорных пунктов (ОП), составляющих основу данных систем. Так, для системы DeckFinder дальность действия составляет 1.1 км, а расчет точности системы «Псевдоспутник» предпола-

гает, что объект навигации находится в пределах квадрата  $10 \times 10$  км, фактически внутри области расположения пунктов ЛНС [3].

Математические выражения для определения погрешности местоположения БЛА прямо связаны с относительной точностью взятия временных отсчетов распределенных сегментов ЛНС, а для достижения потенциальных характеристик методов расчета координат объекта навигации критерии точности синхронизации должны быть однозначно сформулированы и безусловно обеспечены [4–6].

Сложность практической реализации схем синхронизации высокой точности, отсутствие глубоко изученных и общепризнанных методов синхронизации и передачи данных в ЛНС ограничивают их развитие или накладывают ограничения на использование возможностей систем с разнесенными позициями в полной мере. Практически достигнутые результаты временной синхронизации и передачи данных разнесенных позиций в известной литературе подробно не описаны, известные технические решения реализуются, как правило, только на стационарно развернутых каналах передачи данных и синхронизации. Возможности достижения теоретически рассчитываемой потенциальной точности измерений в многопозиционных системах, основанные в том числе на альтернативных методах расчета пространственных координат и обеспечения синхронизации [7–9], в широкой практике не применяются, но безусловно должны быть проанализированы в перспективе.

В данной работе рассматривается возможность применение асинхронного разностно-дальномерного метода (РДМ), в качестве основы для построения ЛНС на значительном удалении от области расположения ОП этой системы для решения таких задач, как, например, выполнение разведки с помощью БЛА. 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 точности навигации в локальном информационно-навигационном поле с использованием асинхронного РДМ.

**Постановка задачи**

Пусть шкалы времени в ОП и БЛА независимы. Часы в  $i$ -м узле (ОП) стартуют в некоторый неизвестный момент времени  $\Omega_i$ . Здесь мы используем индекс  $i$  для обозначения как ОП ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) (так и БЛА ( $i = 0$ )). Частота часов  $F_i$  исследуемой ЛНС имеет некоторый неизвест-

ный незначительный частотный сдвиг  $\varepsilon_i$ , относительно частоты  $F_s$  известных номинальных часов

$$F_i = F_s(1 - \varepsilon_i), \tag{1}$$

где  $\varepsilon_i$  — случайная величина, распределенная по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ . Типичный диапазон этой величины составляет от  $10^{-6}$  –  $10^{-4}$  [10]. Так как все часы ЛНС независимы, каждый ОП имеет свою локальную шкалу времени  $t_i$ , которая определяется отсчетами моментов прихода импульсов, излученных БЛА.

Шкалу времени  $t_i$  можно представить в секундах через линейную зависимость с глобальным временем  $t$

$$t_i = \Omega_i + I_i T_i = \Omega_i + I_i T_s \frac{1}{(1 - \varepsilon_i)} \approx \Omega_i + I_i T_s (1 + \varepsilon_i), \tag{2}$$

где  $T_i = 1 / F_i$  — длительность временного интервала,  $\{\varepsilon_i\}_{i=0}^N, \{\Omega_i\}_{i=0}^N$  — неизвестные параметры синхронизации.

В формуле (2) применена аппроксимация Тейлора путем отбрасывания малых по значению членов второго и старшего порядков величины  $\varepsilon_i$ .

БЛА периодически излучает импульсный сигнал  $s(t)$  с известной структурой и постоянной скоростью  $c$ . Импульсы излучаются источником в локальные моменты времени  $l_0 = \{pL\}_{p=0}^\infty$ , где  $p$  — индекс импульса, а  $L$  — между импульсный интервал, значение которого известно.

Также известен ожидаемый период следования импульсов  $LT_s$ . Здесь, как и ранее величина  $L$  представлена как число дискрет на оси времени, а  $LT_s$  — в секундах. Следует заметить, что мгновенные значения  $LT_s(1 + \varepsilon_0)$  неизвестны.

Местоположение БЛА может быть определено только в моменты излучения им импульсов. Это означает, что происходит семплирование траектории полета БЛА  $x_0(t)$  со скоростью  $\frac{1}{T_s(1 + \varepsilon_0)}$ , что дает дискретную последовательность координат источника. С учетом формулы (2) эту последовательность можно выразить через глобальное время в виде выражения

$$\{\mathbf{x}(pLT_s(1 + \varepsilon_0) + \Omega_0)\}_{p=0}^\infty, \tag{3}$$

которое в дальнейшем будем обозначать так  $\{\mathbf{x}(p)\}_{p=0}^\infty$ .

Каждый ОП ЛНС оценивает время прихода импульсного сигнала БЛА, основываясь на его минимальной

единице времени (такте). На  $i$ -ом ОП оценка времени прихода  $p$ -го импульса можно выразить так

$$\hat{l}_i(p) = l_i(p) + n_i(p), \quad (4)$$

где  $l_i(p)$  — истинное значение ВПИ на  $i$ -ой шкале времени,  $n_i(p)$  — ошибка оценки ВПИ, которая полагается случайной величиной с нормальным распределением вида  $n_i \sim N(0, \sigma_n^2)$ .

Каждый ОП передает на центральный пункт (ЦП) короткое сообщение включающее в себя индекс  $i$ , оценку ВПИ и индекс  $p$ . Задача ЦП заключается в определении места БЛА  $\{\mathbf{x}(p)\}_{p=0}^\infty$  основываясь на множестве наблюдений  $\{\hat{l}_i(p)\}_{p=0}^\infty, i = 1, 2, \dots, N$ .

Для того чтобы индекс импульса соответствовал оценке его ВПИ, шкалы времени ОП должны быть выровнены. Это можно легко достигнуть путем вставки специального импульса в начале излучения объекта наблюдения (при старте) ОП обнаруживают специальный импульс и могут потом анализировать следующие импульсы синхронно.

Рисунок 1 иллюстрирует временные соотношения для двух последовательных импульсов  $p$  и  $p+1$ .

Импульс  $p$  излучается БЛА в момент времени  $l_0(p) = pL$ , которое соответствует глобальному времени  $t_0(p) = pLT_s(1 + \varepsilon_0) + \Omega_0$ .

Время распространения до  $i$ -го ОП есть  $\frac{\|x_0(p) - x_i\|}{c}$ , а момент прихода по глобальному времени равен  $t_i(p) = \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{c} + pLT_s(1 + \varepsilon_0) + \Omega_0$ , где  $c$  — скорость света. Это время может быть преобразовано к локальному времени  $i$ -го узла ЛНС используя выражение (2), оценку которого  $\hat{l}_i(p)$  дает выражение (4). Таким образом, локальная оценка ВПИ связана с позицией БЛА так

$$\begin{aligned} \hat{l}_i(p) &= \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{cT_s(1 + \varepsilon_i)} + pL \frac{1 + \varepsilon_0}{1 + \varepsilon_i} + n_i(p) \\ a) \quad &\approx \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{cT_s}(1 - \varepsilon_i) + pL(1 + \varepsilon_0 - \varepsilon_i) + \\ &+ \frac{\Omega_0 - \Omega_i}{T_s}(1 - \varepsilon_i) + n_i(p) \\ b) \quad &\approx \frac{\|x_0(p) - x_i\|}{cT_s} + pL(1 + \varepsilon_0 - \varepsilon_i) + \frac{\Omega_0 - \Omega_i}{T_s} + n_i(p). \end{aligned} \quad (5)$$

В формуле (5) промежуточные результаты (а) и (б) по аналогии с (2) получены с использованием аппроксимации Тейлора, с той разницей, что при выводе (б) были отброшены первый и третий члены величины  $\varepsilon_i$ , поскольку они не оказывают существенного влияния на конечный результат.

Разность времени прихода сигнала на  $i$ -й и  $j$ -й узлы может быть вычислена используя (5) так

$$\begin{aligned} \hat{l}_i(p) - \hat{l}_j(p) &= \frac{\|x_0(p) - x_i\| - \|x_0(p) - x_j\|}{cT_s} + \\ &+ pL(\varepsilon_j - \varepsilon_i) + \frac{\Omega_j - \Omega_i}{T_s} + n_i(p) - n_j(p) \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражения (6) можно видеть, что данные оценки отличаются от истинных на величину двух дополнительных слагаемых (второго и третьего). Второе слагаемое представляет собой суммарную ошибку, вызванную различными частотными смещениями, в то время как третье слагаемое есть ошибка, вызванная различными временными смещениями. Второе слагаемое не является пренебрежимо малым, так как число  $p$  может быть неограниченным, а третье слагаемое, также может быть значительным из за существенной разности между  $\Omega_i$  и  $\Omega_j$ .

Из этого следует, что оценка временной разности между двумя асинхронными ОП, вычисленная по формуле (6) не является достоверной. Далее опишем подход, который позволяет вычислять временную разность между двумя последовательными импульсами, принятыми на одном ОП.

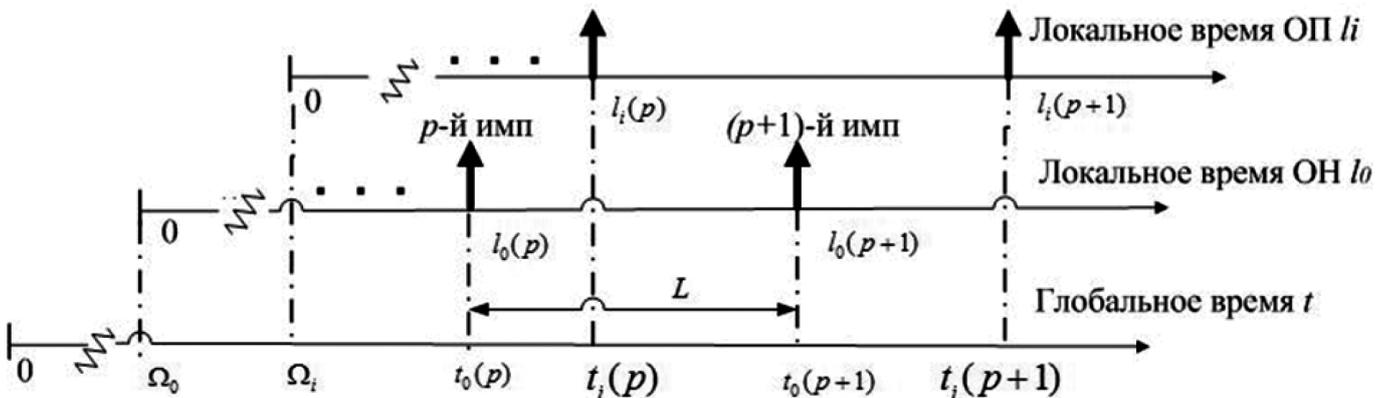


Рис. 1. Временные соотношения двух последовательных импульсов, излученных объектом навигации

**Описание асинхронного разностно-дальномерного алгоритма позиционирования воздушного объекта навигации**

Выражение, описывающее разность времени прихода двух принятых импульсов на  $i$ -м ОП, можно представить так

$$\hat{l}_i(p+1) - \hat{l}_i(p) = \frac{\|\mathbf{x}_0(p+1)\| - \|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s} + L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i + 1) + n_i(p+1) - n_i(p) \quad (7)$$

Если вычесть  $L$  из обеих сторон (7) и определить  $y_i(p) \triangleq \hat{l}_i(p+1) - \hat{l}_i(p) - L$ , то получим

$$\begin{aligned} y_i(p) &= \frac{\|\mathbf{x}_0(p+1) - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s} + \\ &+ L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i) + n_i(p+1) - n_i(p) = \\ &= \frac{\|\mathbf{x}_0(p) + \mathbf{d}(p) - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0(p) - \mathbf{x}_i\|}{cT_s} + e_i(p) = \\ &= f_i(\mathbf{x}_0(p), \mathbf{d}(p)) + e_i(p) \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\mathbf{d}(p) = \mathbf{x}_0(p+1) - \mathbf{x}_0(p)$  перемещение БЛА за время, равное интервалу следования импульсов  $p$  и  $p+1$ , а  $f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}) = (\|\mathbf{x}_0 + \mathbf{d} - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i\|) / cT_s$  — детерминированная функция места БЛА и вектора перемещения. Величина  $e_i(p) = L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i) + n_i(p+1) - n_i(p)$  — есть реальный шум, распределенный по нормальному закону вида  $e_i(p) \sim N(0, 2(L^2\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_n^2))$  и включающий в себя погрешности оценки измеряемого параметра и частотного смещение. Можно видеть, что здесь слагаемое, характеризующее ошибку временного смещения  $(\Omega_j - \Omega_i) / T_s$  (см. формулу (6) отсутствует, а ошибки, вызванные частотным смещением  $pL(\varepsilon_j - \varepsilon_i)$  сведены к величине  $L(\varepsilon_0 - \varepsilon_i)$  и теперь являются ограниченными. По этой причине можно трактовать небольшое частотное смещение в (8) как дополнительную ошибку.

Временную оценку разности между последовательными импульсами, вычисленную  $N$  приемными узлами ЛНС, можно представить в форме  $N$  размерного уравнения

$$\mathbf{y} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}) + \mathbf{e}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{e}$  — случайный гауссовский вектор с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей  $\mathbf{Q} = E[\mathbf{e}\mathbf{e}^T] = \sigma_0^2 \mathbf{I}_N$ . Здесь  $\sigma_0^2$  — дисперсия шума, которая равна  $2(L^2\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_n^2)$ . Мы упустили здесь индекс импульса  $p$  ради упрощения.

Дадим геометрическую интерпретацию рассмотренного выше подхода путем определения  $\mathbf{x}'_i(p) \triangleq \mathbf{x}_i(p) - \mathbf{d}(p)$  и переписав формулу для  $f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{d})$  в виде

$$f_i(\mathbf{x}_0, \mathbf{d}) = \frac{\|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_i\| - \|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}'_i\|}{cT_s}. \quad (10)$$

Выражение (10) аналогично выражению, которое используется в РДС [5], где линией положения является гиперболой, в фокусах которой находятся ОП с координатами  $\mathbf{x}'_i, \mathbf{x}_i$ , где  $\mathbf{x}'_i$  — координаты виртуального ОП, который смещен по отношению к реальному на расстояние  $-\mathbf{d}(p)$  вследствие перемещения БЛА за время излучения двух последовательных импульсов  $p$  и  $p+1$ . В дальнейшем будем называть ОП и его смещенную копию виртуальной парой, рисунок 2.

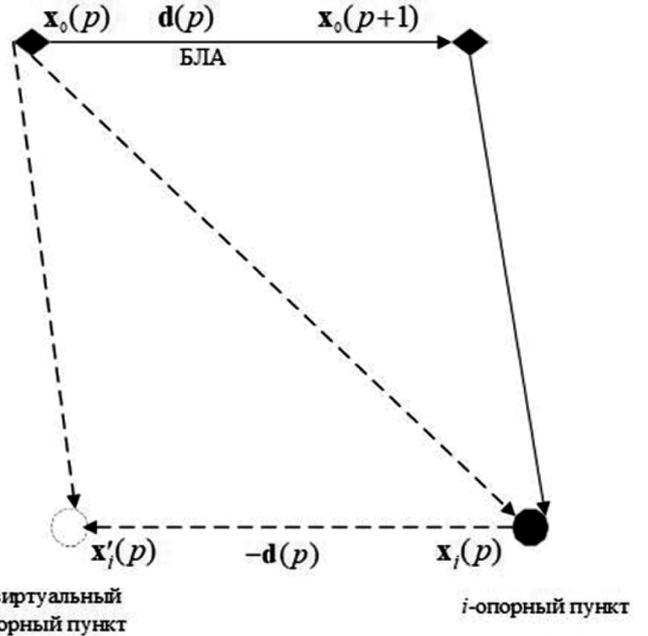


Рис. 2. Схематическое изображение виртуальной пары ОП

Заметим, что виртуальная пара имеет одну и ту же шкалу времени.

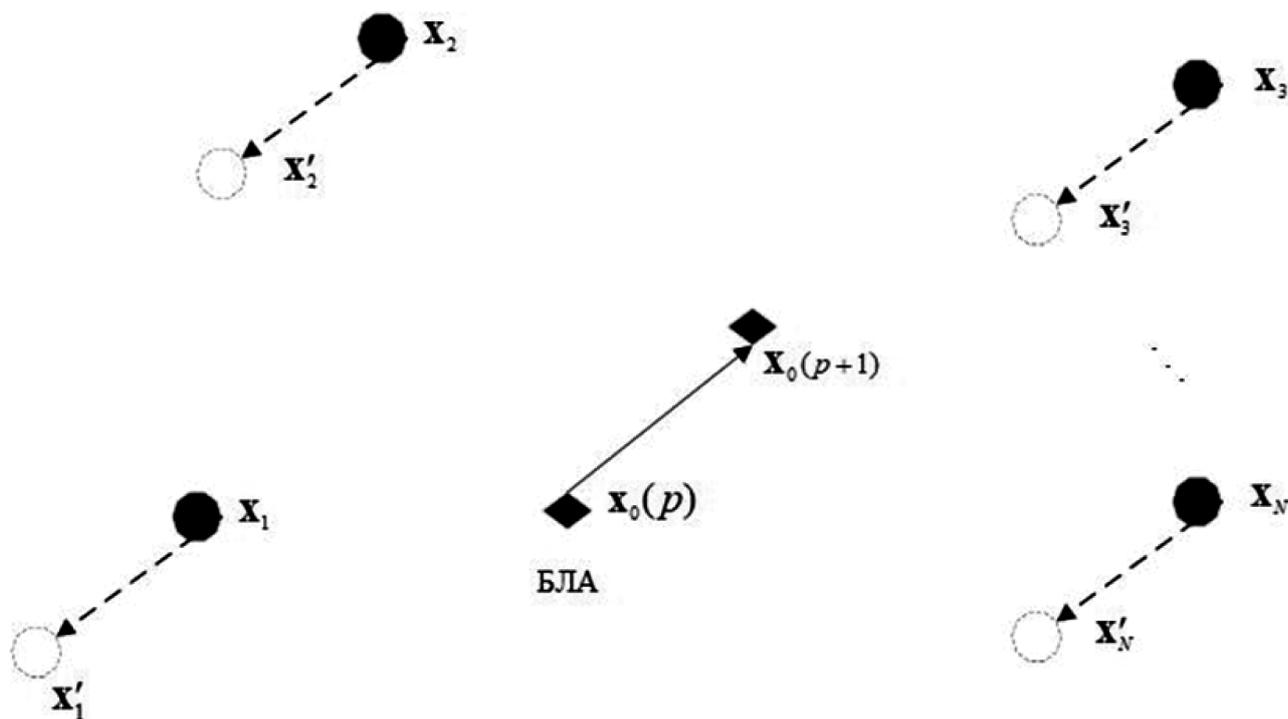
Временная разность (7) может быть вычислена с высокой достоверностью. Она может быть интерпретирована как разность, вычисленная виртуальной парой при приеме одного импульса.

С учетом выше сказанного, асинхронная ЛНС может быть представлена как множество  $N$  полностью синхронизированных виртуальных пар ОП с одинаковым, но неизвестным вектором смещения  $-\mathbf{d}(p)$ , рисунок 3.

Тогда задача позиционирования БЛА может быть представлена как совместное оценивание места источника и вектора смещения  $\mathbf{d}$ . Эту оценку можно выразить через один векторный параметр

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{d} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\theta} \in \mathbb{R}^{2D}.$$

Функцию правдоподобия для вектора наблюдаемых данных можно выразить так



**Виртуальная пара**

Рис. 3. Представление ЛНС в виде множества синхронизированных виртуальных пар

$$p(y; \cdot) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2} |\mathbf{Q}|^{1/2}} \exp\{-1 / 2[y - \mathbf{f}(\mathbf{Q})]^T \mathbf{Q}^{-1} [y - \mathbf{f}(\mathbf{Q})]\}$$

где знак  $|\cdot|$  означает детерминант матрицы.

Согласно методу максимального правдоподобия в качестве оценки неизвестного параметра  $\theta$  принимается такое значение, которое минимизирует следующее выражение

$$\hat{\theta}_{\text{ММП}} = \underset{\theta}{\text{argmin}} [y - \mathbf{f}(\mathbf{Q})]^T \mathbf{Q}^{-1} [y - \mathbf{f}(\theta)]. \quad (11)$$

Поскольку  $f(\cdot)$  есть нелинейная функция измеряемого вектора параметра  $\theta$ , решение (11) может быть найдено путем ее линеаризации с помощью разложения в ряд Тейлора, используя только первые два члена, в окрестности начальной гипотезы  $\hat{\theta}_0$ , для истинного вектора параметров [11]. Отсюда имеем

$$\mathbf{f}(\theta) \approx \mathbf{f}(\hat{\theta}_0) + \mathbf{G}(\hat{\theta}_0)(\theta - \theta_0), \quad (12)$$

где  $\mathbf{G}(\hat{\theta}_0) = \nabla_{\theta} \mathbf{f}(\theta) |_{\theta=\hat{\theta}_0}$  — градиент функции  $\mathbf{f}(\cdot)$  вычисленной при  $\theta = \hat{\theta}_0$

Решая (11) (2.63) с использованием (12) получим

$$\hat{\theta} = \hat{\theta}_0 + \left( \mathbf{G}^T(\hat{\theta}_0) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}(\hat{\theta}_0) \right)^{-1} \mathbf{G}^T(\hat{\theta}_0) \mathbf{Q}^{-1} (y - \mathbf{f}(\hat{\theta}_0)). \quad (13)$$

Начальная гипотеза  $\hat{\theta}_0$ , близкая к истинному решению, обычно не доступна, тогда (13) решается многократно согласно следующей формуле градиентного спуска

$$\hat{\theta}_{k+1} = \hat{\theta}_k + \left( \mathbf{G}^T(\hat{\theta}_k) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}(\hat{\theta}_k) \right)^{-1} \mathbf{G}^T(\hat{\theta}_k) \mathbf{Q}^{-1} (y - \mathbf{f}(\hat{\theta}_k)), \quad (14)$$

где  $\hat{\theta}_k$  есть решение на  $k$ -ой итерации. Однако следует учитывать возможность при расчете по формуле (14) попадание в локальный минимум из за нелинейности функции  $\mathbf{f}(\theta)$ . Более общий метод поиска оценки  $\hat{\theta}_{\text{ММП}}$  описан в [12]. Однако для случая движущегося источника, где оценка предыдущей позиции принимается в качестве начальной гипотезы, итеративный метод градиентного спуска может быть принят за основу.

Согласно выражению (9) имеется  $N$  уравнений с  $2D$  неизвестными, из чего следует что необходимое число ОП должно быть не менее чем  $2D$ , а матрица  $\mathbf{G}^T \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{G}$  должна иметь полный ранг.

Таким образом, вектор параметров  $\hat{\theta}(p) = [\hat{\mathbf{x}}_0(p)^T, \hat{\mathbf{d}}(p)^T]^T$  вычисляется в момент прихода каждого импульса  $p$  с использованием процедуры (14), которая использует предыдущую оценку  $\hat{\theta}(p - 1)$  как начальную гипотезу, рисунок 4.

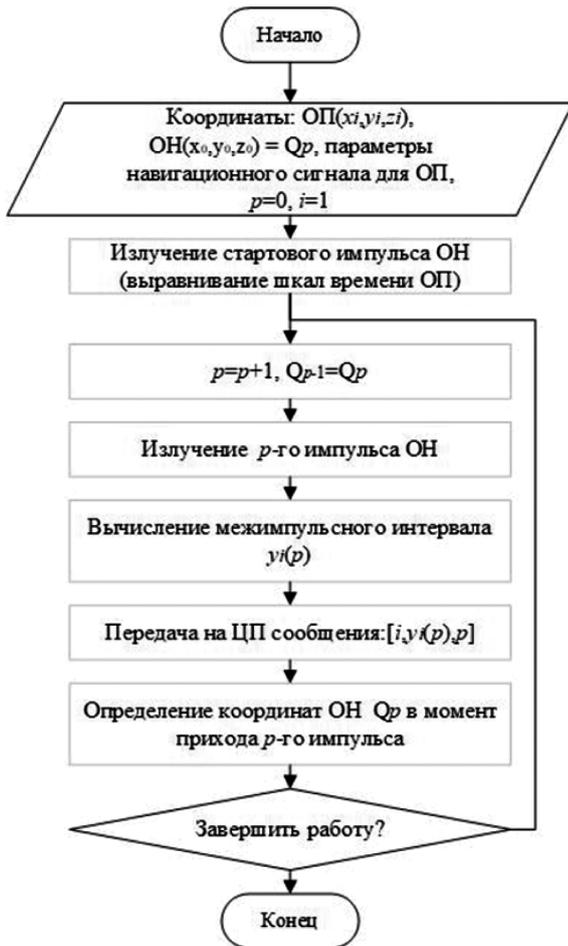


Рис. 4. Блок-схема алгоритма позиционирования БЛА с использованием асинхронного РДМ

Оценка качества позиционирования БЛА с использованием предложенного алгоритма проводилась на программной модели ЛНС, состоящей из шести ОП с известными координатами и разным смещением  $|d|$ .

При расстоянии 5 км между ОП и смещении  $|d|=500$  м точность позиционирования БЛА составила не хуже 40 м на дальности 10 км и не хуже 60 м на дальности 20 км, рисунок 5.

При аналогичной топологии ЛНС и смещении  $d=1000$  м точность позиционирования составила не хуже 40 м на дальности 20 км и не хуже 30 м на дальности 10 км, рисунок 6. При этом полагалось, что ошибки позиционирования ОП отсутствовали.

**Заключение.**

Моделирование показало работоспособность ЛНС, состоящей из  $N$  независимых ОП, для определения координат БЛА асинхронным разностно-дальномерным способом с приемлемой точностью при решении целевой задачи на удалении от сети ОП на расстояние 10–20 км.

Применение одной сети передачи навигационного сигнала от ОН к ОП в совокупности с использованием РДС, не требующего синхронизацию ОП позволяет обеспечить высокую радио-защищенность от средств радиоэлектронной разведки. Расчет координат ОН выполняется на ЦП, что исключает несанкционированный доступ в ЛНС.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Полтавский А.В., Маклаков В.В. Системные принципы создания и применения многоцелевых комплексов беспилотных летательных аппаратов/ Научное издание. — М.: ИПУ РАН, 2010. — 102 с.
2. Deckfinder [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. J. O. Smith and J. S. Abel, "Closed form least-squares source location estimation from range-difference measurements," IEEE Transactions on Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-35, no. 12, pp. 1661–1669, December 1987.
5. Y. T. Chan and K. S. Ho, "A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 42, no. 8, pp. 1905–1915, August 1994.
6. Y. Wang, X. Ma, and G. Leus, "Robust time-based localization for asynchronous networks," IEEE Trans. Signal Process., pp. 4397–4410, Sept 2011.
7. Кирюшкин В.В. Определение координат воздушного судна в полуактивной системе мультilaterации с синхронизацией приемных позиций по запро-сному сигналу / В.В. Кирюшкин, Н.С. Волков, А.М. Медведев // Информационно-измерительные и управляющие системы. — 2019. — № 2. — С. 24–32.
8. High-Precision Synchronized Pulse Generation for Mobile Multistatic Radar System / Zhu Li-Chen, Zhao ChenNing, Guo Qing-Zi, Bu Xiang-Yuan // Advances in Computer Science Research. — 2017. — Vol. 44. — P. 458–463.
9. Крючков И.В. Синхронизация подвижных модулей распределенных радиолокационных комплексов / И.В. Крючков, А.А. Филатов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. — 2012. — С. 45.
10. J. R. Vig, "Introduction to Quartz Frequency Standards," SLCESTR-92-1 (rev. 1), Army Research Laboratory, Electronic and Power Sources Directorate, Fort Monmouth, NJ, at <http://www.ieeeuffc.org/freqcontrol/quartz/vig/vigtoc.htm>, October 1992.
11. D. J. Torrieri, "Statistical theory of passive location systems," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. AES-20, pp. 183–198, March 1989.
12. Y. T. Chan and J. J. Towers, "Sequential Localization of a Radiating Source by Doppler-Shifted Frequency Measurements," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 28, no. 4, pp. 183–198, October 1992.

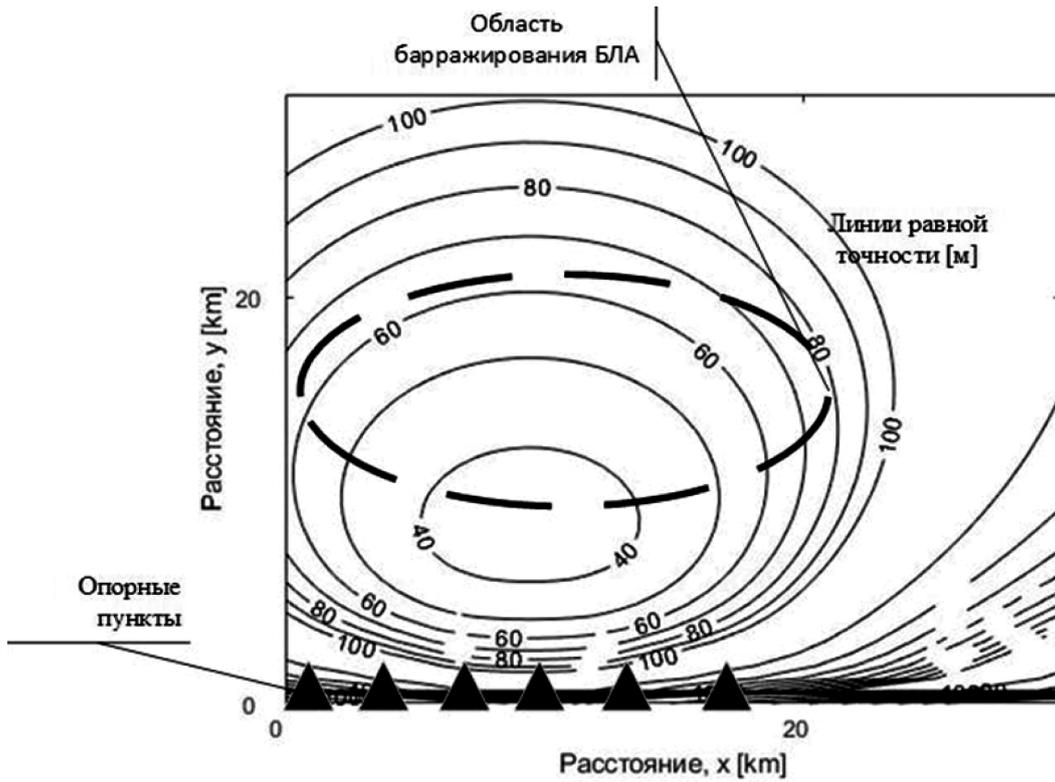


Рис. 5. Схематичное изображение ЛНС и линий равной точности при смещении  $|d|=500$  м

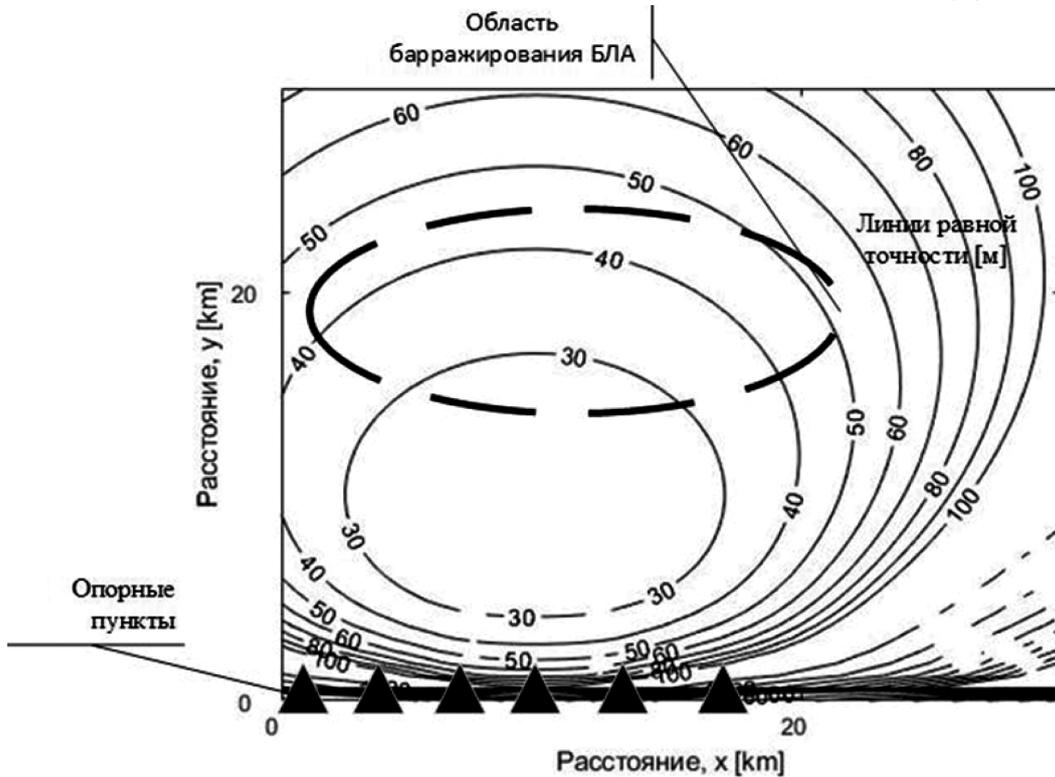


Рис. 6. Схематичное изображение ЛНС и линий равной точности при смещении  $d=1000$  м