

Обработка больших данных при обнаружении области коррекции траектории беспилотного летательного аппарата по рельефу земной поверхности

К. В. Крюкова, e-mail: kamila.kryukova.2015@mail.ru¹

В.И. Лютин, e-mail: lyutin_v_i@mail.ru²

¹Воронежский государственный технический университет

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина

***Аннотация.** В работе на основе теории различения статистических гипотез синтезирован алгоритм обработки данных о рельефе земной поверхности при обнаружении области коррекции траектории движения беспилотного летательного аппарата. Рассчитаны характеристики обнаружения, по которым определено число каналов обнаружителя в зависимости от точности измерения высот при зондировании земной поверхности.*

***Ключевые слова:** теория различения гипотез, достаточная статистика, обнаружение сигналов.*

Введение

При доставке грузов в труднодоступных и малонаселённых местностях с применением беспилотных летательных аппаратов (БЛА), в частности, в арктических областях, где затруднительна корректировка траектории полёта по сигналам от системы глобального позиционирования (GPS) при действии полярных сияний [1], точность вывода БЛА определяется инерциальной навигационной системой (ИНС) [2,3], чего может оказаться недостаточно.

В связи с этим актуальным становится корректировка траектории по рельефу земной поверхности, отображаемому массивом высот, в виде 2,5-мерных пространственных баз данных, называемых геоинформационными системами (ГИС) [4].

Цель работы – синтез алгоритма обнаружения области коррекции траектории движения беспилотного летательного аппарата и оценка точности обнаружения по результатам анализа рельефа земной поверхности под линией пути.

1. Постановка задачи

В системах обнаружения прохода БЛА над областью коррекции требуется высокая скорость принятия решений, поэтому должны применяться элементы искусственного интеллекта, осуществляющего сопоставление поступающих данных с образцами ожидаемых. В связи с этим требуется подготовка ориентированной относительно проектной линии пути БЛА области коррекции траектории, что приводит к необходимости решения задач пересчёта известных отсчётов высот земной поверхности синтеза оптимального алгоритма автоматической системы принятия решений о проходе БЛА над областью коррекции [6].

На рисунке 1 показаны геометрические построения для иллюстрации пересчёта отсчётов высот земной поверхности. Через выбранный участок ландшафта с размерами $A \times B$ в системе координат xOy с осью y , направленной по заданному направлению, например, «Север-Юг», проходит проектная линия пути БЛА с азимутом α [6].

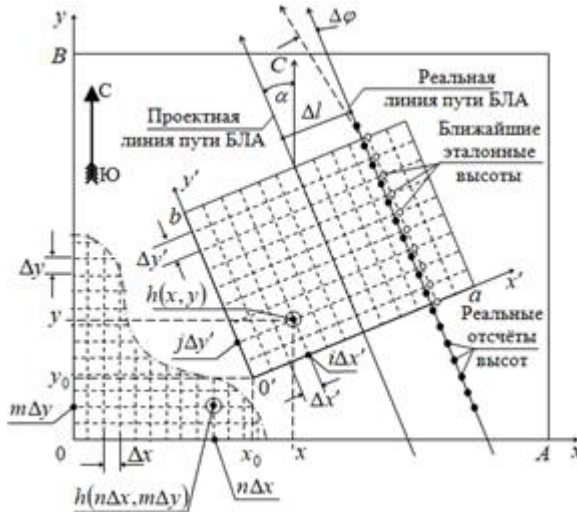


Рис. 1. Выделение области коррекции траектории БЛА

На участке заданы отсчёты высот земной поверхности с интервалами дискретизации $\Delta x, \Delta y$ [6], по которым с применением ряда Котельникова восстанавливается непрерывная функция высот земной поверхности [5] и выбирается область коррекции траектории БЛА с размерами $a \times b$ в системе координат $x'O'y'$ с осью y' , ориентированной вдоль желаемой линии пути БЛА, делящей область

коррекции на две равные части. Таким образом, система координат $x'0'y'$ повернута на угол φ относительно системы координат $x0y$. Ширина области коррекции a выбирается с учётом возможных реальных положений линии пути БЛА от желаемого. Протяжённость области коррекции выбирается с учётом требуемого качества определения положения реальной линии пути БЛА. Область коррекции составляет от 10 до 100 км по каждому из направлений [2, 3].

Сформированные отсчёты высот области коррекции являются эталонными, с ними сравниваются отсчёты высот, измеряемых БЛА при полёте над областью коррекции. Причём реальная линия пути проходит вблизи одной из известных последовательностей высот. Каждая из последовательностей отсчётов при изменении $j = 0, J$ при фиксированных $i = 0, I$ является эталоном для сравнения с измеренными высотами при проходе БЛА над областью коррекции траектории. Проектная линия пути БЛА проходит над центральной последовательностью отсчётов высот области коррекции, реальная линия пути проходит практически параллельно проектной на линейном удалении Δl и не совпадает ни с одной последовательностью отсчётов высот. Наибольшее отклонение линии пути БЛА от любой из $i = 0, I$ последовательностей отсчётов высот не превосходит $\Delta x'/2$, а взятие отсчётов высот высотомером БЛА не совпадает с линиями $j \cdot \Delta y'$ [6].

Точки взятия отсчётов высот показаны на рисунке 1 вдоль реальной линии пути чёрными кружками. Ближайшая последовательность отсчётов высот к реальной последовательности показана на рисунке 1 белыми кружками. Чтобы обнаружить область коррекции и определить местоположение линии реального пути, требуется построить гипотезы H_i $i = 0, I$ о том, что $J + 1$ последних измеренных высот вдоль линии реального пути отклоняются не более чем на $\pm \Delta x'/2$ от одной из i , $i = 0, I$ последовательностей эталонов высоты, причём число различаемых гипотез равно $I_0 = I + 2$, из которых $I + 1$ соответствуют гипотезам H_i $i = 0, I$ и одна гипотеза H_Z об отсутствии области коррекции под линией пути БЛА (zero-гипотеза).

Скорость полёта БЛА считается известной, поэтому интервал взятия отсчётов высот принимается равным интервалу вычисления высот области коррекции, следовательно, число измеренных высот принимается равным числу эталонных высот $J + 1$ вдоль области коррекции. Пусть известно, что в течение интервала наблюдения,

длительностью T_n , БЛА пройдёт через область коррекции. Высоты измеряются через промежутки времени T_0 , называемыми тактовыми интервалами. При скорости полёта БЛА, равной v , тактовый интервал равен $T_0 = \Delta y' / v$, причём $T_n \gg (J + 1)T_0$, то есть время пролёта БЛА над областью коррекции находится внутри интервала T_n .

2. Синтез алгоритма

Рассмотрим задачу сложного обнаружения сигнала в виде последовательности высот, математическое выражение для которой по гипотезе H_i $i = 0, I$ записывается в виде

$$h_i(t) = \sum_{j=0}^J h_{ij} \cdot \text{rect} [t - \theta_0 + j \cdot T_0 - (j-1)T_0 - \tau_0], \quad (1)$$

где T_0 – длительность тактового интервала, τ_0 – задержка, временной сдвиг (не превышающий $\pm T_0/2$) между моментами времени измерения высот (тактовыми моментами) $\{t_k = kT_0, k = 1, 2, \dots\}$ обнаруживаемой последовательности и тактовыми моментами опорной последовательности $\{t_m = mT_0, m = 1, 2, \dots\}$, θ_0 – время окончания пролёта БЛА над областью коррекции,

$$\begin{aligned} & \text{rect} [t - \theta_0 + LT_0 - (j-1)T_0 - \tau_0] = \\ & = \begin{cases} 1, & \text{при } \theta_0 - LT_0 + (j-1)T_0 \leq t - \tau_0 \leq \theta_0 - LT_0 + jT_0, \\ 0, & \text{при других } t. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

В результате измерения высот формируется векторное наблюдение $\bar{z} = \{z_0, z_1, \dots, z_j, \dots, z_J\}$, каждый компонент которого, если справедлива гипотеза H_i $i = 0, I + 1$, равен [7]

$$z(t) = \begin{cases} h_i(t) + n_j, & \text{по гипотезе } H_i, \\ h_z(t) + n_j, & \text{по гипотезе } H_z, \end{cases} \quad t \in [t_0; t_0 + T_n], \quad (3)$$

где n_j – ошибки измерения высот, вызванные не совпадением точек измерения высот с размещением эталонных значений высот и неточностью измерений высотомером БЛА, которые рассматриваются как нормальный белый шум.

В течение интервала наблюдения, длительностью T_n , требуется решить, содержится ли в наблюдаемом колебании $z_i(t)$ сигнал вида (1) либо нет, и определить время его окончания θ_0 .

Задача сложного обнаружения состоит в проверке двух статистических гипотез:

H_i – сложная гипотеза: в наблюдаемом колебании присутствует один из $\overline{h_i(t)}$, $i = \overline{0, I}$ сигналов вида (1) с неизвестным параметром $\theta_0 \in [t_0 : t_0 + T_n]$;

H_z – простая гипотеза: сигнала нет (zero-гипотеза).

В такой постановке задачи при синтезе оптимального обнаружителя применяется критерий отношения правдоподобия (ОП) [7]. Оптимальным правилом решения о наличии сигнала и времени его окончания будет следующее:

1. В течение интервала наблюдения T_n , состоящего из K тактовых интервалов ($K > J$) формируется по K ОП для проверки каждой из $I + 2$ гипотез H_i и из них выбирается наибольшее, которое и сравнивается с порогом обнаружения h :

$$\Lambda(z) = \max_k \{\Lambda_k(z) \geq h\}, \quad \theta_0 = kT_0, \quad k = \arg \max_k \{\Lambda_k(z)\}. \quad (4)$$

В этом случае необходимо иметь устройство памяти большого объёма, и решение о значении θ_0 выносится после окончания T_n .

Другое правило, приближённое к оптимальному, таково [7]:

2. На каждом k -ом такте формируется $I + 2$ ОП $\Lambda_k(z_i)$ и сравнивается с порогом h . Решение о наличии сигнала принимается по первому максимуму ОП, превысившему порог. Время окончания тактового интервала, в котором произойдёт превышение величиной ОП порога, равно

$$\theta_0 = k^* T_0, \quad \text{где } k^* = \min \{K : \Lambda_k(z_i) \geq h\}. \quad (5)$$

В рассматриваемой задаче построения устройства обнаружения с целью обеспечения проведения коррекции траектории БЛА будет использоваться второе правило. Это обусловлено тем, что для работы системы коррекции желательно выносить решение о величине θ_0 без задержки во времени. Порог обнаружения h и качество решающего правила будут определяться исходя из критерия Неймана-Пирсона.

По результатам наблюдений требуется решить, вблизи какой из $i = \overline{0, I}$ последовательностей отсчётов проходит реальная линия пути

БЛА, найти линейное отклонение Δl реальной линии пути от проектной и определить угол поворота линии пути ЛА для возможно более точного прибытия к месту назначения.

Для ортогональных и статистически независимых эталонов, а также для независимых шумовых выборок (погрешностей измерения высоты) $n_j \quad j = 0, J$ плотность распределения вероятностей равна [6]

$$w(\bar{Z}|H_i) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-(J+1)} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2 T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} (z(t) - h_i(t))^2 dt \right\}, \quad i = \overline{0, I}. \quad (6)$$

Отклонение Δl реальной линии пути от проектной равно [6]

$$\Delta l = \sum_{i=0}^I P(H_i|\bar{Z}) \cdot l_i, \quad l_i = i \cdot \Delta x' - a/2, \quad (7)$$

где $P(H_i|\bar{Z}) = w(\bar{Z}|H_i) / \sum_{r=0}^I w(\bar{Z}|H_r)$ – апостериорные вероятности гипотез [6].

По решающему правилу, на каждом k -ом такте формируется ОП

$$\Lambda_k(z_i) = w(\bar{Z}|H_i) / w(\bar{Z}|H_Z) = \exp \{ \Pi_{ik}(\tau_0) \}, \quad (8)$$

где $\Pi_{ik}(\tau_0) = Z_k / (\sigma^2 T_0)$ – логарифм функционала отношения правдоподобия (ЛФОП), зависящий от мешающего параметра τ_0 .

Корреляционный интеграл Z_k [7, 8] процессов $z(t)$ и $h_i(t)$, через который определяется ЛФОП, для последовательности высот, измеренных на $J+1$ последних тактах, при переносе коммутирующей функции $rect[\bullet]$ в пределы интегрирования и изменении очередности операций интегрирования и суммирования равен

$$Z_k = \sum_{i=1}^I h_{i,j} \cdot \int_{LT_0 + (i-1)T_0 + \tau_0}^{kT_0 + iT_0 + \tau_0} z(t) \cdot dt. \quad (9)$$

Пусть длительность тактового интервала T_0 известна точно, а задержка τ_0 имеет равномерное распределение вида

$$p(\tau_0) = 1/T_0, \quad \tau_0 \in [-T_0/2, T_0/2]. \quad (10)$$

Усреднение ОП (8) по распределению (10) выполнить затруднительно, поэтому аппроксимируем распределение (10) суммой M дискретных вероятностей, равных $1/M$, соответствующих

фиксированным значениям задержки, равномерно размещённым на интервале от $-T_0/2$ до $+T_0/2$ [7]

$$\tilde{p}(\tau_0) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \delta(\tau_m - \tau_0), \quad (11)$$

где $\delta(\bullet)$ – функция Дирака, $\tau_m = T_0 \cdot (2m - M - 1)/(2M)$.

Применяя известные методы [7, 8], получим

$$\tilde{\Lambda}_{ik} \cong \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \exp \{ \Pi_{ik}(\tau_m) \}. \quad (12)$$

На рис. 2 изображена структурная схема квазиоптимального обнаружителя, составленная на основании выражения (12).

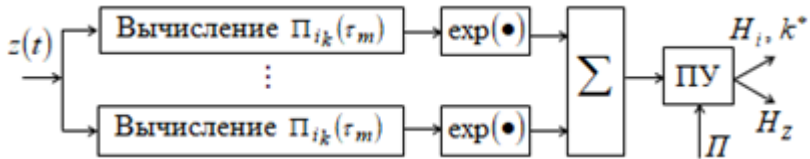


Рис. 2. Структурная схема квазиоптимального обнаружителя

Она содержит M каналов вычисления величины $\Pi_{ik}(\tau_m)$, блоки нелинейного преобразования $\exp(\bullet)$ и схему сложения Σ . Результат сложения по окончании каждого такта подаётся на пороговое устройство ПУ, в котором сравнивается с порогом Π , определяемом в соответствии с критерием Неймана-Пирсона.

Структурная схема устройства определения корреляционного интеграла Z_k , составленная в соответствии с выражением (9), приведена на рис. 3.

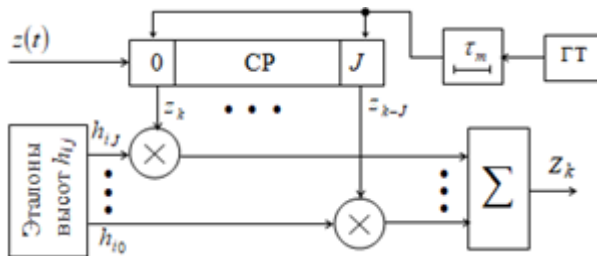


Рис. 3. Устройство определения корреляционного интеграла

Она содержит генератор тактовой (ГТ) частоты, элемент технологической задержки на время τ_m , умножители, на первые входы которых подаются результаты измерения высот на $J + 1$ последних тактах, записанные в сдвиговой регистр (СР), а на вторые – эталонные значения высот. Выходы умножителей подключаются к сумматору Σ .

3. Анализ качества обнаружения области коррекции

Среднее значение величины ОП, определяемого выражением (12), при значениях задержки $\tau_0 = \pm T_0/2$, оказывается наименьшим, поэтому эти значения задержки будут самыми неблагоприятными при обнаружении, и поэтому характеристики обнаружения будут рассчитаны для этого худшего случая. Допустим, что в точке приёма соблюдается высокое отношение сигнал/шум $q \gg 1$. Тогда преобладающим в (12) при $\tau_0 = \pm T_0/2$ будет слагаемое, получаемое либо в 1-ом, либо в M -ом канале. Характеристики обнаружения при этом допущении будут определяться распределением вероятностей либо Z_1 , либо Z_M в зависимости от задержки. Применяя известный метод [7, 8], получаем для 1-го либо M -го канала

$$p(Z_1 | H_1) = (Z_1 / \sigma_Z) \cdot \exp \left\{ - \left(Z_1^2 + E^2 \cdot R^2(\tau) \right) / \left(2\sigma_Z^2 \right) \right\}, \quad (13)$$

где σ_Z^2 – дисперсия величины Z_1 , $R(\tau_m - \tau_0 + k_1 T_0)$ – автокорреляционная функция M -последовательности, $k_1 T_0$ – временной сдвиг между моментами времени t_k и θ_0 .

Автокорреляционная функция (АКФ) последовательности случайных высот при $k_1 = 0$, $\tau_0 = T_0/2$, $\tau_m = \tau_1$ и при $J \gg 1$ равна [8]

$$R(\tau_1 - \tau_0) = R \cong 1 - 1/2M. \quad (14)$$

Вероятность правильного обнаружения D при заданной вероятности ложной тревоги F определяется как [7]

$$D = \left(\sqrt{2\pi} \right)^{-1} \int_{y_0}^{\infty} \exp \left\{ - y^2 / 2 \right\} dy, \quad (15)$$

где $y_0 = u_0 - R\sqrt{q} - \eta$, $u_0 = \sqrt{-2 \ln F}$, $\eta = \frac{1}{2R\sqrt{q}} - \frac{u_0 + R\sqrt{q}}{(2R\sqrt{q})^2}$,

$q = q_i = E_i / (\sigma^2 T_0)$ — отношение сигнал/шум,

$E_i = T_0 \sum_{j=0}^J (h_{i,j})^2$, $i = \overline{0, I}$ — энергия сигнала.

По формуле (15) для двух значений вероятности ложной тревоги $F = 10^{-4}$, $F = 10^{-2}$ и при различном числе каналов обнаружителя рассчитаны характеристики обнаружения последовательностей эталонных высот области коррекции траектории БЛА, которые приведены на рис. 4а,б.

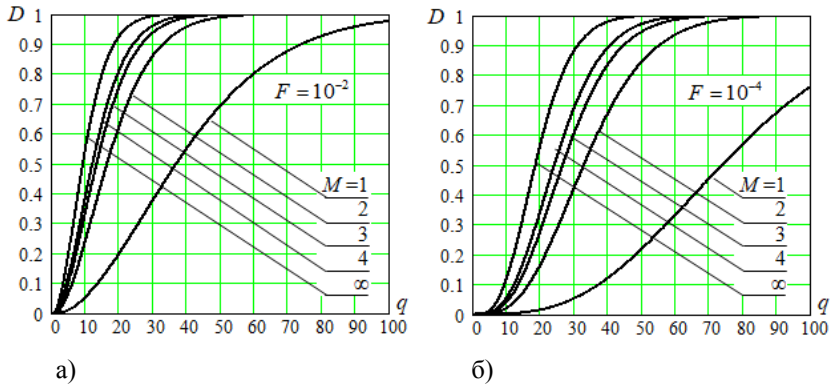


Рис. 4. Характеристики обнаружения

Характеристики рассчитаны для наихудшего случая, когда $|\tau_0| = T_0 / 2$. Область расположения характеристик при $|\tau_0| \leq T_0 / 2$ ограничена асимптотической кривой, соответствующей либо бесконечному числу каналов, либо любому числу каналов, но при $|\tau_0| = 0$, и кривой, соответствующей выбранному числу каналов при $|\tau_0| = T_0 / 2$. Из рисунков видно, что обнаружитель может быть одноканальным при очень высоких отношениях сигнал/шум $q > 100 \dots 120$. Увеличение числа каналов более двух даёт небольшой выигрыш по мощности.

Благодаря учёту свёртывания случайных последовательностей величина параметра q по существу определяет минимальный объём выборки наблюдаемых высот для обеспечения требуемой вероятности обнаружения. Так из рисунка 4, а следует, что двухканальный обнаружитель обеспечивает вероятность обнаружения 0,9 при

параметре $q \approx 35$. Следовательно, число отсчётов высот вдоль области коррекции должно быть не менее $J \geq q \approx 35$.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе синтезирована структурная схема многоканального устройства обнаружения эталонных последовательностей высот области коррекции траектории БЛА, работающая по принципу «скользящего окна». Получены аналитические соотношения для анализа качества обнаружения, которые учитывают автокорреляционные свойства последовательностей, и рассчитаны характеристики обнаружения, с помощью которых определяется достаточное число каналов обнаружителя для обеспечения требуемого качества обнаружения при заданных условиях наблюдения.

Список литературы

1. Черноус, С. А. Навигация GPS/ГЛОНАСС в Арктике и полярные сияния : /С. А. Черноус // Вестник Мурманского государственного университета. – 2016. – Т.19, №4. –С.806-812.
2. Ярлыков, М. С. Статистическая теория радионавигации : / М. С. Ярлыков – М. : Радио и связь, 1985. – 345 с.
3. Баклицкий, В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения : / В. К. Баклицкий. – Тверь : ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
4. Гурвиц, Джудит. Просто о больших данных : / Гурвиц Джудит, Ньюджент Алан, Халпер Ферн, Кауфман Марсия : [перевод с английского]. – Москва : Эксмо, 2015. – 400 с.
5. Каппелини, В. Цифровые фильтры и их применение : / В. Каппелини, А. Дж. Константиноидис, П. Эмилиани. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 360 с.
6. Лютин, В. И. Обработка больших данных в задачах оценки точности наведения беспилотных летательных аппаратов по рельефу земной поверхности / В. И. Лютин, Н. А. Босиков // Материалы XX Международной научно-методической конференции «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронеж, 13-14 февраля 2020 г.) – Воронеж, 2020. – Том 6, С.136-143.
7. Вайнштейн, Л. А. Выделение сигналов на фоне случайных помех : / Л. А. Вайнштейн, В. Д. Зубаков. – М. : Сов. радио, 1960. – 449 с.
8. Тузов, Г. И. Статистическая теория приёма сложных сигналов : / Г. И. Тузов. – М. : Сов. радио, 1977. – 400 с.