



УДК 623.746.2
ГРНТИ 78.25.31

БЕСПОИСКОВАЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ ТОЧЕЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ ГРУППОЙ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А.В. КОМАРОВ

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

А.И. НАУМОВ, кандидат технических наук, профессор

ЗАО «Гефест и Т» (г. Жуковский)

Е.К. КИЧИГИН, кандидат технических наук, профессор

ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)

В статье рассматривается беспойсковая корреляционно-экстремальная навигационная система с распределенной системой точечных измерений высоты рельефа местности группой взаимодействующих беспилотных летательных аппаратов. Исследуется вопрос повышения точности коррекции навигационных параметров от беспойсковой корреляционно-экстремальной навигационной системы за счет включения в обработку измерений высоты рельефа местности, выполненных взаимодействующими беспилотными летательными аппаратами из состава группы. Рассмотрены варианты функционирования беспойсковой корреляционно-экстремальной навигационной системы с распределенной системой точечных измерений для полета группы беспилотных летательных аппаратов в сомкнутых и разомкнутых боевых порядках. Получены оптимальные относительно минимума дисперсии оценки погрешностей численных параметров по двум координатам и двум скоростям.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная навигационная система, беспилотный летательный аппарат, групповой полет, фильтр Калмана.

SEARCHLESS CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEM WITH A DISTRIBUTED SYSTEM OF TERRAIN ELEVATION POINT MEASUREMENTS BY A GROUP OF COOPERATING UNMANNED AERIAL VEHICLES

A.V. KOMAROV

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

A.I. NAUMOV, Candidate of Technical sciences, Professor

JSC «Gefest and T» (Zhukovsky)

E.K. KICHIGIN, Candidate of Technical sciences, Professor

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)

The article considers a searchless correlation-extreme navigation system with a distributed system of terrain elevation point measurements by a group of cooperating unmanned aerial vehicles. The issue of improving the accuracy of correction of navigation parameters from a searchless correlation-extreme navigation system by including in the processing of terrain elevation measurements made by interacting unmanned aerial vehicles from the group is investigated. Variants of functioning of a searchless correlation-extreme navigation system with a distributed system of point measurements for the flight of a group of unmanned aerial vehicles in closed and open battle formations are considered. The optimal



estimates of errors of numerical parameters for two coordinates and two velocities are obtained with respect to the minimum variance.

Keywords: correlation-extreme navigation system, unmanned aerial vehicle, group flight, Kalman filter.

Введение. Постоянно возрастающие требования к скоростям, диапазонам высот и маневренности, предъявляемые к перспективным беспилотным летательным аппаратам (БПЛА), делают невозможным их функционирование без точной и надежной навигационной системы. Роль такой системы на борту БПЛА выполняет инерциальная навигационная система (ИНС). В ИНС имеются нарастающие по времени ошибки определения координат и скорости, без учета и парирования которых не обеспечиваются требуемые точности. Одним из перспективных способов парирования ошибок ИНС является применение корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС) по геофизическим полям, в частности, КЭНС по полю высот рельефа местности (рельефометрические КЭНС) с беспойсковыми алгоритмами обработки информации [1].

Актуальность. Актуальность и новизна предлагаемой в данной работе беспойсковой КЭНС с распределенной системой точечных измерений высоты рельефа местности группой взаимодействующих БПЛА заключаются в том, что в предыдущих работах [2–4] по беспойсковым КЭНС каждое воздушное судно использовало для оценивания ошибок счисления координат местоположения и скоростей только свои измерения высоты рельефа местности. При этом среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибок оценивания находилось в лучшем случае на уровне 20...30 метров при полетах над пересеченной местностью.

В данной работе предлагается использовать параллельно несколько беспойсковых КЭНС, каждая из которых обрабатывает измерения высоты рельефа местности от других БПЛА, вычислять на основании решений всех беспойсковых КЭНС комплексную оценку.

Рассмотрим групповой полет БПЛА и переход из инерциально-спутникового режима счисления координат в автономный инерциальный режим с коррекцией от рельефометрической КЭНС. В соответствии со сделанным предположением погрешности счисления скоростей и координат в навигационном комплексе (НК) БПЛА являются малыми величинами, что позволяет применять для коррекции беспойсковую КЭНС [5] по бортовым измерениям высоты рельефа местности. Исследуем вопрос о повышении точности коррекции от беспойсковой КЭНС за счет включения в обработку измерений высоты рельефа местности, выполненных взаимодействующими БПЛА из состава группы.

Будем полагать, что в НК каждого из БПЛА функционирует беспойсковая рельефометрическая КЭНС, которая представляет собой вариант дискретного фильтра Калмана для специальным образом организованного наблюдения [6]. Для обработки информации в системе выполняются процедуры, указанные ниже.

1. Измерение высоты рельефа местности \tilde{h}_{pkj} в точке местоположения k -го БПЛА в момент времени t_j может быть представлено следующим выражением:

$$\tilde{h}_{pkj} = h_p(x_{kj}, z_{kj}) + \delta h_{-k} + \delta h_{\sim kj}, \quad (1)$$

где $h_p(x_{kj}, z_{kj})$ – истинное значение высоты рельефа местности в точке местоположения k -го БПЛА в момент времени t_j ; δh_{-k} – постоянная ошибка измерения высоты k -го БПЛА; $\delta h_{\sim kj}$ – случайные ошибки измерения высоты k -го БПЛА в момент времени t_j , представляемые белозумовой нормальной последовательностью с дисперсией R_k .

2. Запрос эталонного значения высоты рельефа местности формируется в НК k -го БПЛА по оценкам текущих координат местоположения $(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})$, которые содержат ошибки $(\delta x_k, \delta z_k)$.



Текущие координаты местоположения БПЛА $(x_{kj} \quad z_{kj})$ будем связывать с прямоугольной системой координат, в которой представлена информация цифровой карты высот рельефа местности (ЦКРМ), например, в системе координат Гаусса-Крюгера для зоны района полетов.

$$\begin{cases} \tilde{x}_{kj} = x_{kj} + \delta x_k, \\ \tilde{z}_{kj} = z_{kj} + \delta z_k, \end{cases} \quad (2)$$

$$h_{pkj}^{\text{ЦКРМ}} = h_p^{\text{ЦКРМ}}(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj}).$$

3. С учетом структуры описания оценок текущих координат местоположения БПЛА результат измерения высоты рельефа местности \tilde{h}_{pkj} может быть представлен в виде

$$\tilde{h}_{pkj} = h_p(\tilde{x}_{kj} - \delta x_k, \tilde{z}_{kj} - \delta z_k) + \delta h_{-k} + \delta h_{-kj}. \quad (3)$$

В предположении малости ошибок $(\delta x_k \quad \delta z_k)$ при разложении (3) в ряд Тейлора, получим следующее выражение [6]:

$$\tilde{h}_{pkj} \approx h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj}) - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial x} \delta x_k - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial z} \delta z_k + \delta h_{-k} + \delta h_{-kj}. \quad (4)$$

4. Формирование наблюдения Z для беспойсковой КЭНС выполняется по разностной схеме [6]:

$$Z_{kkj} = \tilde{h}_{pkj} - h_p^{\text{ЦКРМ}}(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj}) = -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial x} \delta x_k - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial z} \delta z_k + \delta h_{-k} + \delta h_{-kj} \quad (5)$$

или

$$\begin{aligned} Z_{kkj} &= H(\delta x_{kj}, \delta z_{kj}, \delta h_{-k}) + \eta_{kj}, \\ H(\delta x_{kj}, \delta z_{kj}, \delta h_{-k}) &= -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial x} \delta x_{kj} - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial z} \delta z_{kj} + \delta h_{-k}, \\ \eta_{kj} &= \delta h_{-kj}, \quad \eta_{kj} \leftrightarrow N(0, R_k), \quad R_k = D[\delta h_{-k}]. \end{aligned} \quad (6)$$

5. Модель процесса в беспойсковых рельефометрических КЭНС имеет 5-й порядок, в вектор состояния включены ошибки определения текущих координат местоположения $(\delta x_k \quad \delta z_k)$, ошибки определения компонент скорости $(\delta Vx_k \quad \delta Vz_k)$ и постоянная ошибка измерения в вертикальном канале δh_{-k} в НК k -го БПЛА: $\delta \mathbf{x}_k = [\delta x_k \quad \delta z_k \quad \delta Vx_k \quad \delta Vz_k \quad \delta h_{-k}]^T$. Динамика процесса описывается уравнением:

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{x}_{kj+1} &= \mathbf{A}_k \delta \mathbf{x}_{kj} + \mathbf{B}_k \xi_{kj}, \\ \mathbf{A}_k &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_{kj+1} - t_{kj} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & t_{kj+1} - t_{kj} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} 0.5(t_{kj+1} - t_{kj})^2 & 0 \\ 0 & 0.5(t_{kj+1} - t_{kj})^2 \\ t_{kj+1} - t_{kj} & 0 \\ 0 & t_{kj+1} - t_{kj} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ \xi_{kj} &= [\delta a_{xkj} \quad \delta a_{zkj}]^T, \quad \xi_{kj} \leftrightarrow N(0, \mathbf{Q}_k), \end{aligned} \quad (7)$$



где ξ_{kj} – вектор шумов процесса размерности 2 с матрицей интенсивности Q_k .

Линейная модель процесса (7) и линейное уравнение наблюдения (6), которое с учетом структуры δx_{kj} преобразуется к виду

$$\begin{aligned} Z_{kk} &= \mathbf{H}\delta x_k + \eta_k, \\ \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial x} & -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial z} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \eta_k &= \delta h_{-k}, \quad \eta_k \leftrightarrow N(0, R_k). \end{aligned} \quad (8)$$

В предположении нормальных законов распределения и взаимной независимости шумов процесса и шума измерения позволяют применить для оценивания значений δx_{kj} дискретный фильтр Калмана:

$$\delta \hat{x}_{j+1,j} = \Phi_{j+1,j} \delta \hat{x}_j, \quad (9)$$

$$H_{j+1} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial h_p^k(\hat{x}_{j+1,j}, \hat{z}_{j+1,j})}{\partial x} & -\frac{\partial h_p^k(\hat{x}_{j+1,j}, \hat{z}_{j+1,j})}{\partial z} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$P_{j+1,j} = \Phi_{j+1,j} P_j \Phi_{j+1,j}^T + \Gamma_{j+1,j} Q_{j+1,j}^T, \quad (11)$$

$$K_{j+1} = P_{j+1,j} H_{j+1}^T (H_{j+1} P_{j+1,j} H_{j+1}^T + R_{j+1})^{-1}, \quad (12)$$

$$\delta \hat{x}_{j+1} = \delta \hat{x}_{j+1,j} + K_{j+1} (z_{j+1} - H_{j+1} \delta \hat{x}_{j+1,j}), \quad (13)$$

$$P_{j+1} = (I - K_{j+1} H_{j+1}) P_{j+1,j}. \quad (14)$$

Предположим, что l -й БПЛА из состава группы, наблюдаемый k -м БПЛА, передает по каналам связи измерение высоты рельефа местности в точке своего текущего местоположения

$$\tilde{h}_{pli} = h_p(x_{li}, z_{li}) + \delta h_{-l} + \delta h_{-l}, \quad (15)$$

где δh_{-l} – постоянная ошибка измерения высоты l -го БПЛА; δh_{-l} – случайные ошибки измерения высоты l -го БПЛА. При этом в бортовом комплексе k -го БПЛА выполнено измерение дальности до l -го БПЛА \tilde{R}_{klj} и его азимут \tilde{A}_{klj} . Тогда в НК k -го БПЛА могут быть сформированы оценки координат местоположения l -го БПЛА в момент времени выполнения им измерения высоты рельефа:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{lj} &= \tilde{x}_{kj} + \tilde{R}_{klj} \cos \tilde{A}_{klj}, \\ \tilde{x}_{lj} &\approx (x_{kj} + \delta x_k) + \Delta x_{klj} + (\delta R_{klj} \cos \tilde{A}_{klj} - \delta A_{klj} \tilde{R}_{klj} \sin \tilde{A}_{klj}) = \\ &= (x_{kj} + \Delta x_{klj}) + \delta x_k + \delta x_{kl}, \end{aligned} \quad (16)$$



$$\begin{aligned} \tilde{z}_{lj} &= \tilde{z}_{kj} + \tilde{R}_{klj} \sin \tilde{A}_{klj}, \\ \tilde{z}_{lj} &\approx (z_{kj} + \delta z_k) + \Delta z_{klj} + (\delta R_{klj} \sin \tilde{A}_{klj} + \delta A_{klj} \tilde{R}_{klj} \cos \tilde{A}_{klj}) = \\ &= (z_{kj} + \Delta z_{klj}) + \delta z_k + \delta z_{kl}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $[\Delta x_{klj} \ \Delta z_{klj}]^T$ – радиус-вектор l -го БПЛА из точки местоположения k -го БПЛА;

$$\delta x_{kl} = \delta R_{klj} \cos \tilde{A}_{klj} - \delta A_{klj} \tilde{R}_{klj} \sin \tilde{A}_{klj}, \quad (18)$$

$$\delta z_{kl} = \delta R_{klj} \sin \tilde{A}_{klj} + \delta A_{klj} \tilde{R}_{klj} \cos \tilde{A}_{klj} \quad (19)$$

– погрешности расчета компонент радиус-вектора, порождаемые погрешностями измерения дальности R_{klj} и азимута A_{klj} визирования l -го БПЛА с борта k -го БПЛА в j -й момент времени.

Таким образом, если оценки собственных координат в НК k -го БПЛА имеют вид

$$\begin{cases} \tilde{x}_{kj} = x_{kj} + \delta x_k, \\ \tilde{z}_{kj} = z_{kj} + \delta z_k, \end{cases} \quad (20)$$

то расчетные значения координат l -го БПЛА в НК k -го БПЛА определяются выражением:

$$\begin{cases} \tilde{x}_{lj} = x_{lj} + \delta x_{kl} + \delta x_k, \\ \tilde{z}_{lj} = z_{lj} + \delta z_{kl} + \delta z_k. \end{cases} \quad (21)$$

Структура ошибок (21) отличается от структуры ошибок (20) наличием дополнительных случайных погрешностей $(\delta x_{kl} \ \delta z_{kl})$, порожденных шумами измерения расстояния и азимута. В то же время структура ошибок (21) в явном виде содержит ошибки НК k -го БПЛА $(\delta x_k \ \delta z_k)$. Этот вывод позволяет сформировать на основе полученного от l -го БПЛА измерения \tilde{h}_{plj} новое дополнительное наблюдение специального вида для беспоисковой КЭНС k -го БПЛА.

Рассмотрим разность полученного по каналам связи измерения высоты рельефа в НК l -го БПЛА и значения высоты рельефа местности в точке предполагаемого местоположения l -го БПЛА на тот же момент времени. С учетом представления (21) получим:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_{plj} &= h_p(x_{lj}, z_{lj}) + \delta h_{-l} + \delta h_{-lj} \approx \\ &\approx h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj}) - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial x} (\delta x_{kj} + \delta x_{-kl}) - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial z} (\delta z_{kj} + \delta z_{-kl}) + \delta h_{-l} + \delta h_{-lj}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} Z_{klj*} &= \tilde{h}_{plj} - h_p^{\text{ПКРМ}}(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj}) = -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial x} (\delta x_k + \delta x_{-kl}) - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial z} (\delta z_k + \delta z_{-kl}) + \delta h_{-l} + \delta h_{-lj} = \\ &= -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial x} \delta x_k - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial z} \delta z_k + \delta h_{-l} + \delta h_{-lj}^*, \end{aligned} \quad (23)$$



$$\delta h_{-lj}^* = \delta h_{-lj} - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial x} \delta x_{-kl} - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial z} \delta z_{-kl}, \quad (24)$$

где δh_{-l} – постоянная ошибка измерения высоты, δh_{-lj} – случайная (белозумовая) погрешность измерения высоты в НК l -го БПЛА, δh_{-lj}^* – суммарная случайная погрешность наблюдения, формируемого по измерению высоты рельефа местности l -м БПЛА.

Определим статистические характеристики суммарной погрешности наблюдения δh_{-lj}^* . С учетом (18) и (19) выражение (24) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \delta h_{-lj}^* = & \delta h_{-lj} + \left(-\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial x} \cos \tilde{A}_{klj} - \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial z} \sin \tilde{A}_{klj} \right) \delta R_{klj} + \\ & + \tilde{R}_{klj} \left(\sin \tilde{A}_{klj} \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial x} - \cos \tilde{A}_{klj} \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial z} \right) \delta A_{klj} = \delta h_{-lj} + D_{klj} \delta R_{klj} + E_{klj} \delta A_{klj}. \end{aligned} \quad (25)$$

Погрешности измерений высоты δh_{-lj} , дальности δR_{klj} и азимута δA_{klj} предполагаются независимыми белозумовыми последовательностями с известными дисперсиями $D[\delta h_{-lj}]$, $D[\delta R_{klj}]$, $D[\delta A_{klj}]$. Следовательно, и суммарная погрешность δh_{-lj}^* будет обладать свойствами белого шума с дисперсией

$$D[\delta h_{-l}^*] = D[\delta h_{-l}] + (C_R)^2 D[\delta R_{kl}] + (C_A)^2 \tilde{R}_{kl}^2 D[\delta A_{kl}], \quad (26)$$

где

$$\begin{aligned} C_R = & \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial x} \cos \tilde{A}_{kl} + \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial z} \sin \tilde{A}_{kl}, \\ C_A = & -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial x} \sin \tilde{A}_{kl} + \frac{\partial h_p(\tilde{x}_{kj}, \tilde{z}_{kj})}{\partial z} \cos \tilde{A}_{kl}. \end{aligned}$$

Отличие дополнительного наблюдения (23) от (5) заключается в следующем:

1) частные производные от функции, описывающей высоту рельефа местности, вычисляются в расчетной точке местоположения l -го БПЛА;

2) дополнительное наблюдение Z_{klj}^* не содержит постоянной ошибки измерения высоты в НК k -го БПЛА, но содержит постоянную ошибку измерения высоты в НК l -го БПЛА;

3) дисперсия шума измерения (26) зависит не только от характеристик измерителей l -го БПЛА, но и от характеристик рельефа местности в точке местонахождения l -го БПЛА и характеристик бортовой системы локации k -го БПЛА, измеряющей дальность R_{kl} и азимута A_{kl} текущего положения l -го БПЛА относительно k -го БПЛА.

В силу особенности дополнительного наблюдения 2) непосредственное его использование в беспойсковой КЭНС k -го БПЛА (9)–(14) невозможно. В то же время относительно небольшие вычислительные затраты, потребные алгоритму беспойсковой КЭНС, позволяют реализовать в НК k -го БПЛА несколько параллельно функционирующих фильтров Калмана, число которых определяется количеством БПЛА из состава группы, взаимодействующих с k -м БПЛА. Предлагается, чтобы каждый из этих фильтров Калмана реализовал вариант беспойсковой КЭНС, оценивающий погрешности счисления скоростей и координат в НК k -го БПЛА по измерениям высоты рельефа местности, выполненному l -м БПЛА, а также оценивающий постоянную ошибку измерения высоты l -го БПЛА. Таким образом может быть сформирована



беспоисковая корреляционно-экстремальная навигационная система с распределенной системой точечных измерений высоты рельефа местности группой взаимодействующих БПЛА.

Опишем предлагаемую структуру беспоисковой КЭНС с распределенной системой точечных измерений.

Введем для вектора состояния l -го фильтра беспоисковой КЭНС k -го БПЛА обозначение $\delta \mathbf{x}_{kl}$, l -й фильтр обрабатывает измерения высоты рельефа местности, выполненные l -м БПЛА, в интересах коррекции численных координат в НК k -го БПЛА. В соответствии с (23) его структура имеет следующий вид:

$$\delta \mathbf{x}_{kl} = [\delta x_{kl} \quad \delta z_{kl} \quad \delta Vx_{kl} \quad \delta Vz_{kl} \quad \delta h_{-l}]^T, \quad (27)$$

здесь δx_{kl} δz_{kl} – погрешности счисления координат в НК k -го БПЛА; δVx_{kl} δVz_{kl} – погрешности счисления скоростей в НК k -го БПЛА; δh_{-l} – постоянная ошибка измерения высоты l -м БПЛА. С учетом (27) матрица наблюдения l -го фильтра принимает вид:

$$\mathbf{H}_{kl} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial x} & -\frac{\partial h_p(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})}{\partial z} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Z_{kl} = \mathbf{H}_{kl} \delta \mathbf{x}_{kl} + \eta_{kl}, \quad (28)$$

$$\eta_{kl} = \delta h_{-l}^*,$$

где δh_{-l}^* – случайный шум, определенный в (21); оценки $(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})$ координат местоположения l -го БПЛА в момент выполнения им измерения высоты рельефа местности вычисляются в соответствии с (16) и (17).

Для фильтров с номерами $l \neq k$ дисперсия шума $D[\eta_{kl}]$ определяется в соответствии с (26), с учетом текущих значений измеряемых параметров R_{kl} , A_{kl} и градиента высоты рельефа местности в точке $(\tilde{x}_{lj}, \tilde{z}_{lj})$, вычисляемого по эталонной информации КЭНС – матрице ЦКРМ. Для k -го фильтра имеют место соотношения (6).

В результате функционирования предлагаемой беспоисковой КЭНС с распределенной системой точечных измерений на борту каждого из БПЛА, выполняющих полет в группе, будет формироваться набор из M оценок погрешностей счисления

$$\delta \hat{x}_{kl}, \delta \hat{z}_{kl}, \delta \hat{Vx}_{kl}, \delta \hat{Vz}_{kl}, l=1, \dots, M, \quad (29)$$

сопровождаемых оценками дисперсий для этих параметров, даваемых диагональными элементами матрицы ковариации l -го фильтра:

$$P_{kl}[1,1], P_{kl}[2,2], P_{kl}[3,3], P_{kl}[4,4], l=1, \dots, M, \quad (30)$$

здесь k – условный номер БПЛА, для которого рассматривается беспоисковая КЭНС.

Оценки (29) и (30) получены в НК k -го БПЛА как результаты обработки M независимых последовательностей измерения высоты рельефа местности. Следовательно, они позволяют сформировать оптимальные, в смысле минимума, дисперсии оценки погрешностей численных параметров $\delta \hat{x}_k, \delta \hat{z}_k, \delta \hat{Vx}_k, \delta \hat{Vz}_k$:



$$\delta \hat{x}_k = \sum_{l=1}^M a_l \delta \hat{x}_{kl}, \quad D[\delta \hat{x}_k] = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \frac{1}{P_{kl}[1,1]}}, \quad a_l = \frac{D[\delta \hat{x}_k]}{P_{kl}[1,1]}, \quad (31)$$

$$\delta \hat{z}_k = \sum_{l=1}^M b_l \delta \hat{z}_{kl}, \quad D[\delta \hat{z}_k] = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \frac{1}{P_{kl}[2,2]}}, \quad b_l = \frac{D[\delta \hat{z}_k]}{P_{kl}[2,2]}, \quad (32)$$

$$\delta \hat{V}x_k = \sum_{l=1}^M c_l \delta \hat{V}x_{kl}, \quad D[\delta \hat{V}x_k] = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \frac{1}{P_{kl}[3,3]}}, \quad c_l = \frac{D[\delta \hat{V}x_k]}{P_{kl}[3,3]}, \quad (33)$$

$$\delta \hat{V}z_k = \sum_{l=1}^M d_l \delta \hat{V}z_{kl}, \quad D[\delta \hat{V}z_k] = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \frac{1}{P_{kl}[4,4]}}, \quad d_l = \frac{D[\delta \hat{V}z_k]}{P_{kl}[4,4]}, \quad (34)$$

здесь значения оценок $\delta \hat{x}_{kl}$, $\delta \hat{z}_{kl}$, $\delta \hat{V}x_{kl}$, $\delta \hat{V}z_{kl}$ – соответствуют выходным значениям уравнения прогноза состояния на момент времени расчета (31)–(34), значения оценок $P_{kl}[1,1]$, $P_{kl}[2,2]$, $P_{kl}[3,3]$, $P_{kl}[4,4]$ – соответствуют выходным значениям уравнения прогноза матрицы ковариации состояния в l -м фильтре Калмана (11), $l = 1, \dots, M$.

Уравнения (31)–(34) замыкают схему обработки информации в беспойсковой КЭНС с распределенной системой точечных измерений и обеспечивают децентрализованные характеристики системы обработки информации в группе:

при исключении любого БпЛА из системы обмена информацией (полного исключения или временного) точностные характеристики (31)–(34) снижаются, но система остается полностью работоспособной; фильтр, соответствующий в составе беспойсковой КЭНС k -го БпЛА утраченному объекту, переходит в режим прогноза, точность его навигационного решения деградирует в соответствии с точностными характеристиками НК k -го БпЛА;

при повторном входе объекта во взаимодействие после временного исключения соответствующий фильтр может быть переинициализирован; вновь появившийся в системе взаимодействия объект (при наличии резерва вычислительной производительности) включается в КЭНС с добавлением нового фильтра;

допустим вариант функционирования, когда измерение высоты рельефа преднамеренно выполняют только один или несколько БпЛА из состава группы, обеспечивая измерительной информацией беспойсковые КЭНС всех БпЛА, которые имеют с ними взаимодействие.

В случае, когда полет группы выполняется в сомкнутом боевом порядке (малые величины R_{kl}), и характеристики рельефа таковы, что можно принять предположение об одинаковом градиенте рельефа местности под всеми БпЛА группы в одном временном срезе, решения уравнений для ковариационной матрицы во всех M фильтрах будут практически одинаковыми. Следствием этого является упрощение выражений (31)–(34).

Ограничение на применение предложенного подхода определяется текущими оценками дисперсий численных координат $D[\delta \hat{x}_k]$ и $D[\delta \hat{z}_k]$, расстояниями между БпЛА в боевом порядке и точностными характеристиками измерения R_{kl} и A_{kl} , т.к. возможна ситуация, когда суммарные погрешности $(\delta x_{kl} + \delta x_k)$ и $(\delta z_{kl} + \delta z_k)$ в (21) превысят ограничения, допустимые для выполнения линеаризации и применения беспойсковой КЭНС. В этом случае необходимо



рассматривать нелинейный Байесовский подход к построению фильтров, выполняющих оценивание погрешностей счисления координат НК k -го БпЛА по измерениям высоты рельефа местности l -м БпЛА, $l = 1, \dots, M, l \neq k$.

$$\begin{aligned} \delta \hat{x}_k &= \frac{1}{M} \left(\sum_{l=1}^M \delta \hat{x}_{kl} \right), & D[\delta \hat{x}_k] &= \frac{1}{M} P_{kk}[1,1], \\ \delta \hat{z}_k &= \frac{1}{M} \left(\sum_{l=1}^M \delta \hat{z}_{kl} \right), & D[\delta \hat{z}_k] &= \frac{1}{M} P_{kk}[2,2], \\ \delta \hat{V}x_k &= \frac{1}{M} \left(\sum_{l=1}^M \delta \hat{V}x_{kl} \right), & D[\delta \hat{V}x_k] &= \frac{1}{M} P_{kk}[3,3], \\ \delta \hat{V}z_k &= \frac{1}{M} \left(\sum_{l=1}^M \delta \hat{V}z_{kl} \right), & D[\delta \hat{V}z_k] &= \frac{1}{M} P_{kk}[4,4]. \end{aligned} \tag{35}$$

При полете в разомкнутых боевых порядках следует использовать (31)–(34).

Результаты моделирования беспойсковой КЭНС с распределенной системой точечных измерений. Рассмотрим случаи группового полета БпЛА в разомкнутом боевом порядке при количественном составе группы из 2, 3 и 4 БпЛА. При этом удаление каждого БпЛА относительно условного центра боевого порядка составляет 1000 метров (необходимо отметить, что исследуемый 1-ый БпЛА находится в центре боевого порядка, за исключением полета группы из 4 БпЛА), СКО начальных ошибок по координатам X и Z для всех БпЛА составляют 20 метров, СКО начальных ошибок по скоростям V_x и V_z для всех БпЛА составляют 0,1 м/с, угол азимута линии визирования в случае 2-х взаимодействующих БпЛА для 2-го БпЛА относительно 1-го БпЛА составляет $A_{12} = 120$ градусов, 3-х БпЛА – $A_{12} = 30$ градусов, $A_{13} = 120$ градусов, 4-х БпЛА – $A_{yu,1} = 0$ градусов, $A_{yu,2} = 90$ градусов, $A_{yu,3} = 180$ градусов, $A_{yu,4} = 270$ градусов. Исследуемые типовые конфигурации боевых порядков представлены на рисунках 1, 2, 3.

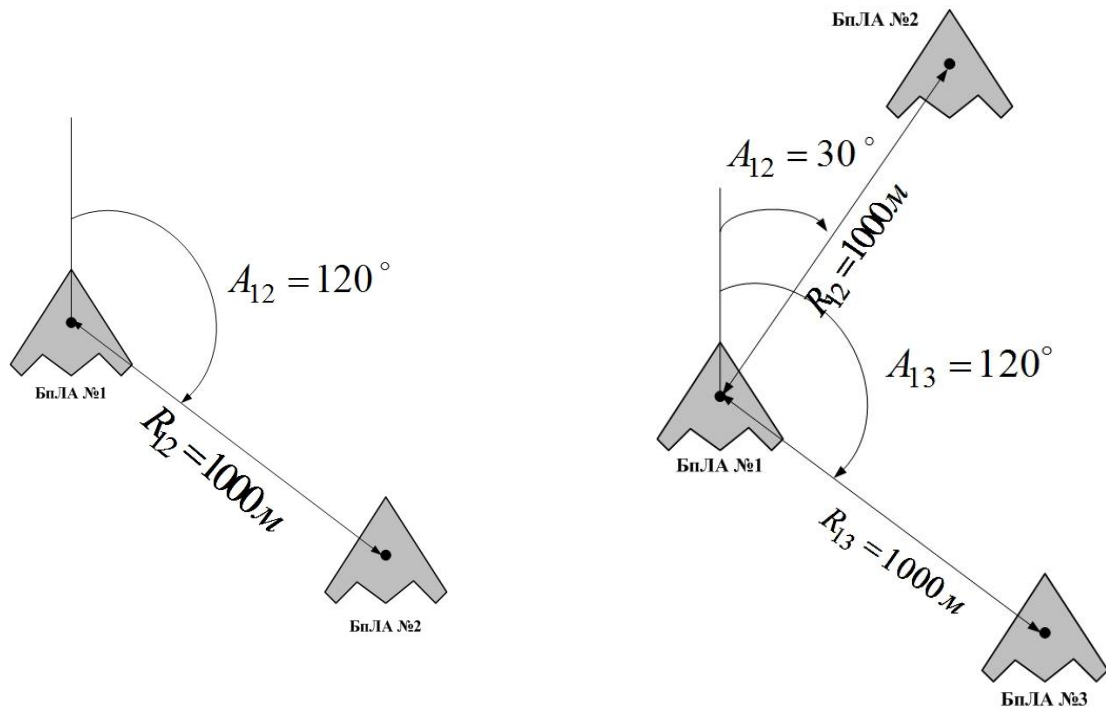


Рисунок 1 – Конфигурация боевого порядка 2-х БпЛА Рисунок 2 – Конфигурация боевого порядка 3-х БпЛА

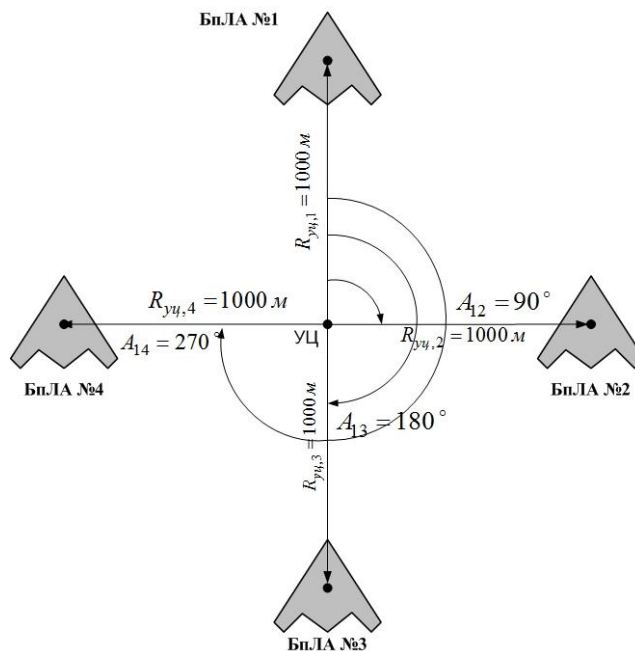


Рисунок 3 – Конфигурация боевого порядка 4-х БпЛА

На рисунке 4 представлены графики сравнения автономной и комплексной оценки ошибок по координате X (рисунок 4а) и скорости Vx (рисунок 4б) при изменении количественного состава взаимодействующих БпЛА в группе. Автономная оценка означает оценку ошибки НК БпЛА №1 по собственным измерениям высоты рельефа местности, а комплексная оценка ошибки означает комплексную оценку ошибок по всем фильтрам Калмана, функционирующих на борту БпЛА №1. Из графиков прослеживается улучшение точности оценивания ошибок по координате X и скорости Vx.

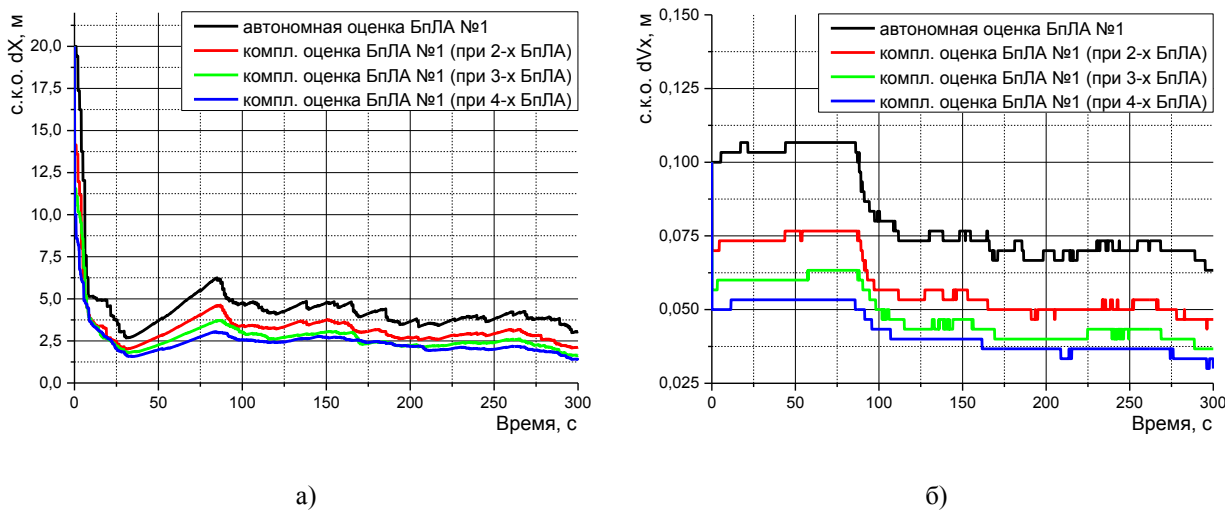


Рисунок 4 – Сравнение точности автономной и комплексной оценки ошибок при разомкнутом боевом порядке: а) по координате X; б) по скорости Vx

В случае группового полета БпЛА в сомкнутом боевом порядке, расстояния между БпЛА составляли порядка 100 метров. Все остальные параметры относительного положения между БпЛА и начальные ошибки по координатам и скоростям идентичны величинам, которые были рассмотрены при исследовании разомкнутых боевых порядков.



На рисунке 5 представлены графики сравнения автономной и комплексной оценки ошибок по координате X (рисунок 5а) и скорости Vx (рисунок 5б) при изменении количественного состава взаимодействующих БПЛА в группе при полете в сомкнутом боевом порядке. Из графиков рисунка 5 также прослеживается улучшение точности оценивания ошибок по координате X и скорости Vx, что говорит о работоспособности предложенного в работе подхода по повышению точности определения навигационных параметров БПЛА при выполнении ими группового взаимодействия.

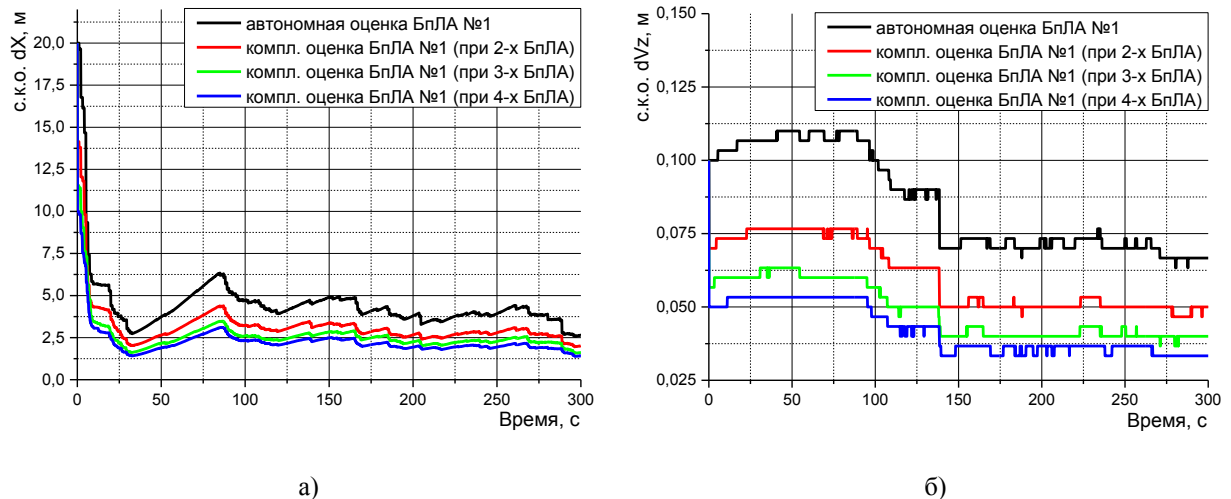


Рисунок 3 – Сравнение точности автономной и комплексной оценки ошибок при сомкнутом боевом порядке: а) по координате X; б) по скорости Vx

Выводы. Представленная в работе беспoisковая КЭНС с распределенной системой точечных измерений высоты рельефа местности группой взаимодействующих БПЛА позволяет повысить точность коррекции навигационных параметров БПЛА за счет включения в обработку измерений высоты рельефа местности, выполненных взаимодействующими БПЛА из состава группы. Представленные результаты моделирования функционирования беспoisковой КЭНС с распределенной системой точечных измерений для полета группы БПЛА в сомкнутых и разомкнутых боевых порядках показали, что СКО комплексной оценки существенно меньше, чем у автономной беспoisковой КЭНС. Функционирование данной системы позволяет говорить о высокоточной навигации при отсутствии измерений от спутниковой радионавигационной системы, но при наличии информативного поля высот рельефа местности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров А.В. Разработка распределенной рельефометрической корреляционно-экстремальной навигационной системы на основе группы беспилотных летательных аппаратов / А.В. Комаров, Е.К. Кичигин, М.Ф. Волобуев // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2020. № 5. С. 37–43. DOI: 10.25791/pribor/05.2020.1177.
2. Andrew R. Runnalls, Paul D. Groves, Robin J. Handley Terrain-Referenced Navigation Using the IGMAP Data Fusion Algorithm. Proceeding of the ION 61th Annual Meeting, June 27-29, Cambridge, MA, USA, 2005.
3. Metzger J., Wendel J., Trommer G.F. Hybrid Terrain Referenced Navigation System using a Bank of Kalman and a Comparison Technique. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit; Providence, RI, USA, 16-19 Aug. 2004, pp. 1–12. 2004.
4. Системы скрытой навигации маловысотных летательных аппаратов. Обзор по материалам иностранной печати / под ред. Е.И. Федосова. М.: НИЦ, 1988.



5. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем / А.А. Красовский, И.Н. Белоглазов, Г.П. Чигин. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 448 с.

6. Сельвесюк Н.И. Пилотажно-навигационные комплексы летательных аппаратов: учебник / Н.И. Сельвесюк, А.М. Бронников, В.В. Косьянчук, В.А. Меркулов, А.И. Наумов. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2013. 240 с.

REFERENCES

1. Komarov A.V. Razrabotka raspredelennoj rel'efometricheskoj korrelyacionno-`ekstremal'noj navigacionnoj sistemy na osnove gruppy bespilotnyh letatel'nyh apparatov / A.V. Komarov, E.K. Kichigin, M.F. Volobuev // Pribory i sistemy. Upravlenie, Kontrol', Diagnostika. 2020. № 5. pp. 37–43. DOI: 10.25791/pribor/05.2020.1177.

2. Andrew R. Runnalls, Paul D. Groves, Robin J. Handley Terrain-Referenced Navigation Using the IGMAP Data Fusion Algorithm. Proceeding of the ION 61th Annual Meeting, June 27-29, Cambridge, MA, USA, 2005.

3. Metzger J., Wendel J., Trommer G.F. Hybrid Terrain Referenced Navigation System using a Bank of Kalman and a Comparison Technique. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit; Providence, RI, USA, 16-19 Aug. 2004, pp. 1–12. 2004.

4. Sistemy skrytoj navigacii malovysotnyh letatel'nyh apparatov. Obzor po materialam inostrannoj pechati / pod red. E.I. Fedosova. M.: NIC, 1988.

5. Teoriya korrelyacionno-`ekstremal'nyh navigacionnyh sistem / A.A. Krasovskij, I.N. Beloglazov, G.P. Chigin. M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoj literatury, 1979. 448 p.

6. Sel'vesyuk N.I. Pilotazhno-navigacionnye komplekсы letatel'nyh apparatov: uchebnik / N.I. Sel'vesyuk, A.M. Bronnikov, V.V. Kos'yanchuk, V.A. Merkulov, A.I. Naumov. Voronezh: VUNC VVS «VVA», 2013. 240 p.

© Комаров А.В., Наумов А.И., Кичигин Е.К., 2020

Комаров Артем Валерьевич, адъюнкт кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, artem.komarov.1987@inbox.ru.

Наумов Александр Иванович, кандидат технических наук, профессор, ведущий математик, ЗАО «ГЕФЕСТ и Т» (г. Жуковский), Россия, 140180, г. Жуковский, ул. Наркомвод, 7, al_naumov@rambler.ru.

Кичигин Евгений Константинович, кандидат технических наук, профессор, доцент кафедры автоматизации управления летательными аппаратами (и вычислительных систем), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, kichigin92@yandex.ru.