

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 528.27, 528.946

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ НАВИГАЦИОННОЙ КАРТОГРАФИИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ В ПРОСТРАНСТВЕ

Лупанчук В.Ю.

*Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого,
ул. Карбышева, 8, Балашиха, Московская область, 143900, Россия
e-mail: raketofflu@mail.ru*

Рассматривается возможность применения высокоточных локальных областей для создания избыточности измерений в навигационных системах беспилотных летательных аппаратов и наземных робототехнических комплексов. Локальные области могут быть представлены высокоточными эталонными моделями геопространственной информации, которые получены путем совместной обработки картографической информации и инструментальных измерений в специальных точках земной поверхности.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, наземный робототехнический комплекс, локальная область земной поверхности, картографические данные, инструментальные данные, корреляция погрешностей картографической информации, эталонная маркерная область.

Введение

В настоящее время многие ученые разных стран проводят научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию передовых технологий в области искусственных интеллектуальных систем. Особенно важно отметить применение данных систем при создании роботов, мехатронных и робототехнических комплексов, предназначенных для автоматизации сложных технологических процессов и операций, в том числе выполняемых в недетерминированных условиях, для замены человека при выполнении тяжелых, утомительных и опасных работ. Актуальной областью исследования

является возможность повышения эффективности функционирования таких систем, разработка безопасных методов их эксплуатации, взаимодействие роботов и систем с человеком-оператором [1].

Сегодня во многих сферах человеческой деятельности введены в структурный состав робототехнические комплексы (РТК) и интеллектуальные системы различного предназначения. Так, в военной сфере активно применяются авиационные, наземные и морские робототехнические комплексы, которые участвуют в проведении военных операций на территории нашего государства, а также на территории других государств. Основными особенно-

стями эксплуатации военных авиационных и наземных роботов являются различные виды управления, которые делятся на ручное, автоматическое и полуавтоматическое.

Ручное управление (дистанционное) осуществляется оператором с дистанционного пульта управления в пределах оптической наблюдаемости или по видовой информации, поступающей с видеокamеры переднего обзора. При таком управлении оператор прежде всего решает задачу позиционирования робота в пространстве: поддержание нужного курса, высоты и т.д.

Автоматическое управление обеспечивает возможность полностью самостоятельного управления движением робота по заданной траектории, при поддержании заданной высоты с заданной скоростью и со стабилизацией углов ориентации. Автоматическое управление осуществляется бортовыми программными устройствами.

Полуавтоматическое управление осуществляется автоматически без вмешательства человека с помощью автопилота по первоначально заданным параметрам, но при этом оператор может вносить изменения в маршрут в интерактивном режиме. Таким образом, оператор имеет возможность влиять на результат функционирования, не отвлекаясь на задачи пилотирования [2, 3].

Наиболее важной проблемой всех существующих РТК является невозможность высокоточного определения текущих навигационных параметров (координат и высоты) при управлении автоматическим способом. Для успешной навигации в пространстве бортовая система мобильного РТК должна уметь строить маршрут, управлять параметрами движения (задавать угол поворота и скорость), правильно интерпретировать сведения об окружающем мире, получаемые от датчиков, и постоянно отслеживать собственное местоположение [4, 5].

Многие отечественные и зарубежные ученые пытаются решить данную проблему. Один из способов решения основывается на коррекции автономной инерциальной навигационной системы (ИНС), установленной на борту летательного аппарата или наземного РТК, с помощью позиционного метода навигации, который основан на обработке сигналов спутниковой навигационной системы (СНС). Основным недостатком данного способа является накопление погрешностей в процессе движения ИНС, а для достижения высокой точности позиционного метода навигации необходимо применять дифференциальные поправки, которые получают от различных альтернативных источников [6—9]. Также необходимо отметить ряд научных ра-

бот, посвященных применению технического зрения в составе бортовой аппаратуры наземных транспортных средств и различных систем обработки фотоизображений наземных объектов на этапе посадки беспилотных летательных аппаратов [10, 11].

В ряде случаев количество получаемой информации от различных источников навигационных средств может быть недостаточным для оперативного и высокоточного уточнения текущих навигационных параметров, что может привести к неправильному выполнению задачи или вообще к потере робота. В связи с этим автор статьи предлагает реализовать принцип информационной избыточности навигационных измерений за счет использования обзорно-сравнительного метода навигации, который будет реализован на борту РТК. Он будет представлен высокоточной картой локальных участков местности. При пересечении линии начала локального участка робот, применяя систему технического зрения, будет сканировать пространство и сравнивать оба изображения. Рассогласование изображений позволит формировать поправки для коррекции текущих навигационных параметров.

Высокоточную локальную область можно получить путем совместной обработки картографических данных и инструментальных измерений в специальных точках выбранного участка местности. В статье рассматривается промежуточный этап формирования высокоточных локальных областей для последующего использования их при реализации обзорно-сравнительного метода навигации на борту авиационных или наземных робототехнических систем.

Постановка задачи

Дано: 1. Топографическая карта на выбранный участок местности, по которой определяются значения координат и абсолютной высоты в произвольных и «базовых» точках. («Базовая» точка — это точка, в которой имеется два вида информации, картографическая и инструментальная.)

2. Выбираются произвольные точки на карте, позволяющие оценить эффект от совместного применения картографических данных и инструментальных измерений с различными видами погрешностей — множество произвольных точек $U_{ПТn}^K$, в которых необходимо найти значения координат и высоты. В указанных точках значения прямоугольных координат и абсолютных высот в произвольных точках по карте $(X, Y)_{ПТ1}^K, \dots, (X, Y)_{ПТn}^K$, $H_{ПТ1}^K, \dots, H_{ПТn}^K$ определяются с погрешностями:

$$\left. \begin{aligned}
 (X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{К}} &= (X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{И}} + \Delta(X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{К}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 (X, Y)_{\text{ПТ}n}^{\text{К}} &= (X, Y)_{\text{ПТ}n}^{\text{И}} + \Delta(X, Y)_{\text{ПТ}n}^{\text{К}};
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned}
 H_{\text{ПТ}}^{\text{К}} &= H_{\text{ПТ}}^{\text{И}} + \Delta H_{\text{ПТ}}^{\text{К}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 H_{\text{ПТ}n}^{\text{К}} &= H_{\text{ПТ}n}^{\text{И}} + \Delta H_{\text{ПТ}n}^{\text{К}}.
 \end{aligned} \right\}$$

где $(X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{И}}$ — истинные значения координат без погрешностей;

$\Delta(X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{К}}$, $\Delta H_{\text{ПТ}}^{\text{К}}$ — погрешности определения координат и высот по картографическим данным.

3. Выбираются «базовые» точки, которые характеризуются наличием разнородной информации в одной точке:

— «базовые» точки $U_1^{\text{К}}, \dots, U_i^{\text{К}}$ выбираются по топографической карте с погрешностями, априорно заданными в виде (1). В этих же точках имеется инструментальная информация, которая подготовлена заблаговременно. Инструментальные измерения представлены с погрешностями их определения:

$$\left. \begin{aligned}
 (X, Y)_1^{\text{ИЗ}} &= (X, Y)_1^{\text{И}} + \Delta(X, Y)_1^{\text{ИЗ}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 (X, Y)_i^{\text{ИЗ}} &= (X, Y)_i^{\text{И}} + \Delta(X, Y)_i^{\text{ИЗ}};
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned}
 H_1^{\text{ИЗ}} &= H_1^{\text{И}} + \Delta H_1^{\text{ИЗ}}; \\
 &\dots\dots\dots \\
 H_i^{\text{ИЗ}} &= H_i^{\text{И}} + \Delta H_i^{\text{ИЗ}}.
 \end{aligned} \right\}$$

4. Ограничения для исходных данных:
— средние квадратические погрешности (СКП) определения координат и высот по топографической карте

$$\sigma_{\text{ПТ}}^{\text{К}}((X, Y), H) = \sigma_1^{\text{К}}((X, Y), H) = \dots = \sigma_i^{\text{К}}((X, Y), H);$$

— СКП инструментальных измерений координат и высот, полученных с помощью геодезических средств общего назначения (ГСОН)

$$\sigma_1^{\text{ИЗ}}((X, Y), H) = \dots = \sigma_i^{\text{ИЗ}}((X, Y), H).$$

В связи с наличием избыточности навигационной информации в «базовых» точках имеется принципиальная возможность применить методы совместного неравноточного уравнивания и получить оптимальные оценки погрешностей навигационно-геодезических параметров, что позволит уточнить значения координат и высот в локальной области карты.

На рис. 1 показана зависимость СКП картографических и инструментальных данных ($\sigma_{X,Y}^{\text{К}}, \sigma_{X,Y}^{\text{И}}$) от координат $((X, Y)^{\text{К}}, (X, Y)^{\text{И}})$. Изображены области погрешностей картографических и инструментальных данных, показан возможный уровень повышения точности прямоугольных координат. Такой же принцип можно применить для значений высоты.

5. Вводится корреляционная функция для координат $P_{(X,Y)}$ и высот P_H как мера статистической связи между погрешностями картографических параметров. Её значение может быть найдено из корреляционных функций (3) погрешностей картографических данных. Вид корреляционных функций зависит от расстояния между выбранными точками [12, 13]:

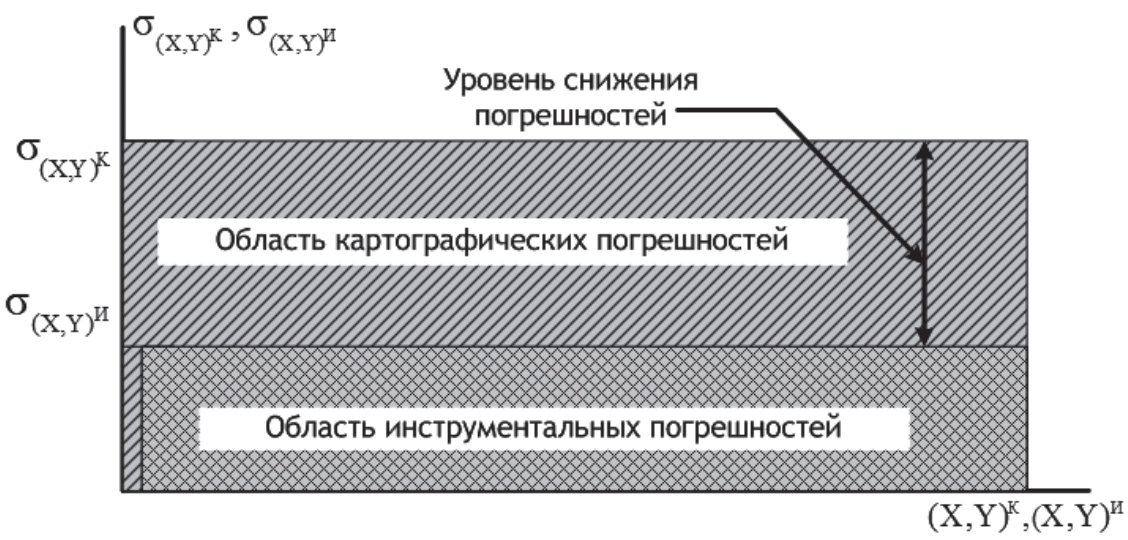


Рис. 1. Области картографических и инструментальных погрешностей

$$k_{\Delta(X,Y)_j}(r_{\Delta j}) = D_{\Delta(X,Y)}^K \exp\left(-\frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\Delta(X,Y)}}\right) \left(1 + \frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\Delta(X,Y)}}\right);$$

$$k_{\Delta H_j}(r_{\Delta j}) = D_{\Delta H}^K \exp\left(-\frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\Delta H}}\right) \left(1 + \frac{r_{\Delta j}}{\tau_{\Delta H}}\right), \quad (3)$$

где $D_{\Delta(X,Y)}^K, D_{\Delta H}^K$ — дисперсии ошибок картографических данных; $\tau_{\Delta(X,Y)}, \tau_{\Delta H}$ — радиус корреляции погрешностей карт; $r_{\Delta j}$ — расстояние между произвольной и «базовыми» точками, выбранными по картографическим данным,

$$r_{\Delta j} = \sqrt{(X_i - X_{\text{ПТ}})^2 + (Y_i - Y_{\text{ПТ}})^2}.$$

6. Требуется получить оптимальные оценки погрешностей координат и высоты, а также рассчитать СКП определения значений координат и высот по карте после совместного уравнивания картографических данных и инструментальных измерений. Выбран критерий оптимальности, который представлен ниже:

$$\sum_{i=1}^n k_{(X,Y)_i} \cdot (\Delta(X,Y)_i^K - \Delta(X,Y)_i^B)^2 + k_{H_i} \cdot (\Delta H_i^K - \Delta H_i^B)^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Принцип формирования высокоточных локальных областей выбранного участка местности рассмотрим согласно рис. 2, где представлены картографические данные с погрешностями определения необходимых навигационных параметров в «базовых» точках, а также инструментальные измерения в виде множества точек, значения которых заведомо точнее картографических. Показана уравненная поверхность, которая может быть получена путем совместной обработки с учетом весовых коэффициентов картографических и инструментальных данных.

В связи с тем, что инструментальные измерения в выбранных точках заведомо точные, уравненная поверхность будет наиболее близка к поверхности, которая получена инструментально. Выбраны три «базовые» точки с прямоугольными координатами и абсолютной высотой (рис. 3).

После совместного уравнивания картографической и инструментальной информации на карте образуются высокоточные локальные области вокруг «базовых» точек, которые позволяют уточнять значения параметров координат и высоты в т.2 со средним квадратическим отклонением области с радиусом R_2 , что представлено в локальной области № 2. Остальные локальные области формируются по тому же принципу. Области представлены различными радиусами (уровнями) действия погрешностей:

— погрешности картографических данных представлены значением R_1 , они характеризуются СКП

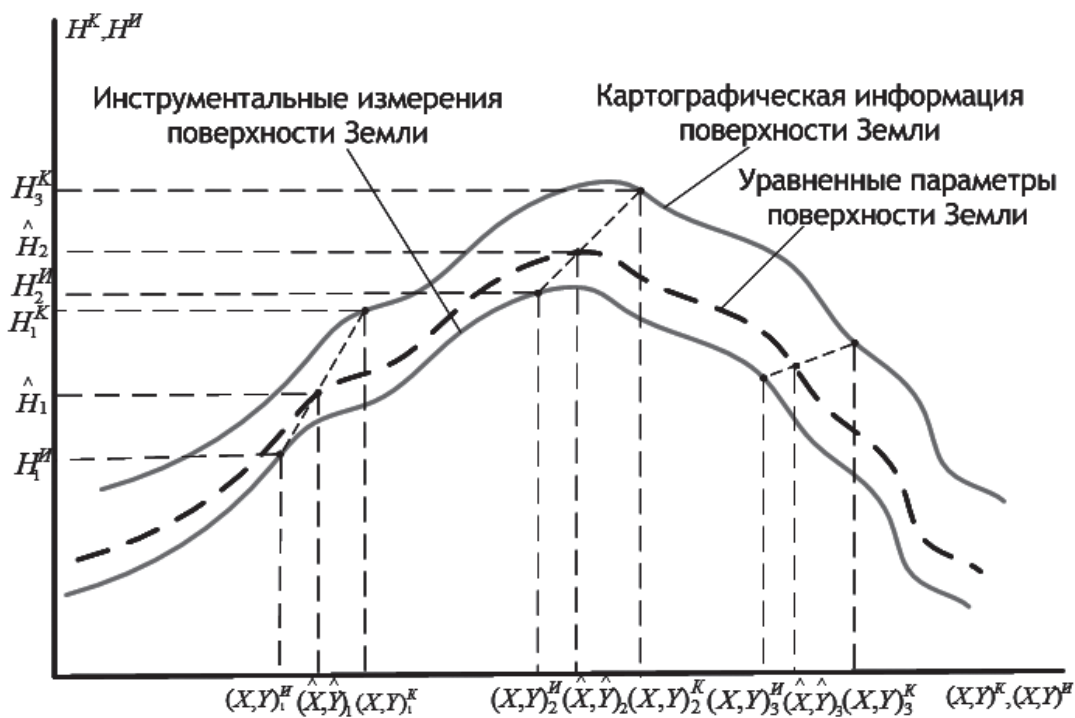


Рис. 2. Поверхность Земли в виде картографических и инструментальных данных

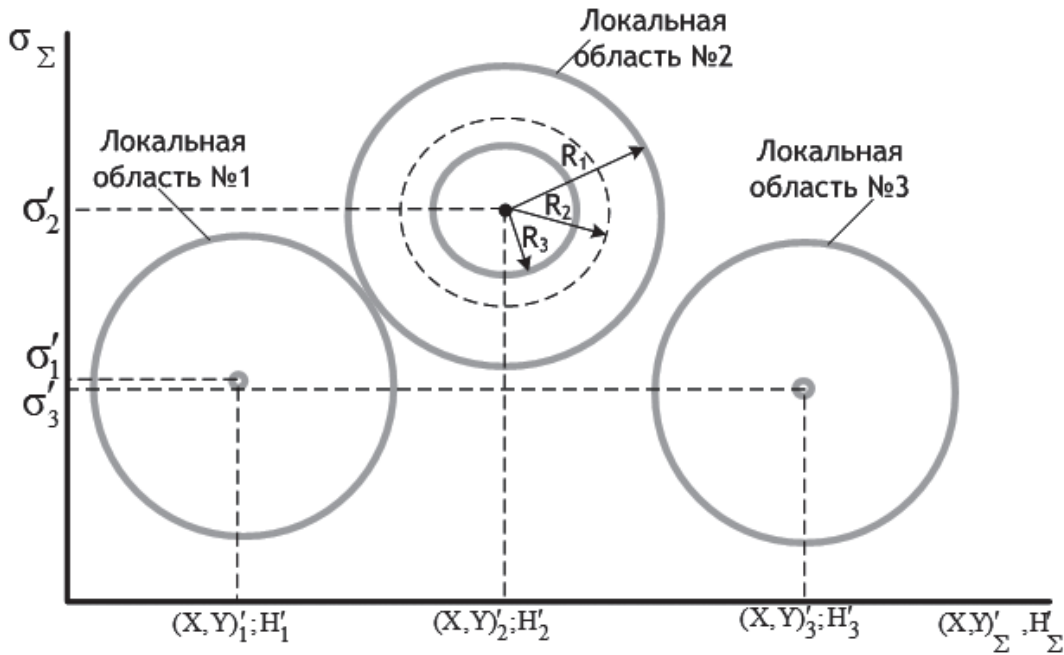


Рис. 3. Локальные области с центрами в «базовых» точках

определения прямоугольных координат и высоты по топографической карте;

- погрешности урвненных значений координат и высоты от картографических и инструментальных данных представлены значением R_2 , они характеризуются значениями СКП совместного уравнивания параметров;

- погрешности инструментальных измерений в «базовой» точке представлены значением R_3 .

Общий уровень погрешностей карты в локальной области будет изменчивым. В итоге после окончания действия корреляционной связи между погрешностями картографической информации, которая обуславливается радиусом корреляции, эффект будет стремиться к общему уровню СКП картографических данных.

Неравноточное уравнивание измерений позволяет:

- повысить точность определения координат и высоты в локальных областях имеющейся карты, а также уменьшить погрешность картографических данных в области действия инструментальных точек;

- образовать отдельную локальную область, которая может быть представлена в виде высокоточного эталонного маркера при позиционировании РТК в окружающем пространстве.

Методика формирования высокоточных локальных областей для позиционирования РТК в пространстве

Рассмотрим основные этапы уравнивания картографических данных и инструментальных изме-

рений с помощью байесовского подхода по формулам условной апостериорной плотности распределения случайной величины [14–16].

1. Построение общего вектора погрешностей навигационных параметров в произвольной и «базовых» точках, определенных по картографическим данным:

$$Z_{(X,Y)} = \begin{pmatrix} \Delta(X,Y)_{\text{ПТ}} \\ \Delta(X,Y)_{\text{Б1}}^{\text{К}} \\ \Delta(X,Y)_{\text{Б2}}^{\text{К}} \\ \Delta(X,Y)_{\text{Б3}}^{\text{К}} \end{pmatrix}; Z_H = \begin{pmatrix} \Delta H_{\text{ПТ}} \\ \Delta H_{\text{Б1}}^{\text{К}} \\ \Delta H_{\text{Б2}}^{\text{К}} \\ \Delta H_{\text{Б3}}^{\text{К}} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $Z_{(X,Y)}$ — вектор погрешностей прямоугольных координат в произвольной и «базовых» точках; Z_H — вектор погрешностей высоты над уровнем моря в произвольной и «базовых» точках.

2. Формирование априорной ковариационной матрицы погрешностей навигационных параметров, определенных по картографическим материалам с учетом корреляционной зависимости между погрешностями карты (6). Главная диагональ ковариационной матрицы представлена дисперсиями картографической информации всех точек, взятых в обработку $D_H^{\text{К}}, D_{(X,Y)}^{\text{К}}$:

$$P_{X,Y}^{АПР} = \begin{pmatrix} (\sigma_{ПТХ,Y}^K)^2 & k(r_{\Delta 1}) & k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 3}) \\ k(r_{\Delta 1}) & (\sigma_{Б1Х,Y}^K)^2 & k(r_{\Delta 4}) & k(r_{\Delta 5}) \\ k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 4}) & (\sigma_{Б2Х,Y}^K)^2 & k(r_{\Delta 6}) \\ k(r_{\Delta 3}) & k(r_{\Delta 5}) & k(r_{\Delta 6}) & (\sigma_{Б3Х,Y}^K)^2 \end{pmatrix};$$

$$P_H^{АПР} = \begin{pmatrix} (\sigma_{ПТН}^K)^2 & k(r_{\Delta 1}) & k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 3}) \\ k(r_{\Delta 1}) & (\sigma_{Б1Н}^K)^2 & k(r_{\Delta 4}) & k(r_{\Delta 5}) \\ k(r_{\Delta 2}) & k(r_{\Delta 4}) & (\sigma_{Б2Н}^K)^2 & k(r_{\Delta 6}) \\ k(r_{\Delta 3}) & k(r_{\Delta 5}) & k(r_{\Delta 6}) & (\sigma_{Б3Н}^K)^2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $k(r_{\Delta 1-6})$ — корреляционная функция между погрешностями карты в «базовых» точках.

3. Запись выражений, устанавливающих связь между значениями навигационных параметров и их погрешностями в «базовых» точках:

$$1. (X, Y)_{Б1}^K = (X, Y)_{Б1}^И + \Delta(X, Y)_{Б1}^K;$$

$$(X, Y)_{Б1}^{И3} = (X, Y)_{Б1}^И + \Delta(X, Y)_{Б1}^{И3};$$

$$(X, Y)_{Б2}^K = (X, Y)_{Б2}^И + \Delta(X, Y)_{Б2}^K;$$

$$(X, Y)_{Б2}^{И3} = (X, Y)_{Б2}^И + \Delta(X, Y)_{Б2}^{И3};$$

$$(X, Y)_{Б3}^K = (X, Y)_{Б3}^И + \Delta(X, Y)_{Б3}^K;$$

$$(X, Y)_{Б3}^{И3} = (X, Y)_{Б3}^И + \Delta(X, Y)_{Б3}^{И3};$$

$$2. H_{Б1}^K = H_{Б1}^И + \Delta H_{Б1}^K; H_{Б1}^{И3} = H_{Б1}^И + \Delta H_{Б1}^{И3};$$

$$H_{Б2}^K = H_{Б2}^И + \Delta H_{Б2}^K; H_{Б2}^{И3} = H_{Б2}^И + \Delta H_{Б2}^{И3};$$

$$H_{Б3}^K = H_{Б3}^И + \Delta H_{Б3}^K; H_{Б3}^{И3} = H_{Б3}^И + \Delta H_{Б3}^{И3}.$$

Выражения, полученные по картографическим данным, вычитаются из выражений, полученных инструментально:

$$1. (X, Y)_{Б1}^{И3} - (X, Y)_{Б1}^K = \Delta(X, Y)_{Б1}^{И3} - \Delta(X, Y)_{Б1}^K;$$

$$(X, Y)_{Б2}^{И3} - (X, Y)_{Б2}^K = \Delta(X, Y)_{Б2}^{И3} - \Delta(X, Y)_{Б2}^K;$$

$$(X, Y)_{Б3}^{И3} - (X, Y)_{Б3}^K = \Delta(X, Y)_{Б3}^{И3} - \Delta(X, Y)_{Б3}^K;$$

$$2. H_{Б1}^{И3} - H_{Б1}^K = \Delta H_{Б1}^{И3} - \Delta H_{Б1}^K; \quad (8)$$

$$H_{Б2}^{И3} - H_{Б2}^K = \Delta H_{Б2}^{И3} - \Delta H_{Б2}^K;$$

$$H_{Б3}^{И3} - H_{Б3}^K = \Delta H_{Б3}^{И3} - \Delta H_{Б3}^K.$$

4. Представление выражений разностных измерений в векторно-матричной форме:

$$\begin{bmatrix} (X, Y)_{Б1}^{И3} - (X, Y)_{Б1}^K \\ (X, Y)_{Б2}^{И3} - (X, Y)_{Б2}^K \\ (X, Y)_{Б3}^{И3} - (X, Y)_{Б3}^K \end{bmatrix} = M \cdot Z_{(X,Y)};$$

$$\begin{bmatrix} H_{Б1}^{И3} - H_{Б1}^K \\ H_{Б2}^{И3} - H_{Б2}^K \\ H_{Б3}^{И3} - H_{Б3}^K \end{bmatrix} = M \cdot Z_H, \quad (9)$$

$$\text{где } M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix} \text{ — матрица на-}$$

блюдения СКП навигационных параметров в локальной области карты.

5. Формирование ковариационной матрицы погрешностей инструментальных измерений в «базовых» точках:

$$R_{X,Y} = \begin{pmatrix} (\sigma_{Б1Х,Y}^{И3})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_{Б2Х,Y}^{И3})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_{Б3Х,Y}^{И3})^2 \end{pmatrix};$$

$$R_H = \begin{pmatrix} (\sigma_{Б1Н}^{И3})^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_{Б2Н}^{И3})^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_{Б3Н}^{И3})^2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

6. Формирование коэффициентов усиления для нахождения оптимальных оценок навигационных параметров:

$$K_{X,Y} = P_{X,Y} \cdot M^T \cdot (M \cdot P_{X,Y} \cdot M^T + R_{X,Y})^{-1};$$

$$K_H = P_H \cdot M^T \cdot (M \cdot P_H \cdot M^T + R_H)^{-1}. \quad (11)$$

7. Расчет оптимальных оценок параметров в произвольной точке локальной области карты:

$$(\hat{X}, \hat{Y})_{\text{ПТ}} = K_{X,Y} \begin{pmatrix} \Delta(X,Y)_{\text{Б1}} \\ \Delta(X,Y)_{\text{Б2}} \\ \Delta(X,Y)_{\text{Б3}} \end{pmatrix}; \quad (12)$$

$$(\hat{X}, \hat{Y})_{\text{ПТ}}^{\text{К}} = (X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{И}} + (\Delta(X, Y)_{\text{ПТ}}^{\text{К}} - \Delta(\hat{X}, \hat{Y})_{\text{ПТ}}^{\text{К}});$$

$$\hat{H}_{\text{ПТ}} = K_H \begin{pmatrix} \Delta H_{\text{Б1}} \\ \Delta H_{\text{Б2}} \\ \Delta H_{\text{Б3}} \end{pmatrix}; \quad \hat{H}_{\text{ПТ}}^{\text{К}} = H_{\text{ПТ}}^{\text{И}} + (\Delta H_{\text{ПТ}}^{\text{К}} - \Delta \hat{H}_{\text{ПТ}}^{\text{К}}).$$

После этапа нахождения оптимальных оценок погрешностей навигационных параметров необходимо рассчитать апостериорную матрицу погрешностей для произвольной точки локальной области карты.

8. Расчет апостериорной матрицы погрешностей соответственно имеет вид:

$$\begin{aligned} P_{(X,Y)}^{\text{АПС}} &= P_{(X,Y)}^{\text{АПР}} - K_i \cdot M \cdot P_{(X,Y)}^{\text{АПР}}; \\ P_H^{\text{АПС}} &= P_H^{\text{АПР}} - K_i \cdot M \cdot P_H^{\text{АПР}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Методика позволяет получить оптимальные оценки погрешностей координат и высоты с уточненными погрешностями в локальной области карты. Необходимо отметить, что такой же подход может применяться для различных видов гравиметрических карт [17, 18].

Результаты применения методики формирования высокоточных локальных областей для позиционирования РТК в пространстве

Сопоставление новых технических решений с известными обычно проводят на основе оценки эффективности их применения. При этом в оценках (показателях) эффективности учитывают не только эффект, но и затраты, предполагающие его достижение. Особенностью решаемой задачи является то, что затраты могут быть связаны лишь с иной организацией обработки измерительной информации, так как высокоточные инструментальные измерения могут быть компонентами (точками) в составе государственной геодезической сети. Известно, что затраты на применение нового способа математической обработки результатов измерений существенно ниже затрат на проведение новых инструментальных определений геодезических данных в каждой точке локальной области с необходимым шагом интерполяции. В связи с этим целесообразна оценка абсолютных показателей эф-

фекта от применения методики формирования высокоточных локальных областей. Эффект рассматривается на примере формирования высокоточной локальной области абсолютной высоты от шести базовых точек.

Целью численной оценки является подтверждение положительного эффекта от применения методики. Для оценки эффекта используются показатели СКП оценки погрешностей абсолютной высоты (показатель качества) в локальной области и изменения структуры карты после совместного уравнивания измерений.

Выбор исходных данных производился по цифровой карте местности (рис. 4). В правой части рисунка выделен среднеравнинный участок, ограниченный прямоугольными координатами без учета их погрешностей. В данном районе выбрано шесть «базовых» точек, которые характеризуются прямоугольными координатами $X_i^{\text{К}} Y_i^{\text{К}}, \dots, X_i^{\text{К}} Y_i^{\text{К}} (i = 1 \dots 6)$.

Выбор точек (объектов) не однороден, одни характеризуются как перекрестки дорог, другие являются объектами местности (мост через реку). Необходимо отметить, что выбор «базовых» объектов, которые будут в дальнейшем участвовать в виде маркеров локальной области для позиционирования РТК в окружающем пространстве, является важным вопросом при формировании алгоритмов обработки навигационной информации при обосновании обзорно-сравнительного метода навигации.

Средний радиус корреляции погрешностей высот над уровнем моря, определенных по картографическим данным, установлен $r_{\text{К}} = 2000 \text{ м}$ [19, 20].

На рис. 5 изображены области СКП определения высот в пределах рассматриваемого участка местности с дополнительной информацией в «базовых» точках. Из рисунка видно, что «базовые» точки характеризуются СКП инструментальных измерений, точность которых выше картографических. Образовалась локальная область изменения высот на карте, причем, чем ближе к «базовым» точкам, тем значения высот определены точнее.

Средний уровень СКП высот после применения методики по всей площади рассматриваемого участка местности составил $\sigma_H \approx 8 \text{ м}$, при суммарной погрешности карты в 9 м. В «базовых» точках точность картографической информации после уравнивания достигает 5–6 м.

Методика формирования высокоточных локальных областей для позиционирования РТК в окружающем пространстве позволяет изменять структуру локальной области карты, а также получать наиболее достоверные значения высот в этих областях (рис. 6).

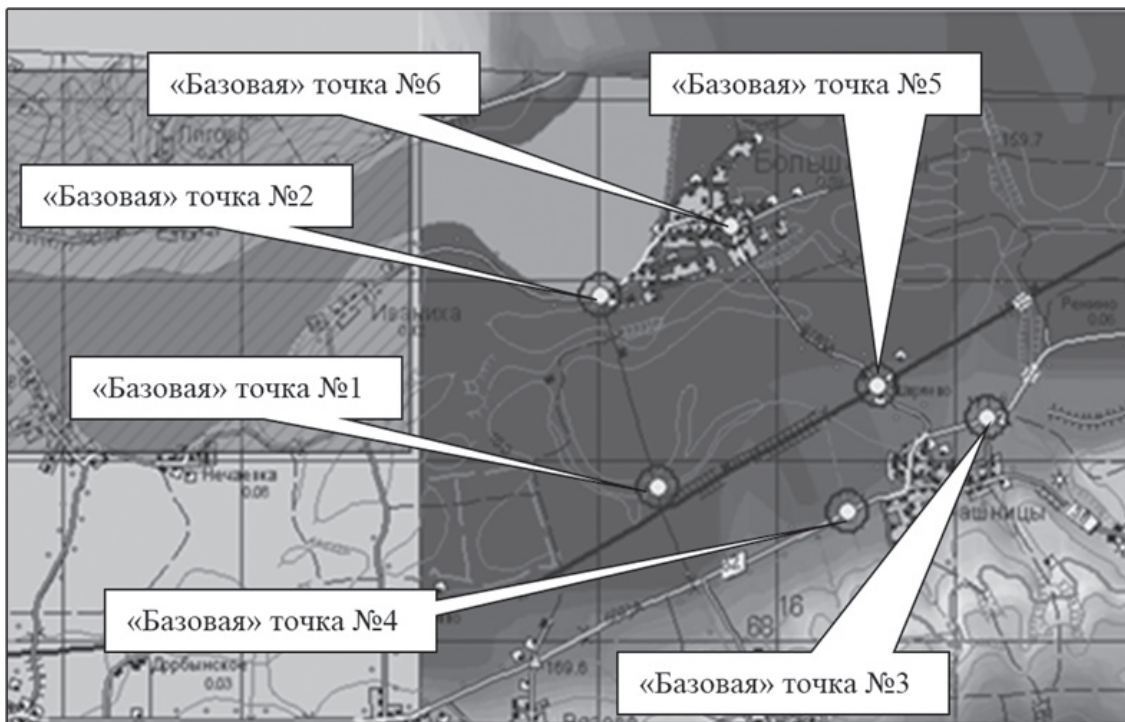


Рис. 4. Фрагмент цифровой карты местности

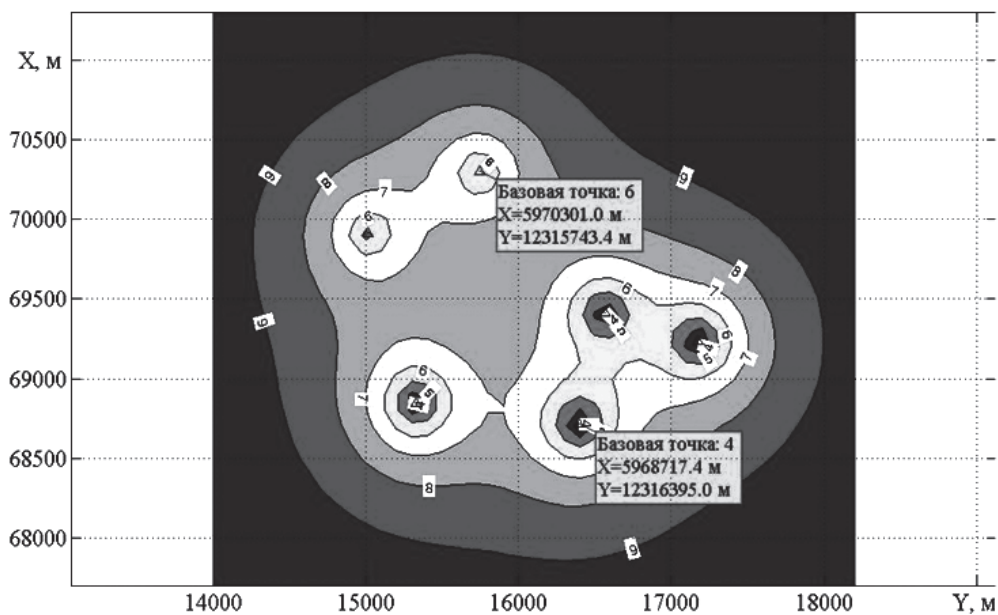


Рис. 5. Погрешности определения высот в локальной области карты

Получены результаты применения методики формирования локальных областей картографических данных при определении абсолютных высот. Примененный в методике научно-методический аппарат неравноточного уравнивания навигационных измерений отличается от имеющихся наличием корреляционных связей между погрешностями картографической информации и позволяет повысить точность определения высот по всей площади локальной области карты на 1 м, а в точках с инструментальной информацией — до 3-4 м при общей погрешности карты 9 м и соответственно ин-

струментальной погрешности в «базовых» точках 3—5 м.

Выводы

Представлена методика формирования высокоточных локальных областей с учетом корреляционных связей между погрешностями карты. Данная методика позволяет использовать локальные области для построения пространственного изображения при решении задачи коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов или наземных РТК. Создается возможность повышения

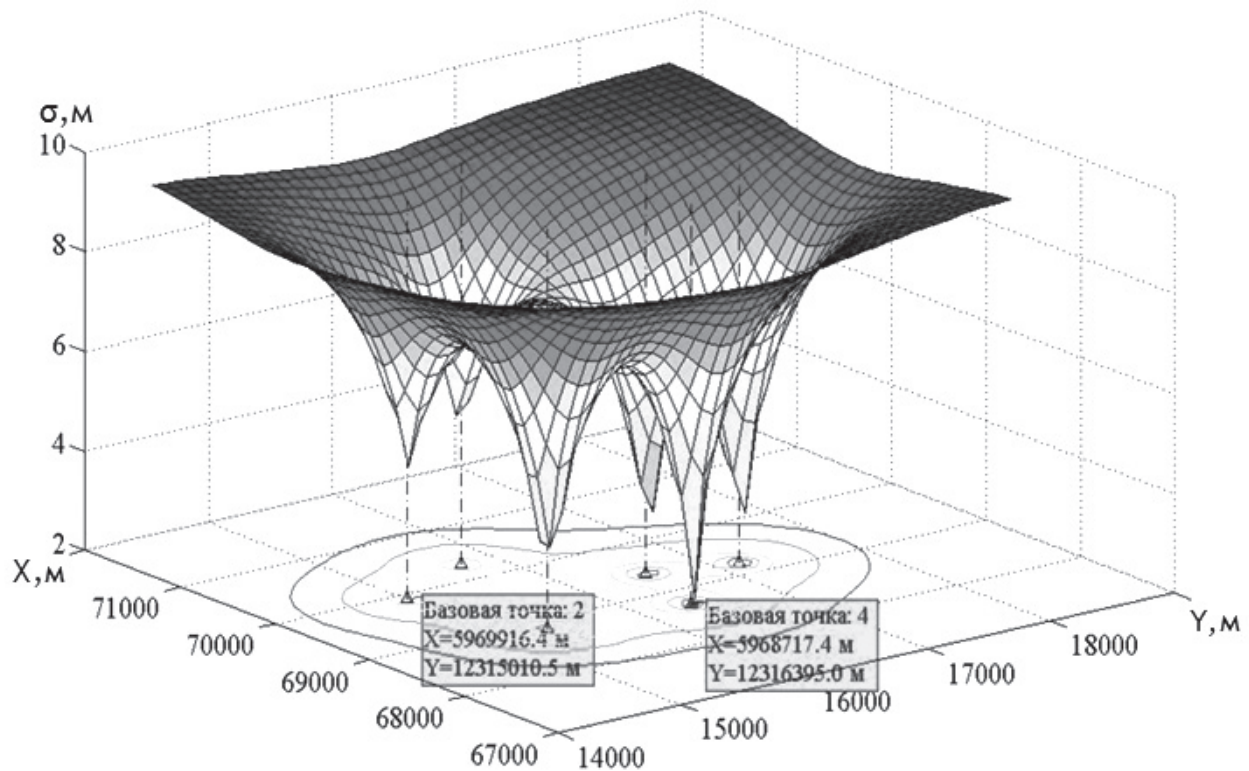


Рис. 6. Локальная область карты

эффективности функционирования робототехнических систем за счет использования дополнительного источника навигационной информации при позиционировании в окружающем пространстве, основанного на обзорно-сравнительном методе навигации. Результаты исследований могут найти применение в различных областях научно-технической деятельности, например:

- при решении задач высокоточного позиционирования авиационных и наземных РТК в окружающем пространстве;

- при решении задач поддержания и развития службы контроля деформации земной поверхности в рамках федеральной системы сейсмологических наблюдений, особенно в высокогорных районах страны;

- при оперативном создании многоинформационной картографической и топографической основы различных масштабов с учетом корреляционной зависимости навигационной и геофизической информации.

Библиографический список

1. Паспорт научных специальностей: 05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы. — М.: ВАК, 2011. URL: <http://www.vak.ed.gov.ru/316>
2. Рыжов Б.С., Володина Н.И., Гладышев А.И., Лупанчук В.Ю., Татарко К.И. Применение беспилотных авиационных комплексов в позиционном районе ракетных соединений // Двойные технологии. 2017. № 1(78). С. 18-23.
3. Алексеенко А.А., Гончаров В.М., Лупанчук В.Ю. Применение беспилотных авиационных комплексов для регистрации изменений в локальных областях земной поверхности // Гагаринские чтения — 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2017. С. 974-975.
4. Lupanchuk V.Yu., Zaitsev A.V. Development of navigation methods in problems of determining the current situation of dynamic objects in the surrounding space // Нобелевский конгресс — XI Международная встреча-конференция лауреатов Нобелевских премий и нобелистов «Наука, технологии, общество и международное нобелевское движение» (24-28 октября 2017, Тамбов). — Тамбов: МИНЦ, 2017. С. 437-442.
5. Берштейн Л.С., Мелехин В.Б. Планирование поведения интеллектуального робота. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 238 с.
6. Лупанчук В.Ю. Перспективы развития навигационной картографии в задачах определения навигационно-геодезических параметров точки старта летательных аппаратов // Гагаринские чтения — 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов. — М.: МАИ, 2017. С. 863.
7. Беркович С.Б., Котов Н.И., Махаев А.Ю., Мартынюк Г.А., Лапкин М.В., Хрусталева А.Н. Оценка эффективности вариантов построения интегрированных комплексов навигации, наведения и целеуказания

- в условиях воздействия помех специального вида // Известия института инженерной физики. 2017. Т. 1. № 43. С. 2-14.
8. *Алешин Б.С., Афонин А.А., Веремеенко К.К., Кошелев Б.В., Плеханов В.Е., Тихонов В.А., Тювин А.В., Федосеев Е.П., Черноморский А.И.* Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. — М.: Физматлит, 2006. — 424 с.
 9. *Соколов С.В., Погорелов В.А.* Стохастическая оценка, управление и идентификация в высокоточных навигационных системах. — М.: Физматлит, 2016. — 259 с.
 10. *Беркович С.Б., Котов Н.И., Шолохов А.В., Лычагов А.С., Садеков Р.Н.* Система технического зрения как источник дополнительной информации в задаче автомобильной навигации // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 1(96). С. 49-63. DOI: 10.17285/0869-7035.2017.25.1.049-063
 11. *Лунев Е.М.* Повышение точности определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотограмметрических измерений на этапе посадки // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 150-159.
 12. *Дмитриев С.П.* Высокоточная морская навигация. — СПб.: Судостроение, 1991. — 224 с.
 13. *Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П.* Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. — М.: Наука, 1979. — 448 с.
 14. *Степанов О.А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1 «Введение в теорию оценивания». — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. — 989 с.
 15. *Степанов О.А.* Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. — СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. — 370 с.
 16. *Разоренов Г.Н., Самарин А.А.* Теория и системы оптимального управления. — М.: МО РФ, 2007. — 472 с.
 17. *Лупанчук В.Ю.* Аналитический метод определения компонент поля ускорения силы тяжести, с привлечением дополнительно подготовленной геодезической информации // V межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития средств и методов выполнения топографо-геодезических и картографических работ»: сборник трудов. — СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. С. 189-192.
 18. *Веселов К.Е., Варламов А.С., Кастильский Е.М., Степанов П.П.* Инструкция по гравиразведке. — М.: Недра, 1980. — 89 с.
 19. *Heiskanen A., Moritz H.* Physical Geodesy. — Graz, Austria: Institute of Physical Geodesy, 1993. — 375 p.
 20. *Белоглазов И.Н., Джанжгава Г.И., Чигин Г.П.* Основы навигации по геофизическим полям. — М.: Наука, 1985. — 328 с.

NAVIGATION CARTOGRAPHIC METHODS DEVELOPMENT FOR MONITORING ROBOTIC COMPLEXES POSITIONING IN SURROUNDING SPACE

Lupanchuk V.Yu.

*Military Academy of Strategic Rocket Troops named after Peter the Great,
SRTMA, 8, Karbysheva str., Balashikha, Moscow region, 143900, Russia
e-mail: raketofflu@mail.ru*

Abstract

The purpose of the study of this scientific article is accuracy improving of monitoring robotic complexes positioning in surrounding space while performing various types of motion.

The subject of the study are methods for joint navigational information processing obtained by on cartographic and instrumental data.

The article analyzes the approach and problems of high-precision positioning of unmanned aerial vehicles and ground-based robotic complexes in the surrounding space

The initial data of the study are based on formation of local areas of the Earth surface employing cartographic data and instrumental measurements. The

article presents the main stages of the methodology for the map high-precision local areas formation by mathematical processing of redundant navigation parameters at the base points.

The methodological approach differs from the known ones by the presence of correlations between the map errors and allows the accuracy increase of navigation parameters determination over the entire area of the local section by 1 m, and by 3 to 5 m at base points.

The studies can find application in various fields:

— when solving problems of high-precision positioning of air and ground robotic complexes in the surrounding space;

— when solving the problems of ensuring and developing the Earth Deformation Control Service

within the framework of the Federal System of Seismological Observations, particularly in the highlands of the country;

— rapid creation of a multi-information cartographic basis of various scales with account for correlation dependence of navigation and geophysical information.

Keywords: unmanned aerial vehicle, ground robotic complex, local area of the Earth surface, cartographic data, instrumental data, error map information correlation, reference marker area.

References

1. *Pasport nauchnykh spetsial'nostei: 05.02.05 Roboty, mekhatronika i robototekhnicheskie sistemy*, 2011, <http://www.vak.ed.gov.ru/316>
2. Ryzhov B.S., Volodina N.I., Gladyshev A.I., Lupanchuk V.Yu., Tatarko K.I. *Dvoynye tekhnologii*, 2017, no. 1(78), pp. 18-23.
3. Alekseenko A.A., Goncharov V.M., Lupanchuk V.Yu. *XLIII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya "Gagarinskie chteniya – 2017". Sbornik tezisev dokladov*. Moscow, MAI, 2017, pp. 974-975.
4. Lupanchuk V.Yu., Zaitsev A.V. Development of navigation methods in problems of determining the current situation of dynamic objects in the surrounding space. *Nobelevskii kongress - XI Mezhdunarodnaya vstrecha-konferentsiya laureatov Nobelevskikh premii i nobelistov "Nauka, tekhnologii, obshchestvo i mezhdunarodnoe nobelevskoe dvizhenie" (24-28 October 2017, Tambov)*. Tambov, MINTs, 2017, p. 437-442.
5. Bershtein L.S., Melekhin V.B. *Planirovanie povedeniya intellektual'nogo robota*. (Planning of intelligent robot behavior), Moscow, Energoatomizdat, 1994, 238 p.
6. Lupanchuk V.Yu. *XLIII Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya "Gagarinskie chteniya – 2017". Sbornik tezisev dokladov*, Moscow, MAI, 2017, p. 863.
7. Berkovich S.B., Kotov N.I., Makhaev A.Yu., Martynyuk G.A., Lapkin M.V., Khrustaleva A.N. *Izvestiya instituta inzhenernoi fiziki*, 2017, vol. 1, no. 43, pp. 2-14.
8. Aleshin B.S., Afonin A.A., Veremeenko K.K., Koshelev B.V., Plekhanov V.E., Tikhonov V.A., Tyuvin A.V., Fedoseev E.P., Chernomorskii A.I. *Orientatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob"ektov: sovremennye informatsionnye tekhnologii* (Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies), Moscow, Fizmatlit, 2006, 424 p.
9. Sokolov S.V., Pogorelov V.A. *Stokhasticheskaya otsenka, upravlenie i identifikatsiya v vysokotochnykh navigatsionnykh sistemakh* (Stochastic assessment, management and identification of high precision navigation systems), Moscow, Fizmatlit, 2016, 259 p.
10. Berkovich S.B., Kotov N.I., Sholokhov A.V., Lychagov A.S., Sadekov R.N. *Girokopiya i navigatsiya*, 2017, vol. 25, no. 1(96), pp. 49-63. DOI: 10.17285/0869-7035.2017.25.1.049-063
11. Lunev E.M. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 150-159.
12. Dmitriev S.P. *Vysokotochnaya morskaya navigatsiya* (High-precision marine navigation), St. Petersburg, Sudostroenie, 1991, 224 p.
13. Krasovskii A.A., Beloglazov I.N., Chigin G.P. *Teoriya korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh sistem* (Theory of correlation-extreme navigation systems), Moscow, Nauka, 1979, 448 p.
14. Stepanov O.A. *Osnovy teorii otsenivaniya s prilozheniyami k zadacham obrabotki navigatsionnoi informatsii* (Fundamentals of the theory of estimation with applications to problems of processing of navigation information), St. Petersburg, Elektropribor, 2009. Part 1, 989 p.
15. Stepanov O.A. *Primenenie teorii nelineinoy fil'tratsii v zadachakh obrabotki navigatsionnoi informatsii* (Application of the theory of nonlinear filtration in tasks of processing of navigation information), St. Petersburg, Elektropribor, 2003, 370 p.
16. Razorenov G.N., Samarin A.A. *Teoriya i sistemy optimal'nogo upravleniya* (Theory and systems of optimal control), Moscow, MO RF, 2007, 472 p.
17. Lupanchuk V.Yu. *V mezhvuzovskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Problemy i perspektivy razvitiya sredstv i metodov vpolneniya topografo-geodezicheskikh i kartograficheskikh rabot"*. *Sbornik statei*. St. Petersburg, VKA im. A.F. Mozhaiskogo, 2015, pp. 189-192.
18. Veselov K.E., Varlamov A.S., Kastal'skii E.M., Stepanov P.P. *Instruktsiya po gravirazvedke* (Instructions for gravity exploration), Moscow, Nedra, 1980, 89 p.
19. Heiskanen A., Moritz H. *Physical Geodesy*. Graz, Austria, Institute of Physical Geodesy, 1993, 375 p.
20. Beloglazov I.N., Dzhanzhgava G.I., Chigip G.P. *Osnovy navigatsii po geofizicheskim polyam* (Basic navigation on geophysical fields), Moscow, Nauka, 1985, 328 p.