



ОЦЕНИВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Ю.В. Доронина, А.М. Скатков

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33
E-mail: YVDoronina@sevsu.ru

Статья посвящена решению задачи приближенного оценивания вероятностных характеристик результатов обнаружения объектов при дистанционном зондировании Земли. На основе системной модели процесса дистанционного зондирования, рассматривается случай, когда космический аппарат динамичен, объект обнаружения стационарен. Предложена структура программного комплекса, позволившего при наличии классификации типичных случаев, получать оценки вероятности и среднеквадратического отклонения в зависимости от времени при разных скоростях роста дисперсии. Предложенный подход приближенного оценивания вероятностных характеристик результатов обнаружения объектов позволил повысить степень обоснованности принимаемых решений по управлению параметрами дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, вероятность обнаружения, орбитальный спутник, космический аппарат, нестационарная дисперсия.

Поступила в редакцию: 20.10.2023. После доработки: 15.11.2023.

Введение. Задаче обнаружения объектов на земной поверхности с применением дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) уделяется в настоящее время повышенное внимание, в том числе в системах контроля окружающей среды (СКОС), которые представляют собой важнейшее средство анализа состояния критически важных объектов. Принципы обнаружения объектов с помощью ДЗЗ применяются в геодезии [1], тематическом картографировании, в том числе картографировании рельефа за счет применения геоинформационных технологий, в частности геоинформационной обработки цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей поверхности (ЦМП) [2–5]. В настоящее время космические сканерные снимки, получаемые космическими комплексами (КК) ДЗЗ GeoEye, WorldView-1, QuickBird, IKONOS, IKONOS-2, OrbView-3, SPOT-5, Alos, IRS, WorldView-2, Ресурс-ДК1, Ресурс-П и др., покрывают значительную часть земной поверхности и имеют высокое (от 2 до 5 м) и сверхвысокое (лучше 1 м) разрешение на местности и пригодны для крупномасштабного картографирования обширных тер-

риторий [6]. Требуемое качество обработки данных ДЗЗ с целью обнаружения объектов имеет важное значение для поиска и оценивания площадей пожаров, в гидрологических и геодезических изысканиях, в сельском хозяйстве, при управлении беспилотными объектами, в специальных задачах военного применения, что приводит к необходимости применения вероятностных методов в связи с нестационарностью объектов поиска или нестационарностью орбит космических аппаратов (КА).

Цель статьи: постановка и решение задачи приближенного оценивания вероятностных характеристик результата обнаружения объектов в процессе дистанционного зондирования, что позволит повысить степень обоснованности принимаемых решений по управлению параметрами систем дистанционного зондирования.

Анализ состояния проблемы. Предварительным этапом обнаружения объектов является решение задачи оценивания вероятности обнаружения. В целом, задачам оценивания качества обнаружения посвящено немало работ. В работе [1] ставится задача геодезическо-

го ориентирования маршрутов съемки по минимальному числу опорных точек для контроля точности и компенсация возможных грубых ошибок геопривязки видеоданных; на основе разработанного программного обеспечения в модели реализуется интегральное сжатие снимков, причем точность геопривязки снимка оказывается выше точности карты.

В [2] представлена усовершенствованная методика геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа, которая включает в себя выбор материалов ДЗЗ, их фотограмметрическую обработку, проектирование содержания карт и интерпретации результатов моделирования. Оценивание возможности поиска объектов не рассматривается.

Математическая модель единого дифференциально-локального метода отображения земной поверхности представлена в источнике [3]. На основе единой геоцентрической системы координат для достижения наилучшей точности отображения локального сегмента земной поверхности предлагается использовать способ многократного проектирования, осуществляемый методом кригинга, предусматривающим итерационное, последовательное, однотипное проектирование земной поверхности радиуса p_0 на промежуточные сферы с радиусами (R) и окончательным замыкающим проектированием на картинную плоскость, с все более близкой аппроксимацией окончательного изображения реальному размеру [7].

В работах [8, 9] авторов из Канады и Китая представлено применение высокоточных электронных тахеометров для наблюдений за деформациями, а также обоснована актуальность использования роботизированных станций с автоматическим распознаванием целей при мониторинге устойчивости на карьерах [10, 11].

В [12–15] приводятся различные подходы к анализу и моделированию технических особенностей КА для осуществления ДЗЗ, способы геопривязки

полученных изображений в виде аналитических решений.

Таким образом, авторами предпринимались попытки аналитических решений по определению объектов на земной поверхности в процессе ДЗЗ, однако в случаях, когда, например, объект поиска и космический аппарат подвижны, требуются оценочные методы, что приводит к необходимости получения приближенного вероятностного решения.

Основные имеющиеся результаты относятся к стационарным параметрам излучателей, а методы расчета при изменяющейся дисперсии в источниках неизвестны, в связи с чем данное исследование актуально.

Системная модель процесса дистанционного зондирования Земли. Для построения системной модели процесса ДЗЗ рассмотрим 4 основных случая:

(1.1) КА динамичен, что соответствует его геостационарному типу; объект обнаружения (О) стационарен (является редким случаем).

(1.2) КА стационарен, что соответствует его геостационарному типу; объект обнаружения (О) динамичен.

(2.1) КА динамичен, что соответствует его гелиостационарному типу; объект обнаружения (О) стационарен.

(2.2) КА динамичен, что соответствует его гелиостационарному типу; объект обнаружения (О) динамичен.

Таким образом, объект мы аппроксимируем окружностью некоторого радиуса r_1 , а окружностью радиуса r_2 – площадь сканирования поверхности с помощью КА (рис. 1).

Стационарность или динамичность (гео-, гелио-стационарность) объекта и КА на рис. 1 показаны горизонтальными стрелками с координатами $x_0^o - x_j^o$; $x_0^c - x_i^c$ соответственно.

На рис. 1 представлена схема ДЗЗ с учетом вариантов реализации (1.1–2.2) в задаче обнаружении объектов.

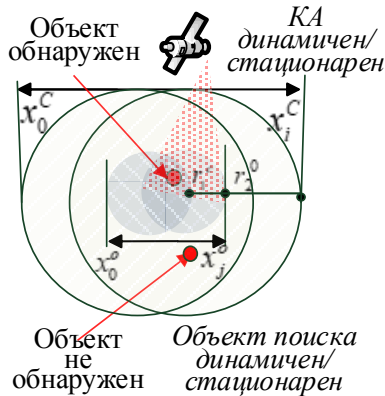


Рис. 1. Укрупненная схема альтернативных вариантов дистанционного зондирования Земли

Fig. 1. Enlarged scheme of alternative options for remote sensing of the Earth

При попадании объекта в зону «видимости» КА, объект считается обнаруженным, иначе – не обнаруженным. Следует учитывать изменение угла обзора КА по отношению к земной поверхности при его перемещении.

При решении ряда практических задач требуется оценочное (приближенное) определение вероятности обнаружения объекта поиска, например, при принятии решений относительно динамики тушения при интенсивном распространении пожаров, при изучении подвижных объектов на земле, в военном деле, при оценивании границ целеуказания и т.п. В этих и других случаях необходимы знания о достаточности статистик, что позволит управлять аппаратурой КА, стратегиями запуска с заданными доверительными вероятностями [16].

На рис. 2 приведена схема определения высоты точек субъекта излучателя над поверхностью общего земного эллипсоида [6]. Можно видеть, что в некоторый момент времени t линия визирования представляет собой вектор, который пересекает поверхность в точке M_0 с известными геодезическими $B_0 = BM_0$, $L_0 = LM_0$ и гринвичскими XM_0 , YM_0 , ZM_0 координатами, а физическую поверхность Земли – в точке P с соответствующими координатами BP , LP , HP и XP , YP , ZP , а также имеется цифровая модель района съёмки \mathbb{Z} , обеспечивающая отображение $\mathbb{Z} : \{B_0, L_0\} \rightarrow \{H\}$ [6].

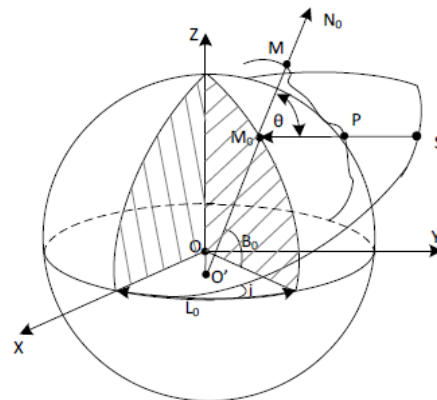


Рис. 2. Схема определения высоты точек субъекта излучателя над поверхностью общего земного эллипсоида [6]

Fig. 2. Scheme for determining the height of the emitter subject points above the surface of a common terrestrial ellipsoid [6]

Схема моделирования следующая. Используется метод Монте-Карло [17], который оказал и продолжает оказывать определенное влияние на развитие методов вычислительной математики и при решении многих задач успешно сочетается с другими вычислительными методами и дополняет их.

На плоскости выбирается случайная точка с координатами (x, y) , такая, что имеем по осям Ox , Oy случайные величины, распределённые по нормальному закону с параметрами $N(\mu, \sigma^2)$. Проверяется, попала ли точка в объект, который представляет собой круг с центром $(0, 0)$, ограниченный радиусом r . Выбор вида области поиска в виде окружности не умаляет общности представления модели и определяется простотой реализации, а также формой луча КА.

Случайные испытания повторяются N раз с подсчётом числа попаданий n в такой круг. Число попаданий n по отношению к количеству всех испытаний N – есть приблизительная оценка вероятности попадания в круг. Показано, что относительная погрешность пропорциональна $s = 1/\sqrt{N}$ [17].

В исследовании рассматривается случай, когда космический аппарат динамичен, объект обнаружения стационарен.

Структура программного комплекса по моделированию вероятностных характеристик результатов дистанционного зондирования Земли. Для моделирования был создан специальный программный комплекс (ПК), в состав которого входят следующие основные модули: модуль генерирования случайных чисел (МГСЧ), модуль выбора параметров объекта поиска (МВПО), модуль выбора параметров субъекта поиска (МВПС) – космического аппарата (КА), модуль получения первичной статистики (МПС), модуль формирования итоговых результатов моделирования (МФИР), модуль визуализации результатов (МВР), подсистема управления программной средой (ПУПС), интерфейс с пользователем (ИП), модуль поддержки принятия решений (МППР). Приведенная структура ПО имеет открытую конфигурацию и развивается версионно, в том числе реализуются процедуры искусственного интеллекта.

Общая схема работы разработанного ПО следующая: при запуске посредством ИП формируются начальная параметризация и описание задач поиска через МВПС и МВПО (определение параметров объекта поиска и КА), далее на основе МГСЧ имитируются случайные параметры процесса поиска (координаты точки на плоскости) и МПС выдает первичную статистику (вероятность, СКО, дисперсию). Остальные структурные компоненты ПО позволяют получить окончательные результаты, визуализировать его через ПУПС и ИП передать лицу, принимающему решения (ЛПР) для уточнения настройки процесса поиска объектов на основе ДЗЗ.

При моделировании выбиралось достаточное число испытаний: $N=100000$, которое гарантированно обеспечивает требуемую точность оценивания вероятности обнаружения.

Укрупненная схема программного комплекса по моделированию вероятностных характеристик результатов дистанционного зондирования Земли представлена на рис. 3.

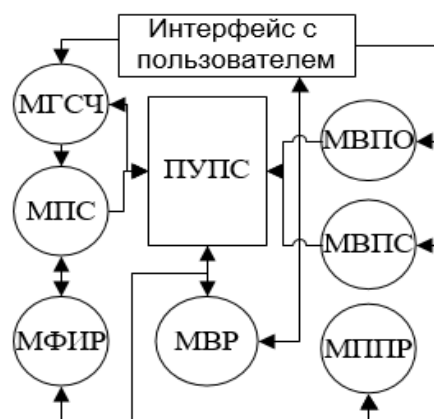


Рис. 3. Укрупненная схема программного комплекса по моделированию вероятностных характеристик результатов дистанционного зондирования Земли
Fig. 3. The enlarged scheme of the software package for modeling the probabilistic characteristics of the results of remote sensing of the Earth

Характеристики объекта поиска следующие: объект ограничен стационарной окружностью радиусом $r=0,5$, координаты центра $(x_0, y_0) = (0, 0)$.

Характеристики субъекта следующие: поисковый сигнал представляет собой имитацию «луча КА»: выбор случайной точки на плоскости, отображающей область объекта. Координаты точки случайны, распределены по нормальному закону с математическим ожиданием $M=0$.

Нестационарная дисперсия определяется как $\sigma^2 = k \cdot t + b$, т. е. дисперсия – линейно возрастающая функция времени.

Нестационарное среднее квадратическое отклонение (СКО) равно $\sigma = \sqrt{k \cdot t + b}$ при $k = \text{tg}(\alpha)$, $b = 0$. Угол наклона дисперсии выбирается равным: $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, \dots, 50^\circ$, что позволит сформировать семейство кривых. При моделировании в качестве аргумента используется условная единица времени (УЕВ): $t = 0, 1, \dots, 9$.

На рис. 4 приведены результаты моделирования изменения СКО направленности поискового сигнала субъекта с углом наклона $\alpha = 15^\circ$ и линейно возрастающей дисперсии.

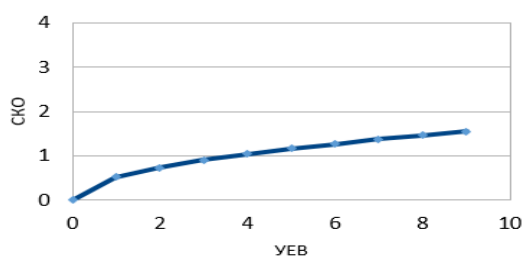


Рис. 4. Изменение стандартного отклонения поискового сигнала с углом наклона $\alpha = 15^\circ$

Fig. 4. Changing the standard deviation of the search signal with the angle of inclination $\alpha = 15^\circ$

Результаты полученных оценок вероятности обнаружения объекта при линейно возрастающей дисперсии поискового сигнала от субъекта в зависимости от времени и с углом наклона $\alpha = 15^\circ$ приведены на рис. 5.

Полученная при моделировании кривая (см. рис. 5) отражает плавное убывание вероятности обнаружения, начиная с УЕВ = 1.

На рис. 6 приводятся результаты моделирования среднеквадратического отклонения в зависимости от времени при разных скоростях роста дисперсии с заданными углами наклона соответственно $\alpha = 5^\circ, 10^\circ \dots 50^\circ$.

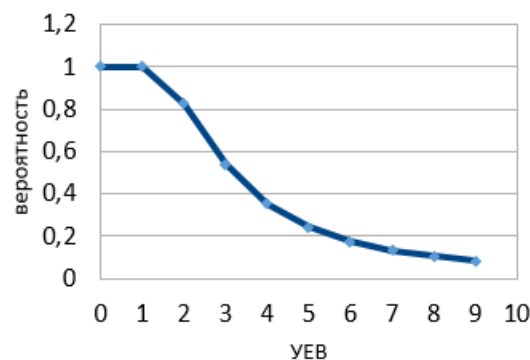


Рис. 5. Оценка вероятности обнаружения объекта при линейно возрастающей дисперсии поискового сигнала субъекта в зависимости от времени и с углом наклона $\alpha = 15^\circ$

Fig. 5. Estimation of the probability of detecting an object with a linearly increasing variance of the subject's search signal depending on time and with an angle of inclination $\alpha = 15^\circ$

На рис. 7 отражены оценки изменения вероятности обнаружения стационарного объекта при нестационарных характеристиках поиска в зависимости от времени при различных скоростях роста дисперсии поискового сигнала с углами наклона $\alpha = \arctg(\sigma^2/t)$ (получено семейство кривых).

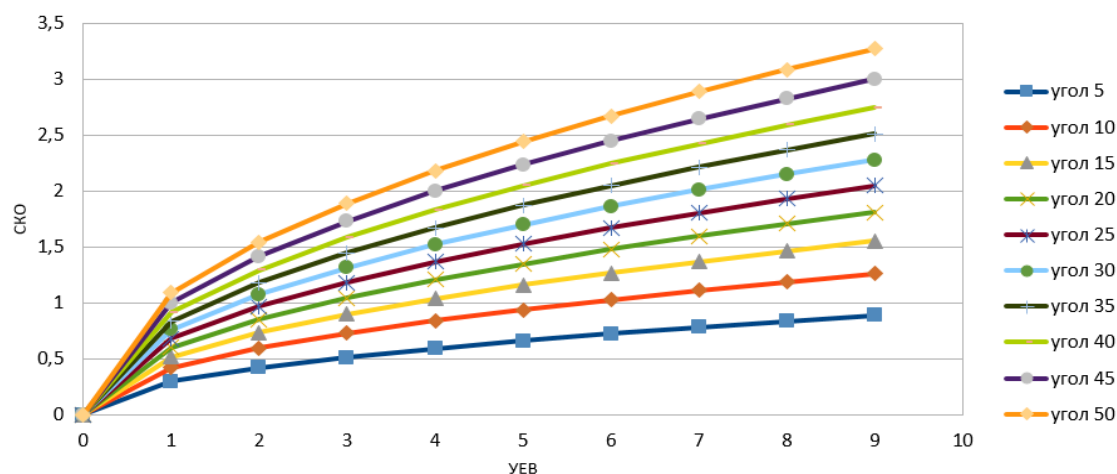


Рис. 6. Оценки роста дисперсии результатов дистанционного зондирования Земли с углами наклона $\alpha = 5^\circ, 10^\circ \dots 50^\circ$

Fig. 6. Estimates of the growth of the dispersion of the results of remote sensing of the Earth with tilt angles $\alpha = 5^\circ, 10^\circ \dots 50^\circ$

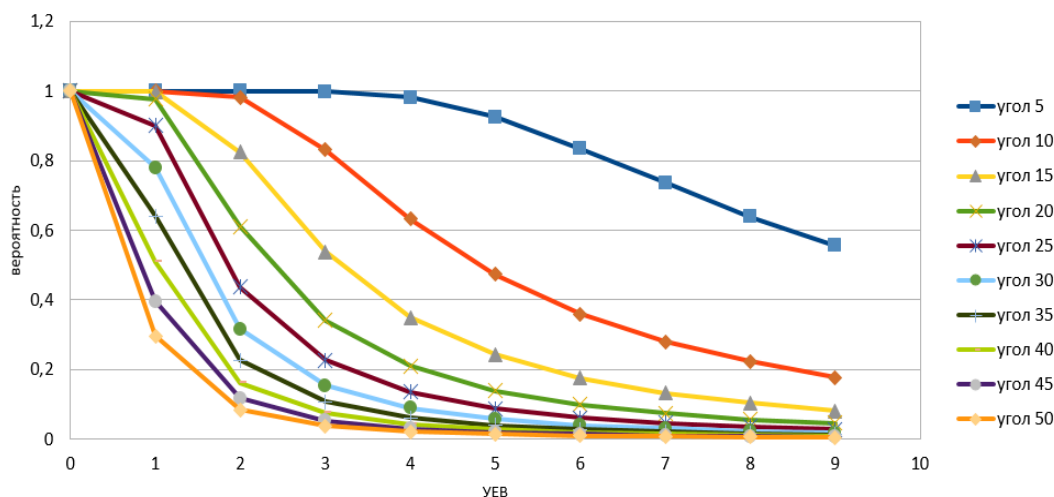


Рис. 7. Оценки вероятности обнаружения стационарного объекта при нестационарных характеристиках поиска в дистанционном зондировании Земли в зависимости от времени при различных скоростях роста дисперсии поискового сигнала и углах наклона $\alpha = \arctg(\sigma^2/t)$

Fig. 7. Estimates of the probability of detecting a stationary object with non-stationary search characteristics in remote sensing of the Earth as a function of time

at different rates of growth of the dispersion of the search signal and tilt angles $\alpha = \arctg(\sigma^2/t)$

Анализ результатов моделирования. При $t = 0$ вероятность обнаружения равна 1, так как

$$\sigma^2 = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot t + b = \operatorname{tg}(\alpha) \cdot 0 + 0 = 0.$$

При нулевой дисперсии поисковый сигнал детерминирован и обнаруживает цель с вероятностью 1 при безошибочной ориентации, что практически недостижимо.

Представленное на рис. 7 семейство кривых образует пучок, ограниченный кривыми для минимального и максимального углов. Наиболее быстрое уменьшение вероятности происходит при максимальном угле. Так, например, после первой УЕВ вероятность уменьшается с $p = 1$ до $p = 0,29$. При уменьшении скорости в два раза, т. е. при угле $\alpha = 25^\circ$, вероятность обнаружения на первой УЕВ относительно увеличивается на 203%, а абсолютно на 0,6. После окончания второй УЕВ абсолютное увеличение не столь значительное, всего 0,35, а относительное 519%. Изменение угла от 45° до 50° мало влияет на вероятность обнаружения, кривые мало отличаются. В то же время при значениях

α от 5° до 10° различия незначительные от 0 УЕВ до 2 УЕВ, а от 2 УЕВ до 9 УЕВ различия значительные. Так, например, после 6 УЕВ относительная разность на 132%, а абсолютная – 0,47.

Полученные результаты позволили повысить обоснованность принимаемых решений ЛПР, например, по требованиям к аппаратуре КА, методам обнаружения и т. п., на основе которых строится система поддержки принятия решений (СППР). Каркас СППР включает созданное ПО, структура которого изображена на рис. 3, а уточнение схемы составляет содержание дальнейшей работы авторов.

Заключение. Предварительное оценивание вероятности обнаружения объектов в процессе ДЗЗ играет важную роль при решении многих задач.

Предложена структура программного комплекса по моделированию вероятностных характеристик результатов дистанционного зондирования Земли, позволившего при наличии классификации типичных случаев, получать оценки вероятности и среднеквадратического отклонения в зависимости от времени при разных скоростях роста дисперсии.

Показано, что наиболее быстрое уменьшение вероятности происходит

при максимальном угле: после первой условной единицы времени вероятность уменьшается примерно в три раза, а при уменьшении скорости в два раза, вероятность обнаружения увеличивается в два раза. Предложенный подход приближенного оценивания вероятностных характеристик результатов обнаружения объектов позволил повысить степень обоснованности принимаемых решений по управлению параметрами дистанционного зондирования Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технология* визуального геодезического ориентирования космических снимков земной поверхности / А.М. Кочергин, А.Е. Кузнецов, В.И. Побаруев, А.С. Шокол // *Цифровая обработка сигналов*. 2012. № 3. С. 45–48.

2. *Новаковский Б.А., Пермяков Р.В.* Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа: учебное пособие. М.: Изд-во МИИ-ГАиК, 2019. 175 с.

3. *Стариков И.П., Копылова Н.С., Шерстюк Е.В.* Математическая модель единого дифференциально-локального метода отображения земной поверхности // *Информация и космос*. 2017. № 1. С. 168–173.

4. *Макунина Я.С., Долматов С.Н., Борисевич А.Н.* Перспективы применения технологии ДЗЗ в качестве инструмента раннего обнаружения лесных пожаров // *Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции (Железногорск, 21 апреля 2023 г.)*. 2023. С. 174–177.

5. *Соловьёв М.Д.* Перспективные проекции с многократными изображениями (перспективами) // *Труды ЦНИИ-ГАиК*. 1959. Вып. 31. С. 137–165.

6. *Андронов В.Г.* Математические модели, методы и методики автономной фотограмметрической обработки космических сканерных снимков: дис. ... д-ра техн. наук. Курск. 2016. 328 с.

7. *Комиссаров А.В.* Теория и технология лазерного сканирования для про-

странственного моделирования территорий: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск, 2016. 278 с.

8. *Hope C., Chuaqui M.* Manual total station monitoring // *Geotechnical News*. 2008. No. 26. Iss. 3. P. 28–30.

9. *Wang H.* Application of Leica TS30 ultra-precision total station in de-formation monitoring // *Journal of Liaoning, Technical University (Natural Science Edition)*. 2015. No. 34, Iss. 3. P. 401–404.

10. *Bond J., Chrzanowski A., Wilkins R.* Using GPS for augmenting deformation monitoring systems in open pit mines - Problems and solutions // *Geomatica*. 2005. No. 59, Iss. 1. P. 73–82.

11. *Zhao Q.A.* A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM / Q. Zhao, Z. Liu, B. Qin, Z. Wei, S. Fang // *Hydrology and Earth Systems sciences (HESS)*. 2009. Vol. 13 (10). P. 1897–1906.

12. *Исследование* точности фототриангуляции с использованием различных методов лабораторной и полевой калибровки / А.Г. Чибуничев, В.М. Курков, А.В. Говоров [и др.] // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2016. № 2. С. 42–47.

13. *Mendoza M., Tsvetkov P.V., Lewis M.* Multi-modal global surveillance methodology for predictive and on-demand characterization of localized processes using cube satellite platforms and deep learning techniques // *In Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2021. Vol. 22. P. 100518. DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100518.

14. *Guyot A., Lennon M., Hubert-Moy L.* Objective comparison of relief visualization techniques with deep CNN for archaeology // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2021. Vol. 38. P. 103027. DOI: 10.1016/j.jasrep.2021.103027

15. *Михайлов И.Р., Абрамов Н.А., Долматов С.Н.* Методы дистанционного зондирования земли в лесной промышленности // *Современные инновации, системы и технологии*. 2023. № 3 (3). С. 0301–0310. <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0301-0310>

16. *Полунатурное* моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности:

учебное пособие / В.Г. Важенин, Н.А. Дядьков, А.С. Боков, А.К. Сорокин, Ю.В. Марков, Л.Л. Лесная / под общ. ред. В.Г. Важенина. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 208 с.

17. Михайлов Г.А., Аверина Т.А. Алгоритм «максимального сечения» в методе Монте-Карло // Доклады Академии наук. 2009. Т. 428, № 2. С. 163–165.

ESTIMATION OF PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF RESULTS OF REMOTE SENSING OF THE EARTH

Yu.V. Doronina, A.M. Skatkov

Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University»,
RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The article focuses on solving the problem of approximate estimation of probabilistic characteristics of object detection results during remote sensing of the Earth. Based on the system model of the remote sensing process, the case is considered when the spacecraft is dynamic, the object of detection is stationary. The structure of the software package is proposed, which, in the presence of a classification of typical cases, made it possible to obtain estimates of probability and standard deviation depending on time at different rates of variance growth. The proposed approach of approximate estimation of probabilistic characteristics of object detection results allowed increasing the degree of validity of decisions made to control the parameters of remote sensing of the Earth.

Keywords: remote sensing of the Earth, probability of detection, orbital satellite, spacecraft, dispersion.

REFERENCES

1. Kochergin A.M., Kuznecov A.E., Pobaruyev V.I., and Shokol A.S. Tekhnologiya vizual'nogo geodezicheskogo orientirovaniya kosmicheskikh snimkov zemnoj poverhnosti (Technology of visual geodetic orientation of satellite images of the Earth's surface). *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2012, No. 3, pp. 45–48.
2. Novakovskij B.A. and Permyakov R.V. Kompleksnoe geoinformacionno-fotogrammetricheskoe modelirovanie rel'efa: uchebnoe posobie (Complex geoinformation and photogrammetric modeling of relief: textbook). Moscow: "Izd-vo MIIGAiK", 2019, 175 p.
3. Starikov I.P., Kopylova N.S., and Sherstyuk E.V. Matematicheskaya model' edinogo differentsial'no-lokal'nogo metoda otobrazheniya zemnoj poverhnosti (Mathematical model of a single differential-local method of mapping the Earth's surface). *Informaciya i kosmos*, 2017, No. 1, pp. 168–173.
4. Makunina Ya.S., Dolmatov S.N., and Borisevich A.N. Perspektivy primeneniya tekhnologii DZZ v kachestve instrumenta rannego obnaruzheniya lesnyh pozharov (Prospects for the use of remote sensing technology as an early detection tool for forest fires), Aktual'nye problemy obespecheniya pozharnoj bezopasnosti i zashchity ot chrezvychajnyh situacij (Actual Problems of Fire Safety and Emergency Protection: Materials of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference): materialy IV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. 21 april 2023, Zheleznogorsk, 2023, pp. 174–177.
5. Solov'yov M.D. Perspektivnye proekcii s mnogokratnymi izobrazheniyami (perspektivami) (Perspective projections with multiple images (perspectives)). *Trudy CNIIGAiK*, 1959, Vol. 31, pp. 137–165.
6. Andronov V.G. Matematicheskie modeli, metody i metodiki avtonomnoj fotogrammetricheskoy obrabotki kosmicheskikh skanernykh snimkov: special'nost: Diss doktora tekhn. nauk (Mathematical models, methods and techniques of autonomous photogrammetric processing of space scanner images. Doct. techn. sci. thesis), Kursk: 2016, 328 p.
7. Komissarov A.V. Teoriya i tekhnologiya lazernogo skanirovaniya dlya prostranstvennogo modelirovaniya territorij: Dis. doktora tekhn. nauk (Theory and technology of laser scanning for spatial modeling of territories. Doct. techn. sci. thesis), Novosibirsk: 2016, 278 p.

8. Hope C. and Chuaqui M. Manual total station monitoring. *Geotechnical News*, 2008, No. 26, Iss. 3, pp. 28–30.
9. Wang H. Application of Leica TS30 ultra-precision total station in de-formation monitoring. *Journal of Liaoning, Technical University (Natural Science Edition)*, 2015, No. 34, Iss. 3, pp. 401–404.
10. Bond J. Using GPS for augmenting deformation monitoring systems in open pit mines - Problems and solutions. *Geomatica*, 2005, No. 59, Iss. 1, pp. 73–82.
11. Zhao Q.A, Liu Z., Qin B., Wei Z., and Fang S. A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM. *Hydrology and Earth Systems sciences (HESS)*, 2009, Vol. 13 (10), pp. 1897–1906.
12. Chibunichev A.G., Kurkov V.M., Govorov A.V., Smirnov A.V., and Mihalyn V.A. Issledovanie tochnosti fototriangulyacii s ispol'zovaniem razlichnyh metodov laboratornoj i polevoj kalibrovki (Investigation of the accuracy of phototriangulation using various methods of laboratory and field calibration). *Izv. vuzov Geodeziya i aerofotos'emka*, 2016, No. 2, pp. 42–47.
13. Mendoza M., Tsvetkov P.V., and Lewis M. Multi-modal global surveillance methodology for predictive and on-demand characterization of localized processes using cube satellite platforms and deep learning techniques. *In Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, Vol. 22, 100518, DOI: 10.1016/j.rsase.2021.100518.
14. Guyot A., Lennon M., and Hubert-Moy L. Objective comparison of relief visualization techniques with deep CNN for archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2021, Vol. 38, 103027, DOI: 10.1016/j.jasrep.2021.103027
15. Mihajlov I.R., Abramov N.A., and Dolmatov S.N. Metody distancionnogo zon-dirovaniya zemli v lesnoj promyshlennosti (Methods of remote sensing of the earth in the forest industry). *Sovremennye innovacii, sistemy i tekhnologii*, 2023, Vol. 3 (3), pp. 0301–0310, <https://doi.org/10.47813/2782-2818-2023-3-3-0301-0310>
16. Vazhenin V.G., Dyad'kov N.A., Bokov A.S., Sorokin A.K., Markov YU.V., Lesnaya L.L. Polunaturalnoe modelirovanie bortovyh radiolokacionnyh sistem, rabotayushchih po zemnoj poverhnosti (Semi-natural modeling of airborne radar systems operating on the Earth's surface). Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2015, 208 p.
17. Mihajlov G.A. Algoritm "maksimal'nogo secheniya" v metode Monte-Karlo (The "maximum cross-section" algorithm in the Monte Carlo method). *Doklady Akademii nauk*, 2009, Vol. 428, No. 2, pp. 163–165.