УДК 528.71

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ НАЗЕМНЫХ КОНТРОЛЬНЫХ ТОЧЕК С ЦЕЛЬЮ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ БПЛА

П.Р. Зульфугарлы (Азербайджанский технический университет, Баку)

В 2019 г. окончила Азербайджанский технический университет по специальности «лазерная техника и технология». С 2017 г. работала в Национальном аэрокосмическом агентстве (НАКА) Азербайджана (Баку). С 2022 г. работает в Азербайджанском техническом университете (Баку), на кафедре «Радиотехника», в настоящее время, ассистент.

Л.И. Нуриева (НАКА Азербайджана, Баку**)**

В 2018 г. окончила физический факультет Бакинского государственного университета, с присвоением квалификации магистр по направлению «твердотельная электроника». С 2018 г. работает в Национальном аэрокосмическом агентстве (НАКА) Азербайджана (Баку), в настоящее время - заместитель начальника отдела.

Аннотация

Сформирована и решена задача оптимального размещения наземных контрольных точек на исследуемом участке при использовании БПЛА в целях дистанционного зондирования. Составлены функции зависимости известных показателей GDI, S и N от стоимости контрольных точек и далее предложены показатели эффективности в виде произведения стоимости указанных контрольных точек на введенные функциональные зависимости. Сформулированы и решены задачи минимизации среднеинтегральных величин предложенных показателей эффективности.

Ключевые слова: БПЛА, контрольные точки, дистанционное зондирование, оптимизация, эффективность

Введение

В настоящее время БПЛА является незаменимым средством для проведения дистанционного зондирования в региональном масштабе. Они имеют намного высокую разрешающую способность чем спутники, а также более эффективны, чем лазерные сканеры. Дистанционное зондирование с применением БПЛА осуществляется в таких областях как построение трехмерных моделей [1], исследование водоемов [2], сельское хозяйство [3], лесное хозяйство [4] и др. При проведении высокоточных картографических построений позиционная информация, выдаваемая аппаратурой, установленной на БПЛА, должна быть скорректирована. Дело в том, что GPS, установленный на БПЛА имеют ограниченную точность, зависящую от погодных условий и от приема спутниковых сигналов. Использование наземных контрольных точек

(GCP) позволяет уточнить позиционную информацию, имеющуюся в изображениях, полученных от БПЛА. При этом координаты самих контрольных точек измеряются с помощью системы RTK-GNSS (кинематической глобальной навигационной спутниковой системы реального времени). В работах [5-8] было показано, что увеличение количества используемых GCP позволяет повысить точность геопозиционирования. Вместе с тем, возможны случаи, когда исследуемая территория недоступна для вхождения и следует определить оптимальный порядок для установки GCP в таких территориях.

Распределение GCP по территории исследуемого участка характеризуется следующими показателями:

1) Индекс распределения GCP, обозначаемое как GDI, вычисляется по формуле [9].

$$GDI = \frac{S \cdot N}{S_{\Sigma}} \quad (1)$$

где: GDI - площадь участка, охваченного GCP;
N-количество используемых GCP на участке; S_{Σ}-площадь всего участка.

Показатель GDI рассматривается в качестве калибровочной способности GCP. Зависимости горизонтальной погрешности калибровки от GDI, S и N показаны на рис. 1[9].

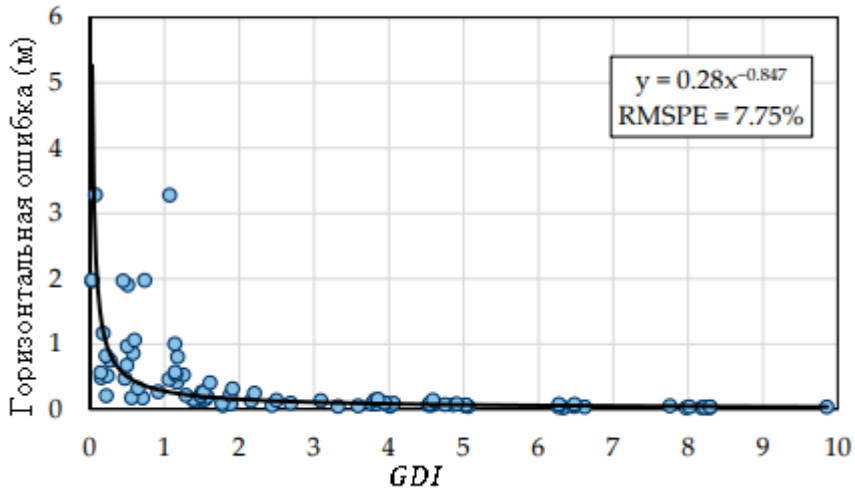

Рис. 1а Зависимость горизонтальной погрешности от величины GDI

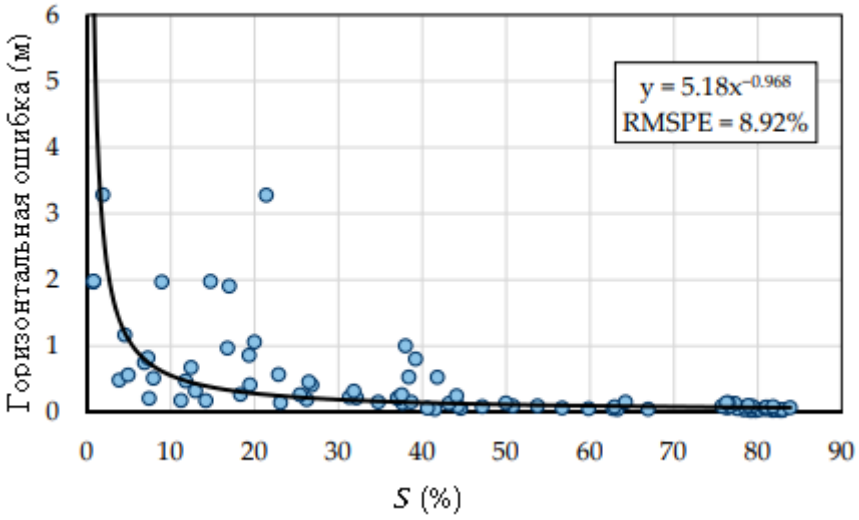

Рис. 1b Зависимость горизонтальной погрешности калибровки от величины S

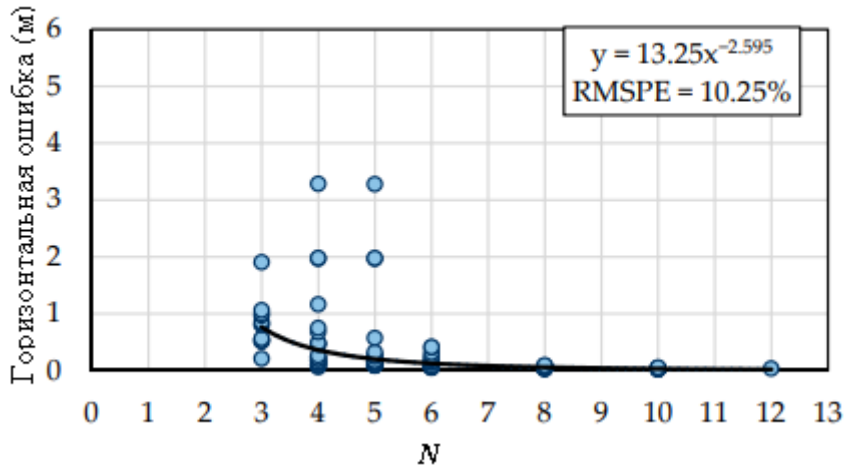

Рис. 1c Зависимость горизонтальной погрешности калибровки от величины N

Согласно [9], существуют следующие нелинейные регрессионные зависимости между горизонтальной погрешностью (y) и значениями GDI, $S(GCP)$ и $N(GCP)$

$$y = 0{,}28 \cdot GDI^{-0{,}847} \quad (2)$$

$$y = 5{,}18 \cdot S^{-0{,}968} \quad (3)$$

$$y = 13{,}25 \cdot N^{-2{,}595} \quad (4)$$

Вместе с тем, для оптимизации размещения GCD на участках, в случае большого количества таких участков или больших исследуемых территорий необходимо учесть также такой фактор, как цена используемых GCD, которая согласно [10] изменяется в пределах 60÷400 USD. Далее, в настоящей статье

рассматривается вопрос по оптимизации процедуры размещения GCD на исследуемых участках.

Предлагаемый метод

Обозначив стоимость одного GCD как x введем на рассмотрение следующие функциональные зависимости:

$$GDI = GDI(x)^{-0,847} \quad (5)$$

$$S = S(x)^{-0,968} \quad (6)$$

$$N = N(x)^{-2,595} \quad (7)$$

Введенные функции (5), (6), (7) обозначают соответственно зависимость GDI, S и N от цены применяемых GCP.

Далее, введем на рассмотрение следующие комплексные показатели эффективности размещения GCP:

$$\alpha = x \cdot GDI(x)^{-0,847} \quad (8)$$

$$\beta = x \cdot S(x)^{-0,968} \quad (9)$$

$$\gamma = x \cdot N(x)^{-2,595} \quad (10)$$

На основе введенных комплексных показателей составим следующие целевые функционалы оптимизации:

$$F_1 = \frac{1}{\Delta x}\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot GDI(x)^{-0,847}dx \quad (11)$$

$$F_2 = \frac{1}{\Delta x}\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot S(x)^{-0,968}dx \quad (12)$$

$$F_3 = \frac{1}{\Delta x}\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot N(x)^{-2,595}dx \quad (13)$$

где $\Delta x = x_{max} - x_{min}$.

Таким образом, F_1, F_2, F_3 представляют собой функционалы, подлежаще оптимизации. Следует определить такие экстремали функционалов (11), (12) и (13) при которых F_1, F_2, F_3 достигли бы минимальной величины.

Для решения вышеуказанной задачи воспользуемся методом решения неоклассической вариационной задачи Лагранжа, согласно которому должны быть введены ограничительные условия:

$$F_{10} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} GDI(x)dx = C_1; \quad C_1 = const \quad (14)$$

$$F_{20} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} S(x)dx = C_2; \quad C_2 = const \quad (15)$$

$$F_{30} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} N(x)dx = C_3; \quad C_3 = const \quad (16)$$

Далее составляются полные функционалы, подлежащие оптимизации по схеме:

$$F_{0i} = F_i + \lambda_i[F_{0i} - C_1] \quad (17)$$

С учетом выше изложенного получим:

$$F_{01} = \frac{1}{\Delta x}\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot GDI(x)^{-0,847}dx + \lambda_1\left[\int_{x_{min}}^{x_{max}} GDI(x)dx - C_1\right] \quad (18)$$

$$F_{02} = \frac{1}{\Delta x}\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot S(x)^{-0,968}dx + \lambda_2\left[\int_{x_{min}}^{x_{max}} S(x)dx - C_2\right] \quad (19)$$

$$F_{03} = \frac{1}{\Delta x}\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot N(x)^{-2,595}dx + \lambda_3\left[\int_{x_{min}}^{x_{max}} N(x)dx - C_3\right] \quad (20)$$

Таким образом, решение оптимизационных задач (18)÷(20) позволяет определить оптимальные функции $GDI(x)_{opt}; S(x)_{opt}; N(x)_{opt}$ при которых $F_{0i} \to min; i = \overline{1,3}$.

Дадим модельное решение вышеуказанных оптимизационных задач.

Модельное исследование

С учетом схожести форм функционалов F_{01}, F_{02} и F_{03} рассмотрим единую модель оптимизируемого функционала:

$$F_0 = \frac{1}{\Delta x}\int_{x_{min}}^{x_{max}} x \cdot \psi(x)^{-b}dx + \lambda_0\left[\int_{x_{min}}^{x_{max}} \psi(x)dx - C_0\right] \quad (21)$$

Согласно методу Эйлера решение задачи (21) должно удовлетворить условию

$$\frac{d\{x\cdot\psi(x)^{-b}+\lambda_0\psi(x)\}}{d\psi(x)} = 0 \quad (22)$$

С учетом (22) имеем:

$$-b \cdot x \cdot \psi(x)^{-b-1} + \lambda_0 = 0 \quad (23)$$

Из (23) получим:

$$\psi(x)^{-b-1} = \frac{\lambda_0}{bx} \quad (24)$$

Из (24) имеем:

$$\psi(x) = \sqrt[-(b+1)]{\frac{\lambda_0}{bx}} \quad (25)$$

Отметим, что решение (25) обеспечивает минимум функционала (21), т.к. вторая производная интеграла в (21) всегда положительная величина. С учетом ограничительных условии (14), (15) и (16) для модельного исследования напишем:

$$\int_{x_{min}}^{x_{max}} \sqrt[-(b+1)]{\frac{\lambda_0}{bx}}\,dx = C_0 \tag{26}$$

Из (26) получаем:

$$\sqrt[-(b+1)]{\lambda_0} \cdot \int_{x_{min}}^{x_{max}} \sqrt[-(b+1)]{\frac{1}{bx}}\,dx = C_0 \tag{27}$$

Из (27) имеем:

$$\lambda_0 = \left[\frac{C_0}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \sqrt[-(b+1)]{\frac{1}{bx}}\,dx}\right]^{-(b+1)} \tag{28}$$

Таким образом, решение модельной задачи в виде выражений (25) и (28) могут быть использованы для получения решений задач (18), (19) и (20).

Заключение

Сформулировано и решена задача оптимального размещения наземных контрольных точек на исследуемом участке при проведении дистанционного зондирования участка с применением БПЛА. Введены на рассмотрение функциональные зависимости известных показателей GDI, S и N от стоимости GCP и далее предложены показатели эффективности в виде произведения стоимости на введенные функциональные зависимости. Сформулированы и решены задачи минимизации среднеинтегральных величин предложенных показателей эффективности.

Список литературы

1. Piras M., Taddia G., Forno M. G., Gattiglio M., Aicardi I., Dabove P., Lo Russo S., Lingua A. Detailed geological mapping in mountain areas using an unmanned aerial vehicle: Application to the Rodoretto Valley, NW Italian Alps// Geomat. Nat. hazards Risk. 2017. 8. 137-149
2. Manfreda S., McCabe M. F., Miller P. E., Lucas R., Pajuelo V., Mallinis G., Dor E. B., helman D., Estes L., Ciraolo G. et al. On the use of unmanned aerial systems for environmental monitoring// Remote Sens. 2018. 10. 641
3. Bendig J., Yu K., Aasen H., Bolten A., Bennertz S., Broscheit J., Gnyp M. L., Bareth G. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley// Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2015. 39. 79-87

4. Zhang Y., Wu H., Yang W. Forests growth monitoring based on tree canopy 3D reconstruction using UAV aerial photogrammetry// Forests 2019. 10. 1052
5. Tonkin T. N., Midgley N. G. Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry// Remote. Sens. 2016. 8. 786
6. Bolkas D. Assessment of GCP number and separation distance for small UAS surveys with and without GNSS-PKK positioning// J. Surv. Eng. 2019. 145. 04019007
7. Mesas-Carrascosa F. J., Rumbao I. C., Berrocal J. A. B., Porras A. G. F. Positional quality assessment of orthophotos obtained from sensors onboard multi-rotor UAV plarforms// Sensors. 2014. 14. 22394-22407
8. Ulvi A. The effect of the distribution and numbers of ground control points on the precision of producing orthophoto maps with an unmanned aerial vehicle// J. Asian. Archit. Build. Eng. 2021. 20. 806-817
9. Zhang K., Okazawa H., Hayashi T., Fiwa L., Maskey S. Optimization of ground control point distribution for unmanned aerial vehicle photogrammetry for inaccessible fields// Sustainability. 2022. 14. 9505. https://doi.org/10.3390/su14159505
10. Zhang, K.; Okazawa, H.; Hayashi, K.; Hayashi, T.; Fiwa, L.; Maskey, S. Optimization of Ground Control Point Distribution for Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry for Inaccessible Fields. Sustainability 2022, 14, 9505