

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.04

УДК 528.8

Х.Г. Асадов, А.Дж. Алиева

Национальное аэрокосмическое агентство,
Баку, Азербайджанская Республика

МЕТОД МАКСИМАЛЬНО ПРАВДОПОДОБНОЙ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОЖЕСТВА УПОРЯДОЧЕННЫХ ГЕТЕРОГЕННЫХ ТЕСТОВЫХ УЧАСТКОВ

Основная проблема при валидации спутниковых измерительных данных заключается в том, что пространственное разрешение дистанционных и наземных измерительных данных сильно различается. Как результат, актуальным оказывается решение вопросов валидации изображений низкого пространственного разрешения с помощью изображений высокого разрешения и наоборот. **Целью исследования** является проведение оптимальной генерализации наземных измерительных данных. **Методы:** операция генерализации наземных данных может включать следующее: а) усреднение результатов проведенных измерений, пригодных для обработки данных гомогенных тестовых участков; б) вычисление эмпирической переходной функции между радиометрическими сигналами и результатами наземных измерений, в случае гетерогенности тестовых участков. Гетерогенность тестовых участков является важным фактором, правильный учет которого необходим для проведения операции валидации бортовых данных наиболее достоверным образом. **Результаты:** рассмотрена задача максимально правдоподобной генерализации результатов бортовых мультиспектральных измерений индексов растительности с использованием наземных упорядоченных тестовых участков. Задача решена с использованием интегральной логарифмической функции правдоподобия, которая представляется в качестве оптимизируемого функционала, зависящего от оптимизируемой функции взаимосвязи с.к.о. результатов измерений индекса раздельно по гетерогенным тестовым участкам и средними значениями этого индекса по этим же участкам. Определен оптимальный вид указанной взаимосвязи, при которой при соблюдении некоторого выявленного условия логарифмическая интегральная функция правдоподобия достигает максимальной величины

Ключевые слова: оптимизация, валидация, тестовый участок, правдоподобие, функционал.

H.G. Asadov, A.J. Aliyeva

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

A METHOD OF MAXIMUM LIKELIHOOD GENERALIZATION OF MULTISPECTRAL IMAGES USING A SET OF ORDERED HETEROGENEOUS TEST SITES

The main problem in validating satellite measurement data is that the spatial resolution of remote and ground-based measurement data is very different. As a result, it is relevant to solve the issues of validation of images of low spatial resolution using high-resolution images and vice versa. The **purpose** of the study. The purpose of the research is to carry out optimal generalization of ground-based measurement data. **Methods:** the operation of generalization of ground data may include the following: a) averaging of the results of the measurements carried out, suitable for processing data of homogeneous test sites; b) calculation of the empirical transition function between radiometric signals and the results of ground measurements, in the case of heterogeneity of test sites. The heterogeneity of test sites is an important factor, the correct accounting of which is necessary for the validation of on-board data in the most reliable way. **Results:** the problem of maximally plausible generalization of the results of onboard multispectral measurements of vegetation indices using ground-based ordered test plots is considered. The problem is solved using an integral logarithmic likelihood function, which is represented as an optimized functional depending on the optimized function of the relationship between the mean square root of the index measurement results separately for heterogeneous test sites and the average values of this index for the same sites. The optimal type of this relationship is determined in which, if some identified condition is met, the logarithmic integral likelihood function reaches its maximum value

Keywords: optimization, validation, test site, likelihood, functional.

Введение

Одним из наиболее часто используемых индексов растительности является индекс листовой площади (LAI), определяемый в качестве степени наполненности горизонтальной поверхности тестового участка растительности листьями растений [1]. Индекс LAI играет важную роль при проведении мониторинга развития растительности, при оценке выращенного урожая, продуктивности экосистемы. Индекс LAI также широко используется при проведении исследований по моделированию производительности земельных участков [2–5].

Спутниковые средства дистанционного зондирования позволяют определить величину LAI с различным пространственным и временным разрешением [6]. Например, такие спектрорадиометры, как MODIS [7], GEOVI [8], GLASS [9], позволяют определить значение LAI с пространственным разрешением (250 м ... 1 км). Очевидно, что дистанционно измеренные значения LAI должны пройти процедуру валидации путем сравнения этих данных с результатами наземных измерений [10, 11].

Основная проблема при валидации спутниковых измерительных данных заключается в том, что пространственное разрешение дистанционных и наземных измерительных данных сильно различается. Указанное обстоятельство диктует необходимость проведения генерализации наземных измерительных данных. Операция генерализации наземных данных может включать следующее: а) усреднение результатов проведенных измерений, пригодных для обработки данных гомогенных тестовых участков; б) вычисление эмпирической переходной функции между радиометрическими сигналами и результатами наземных измерений в случае гетерогенности тестовых участков.

Следует отметить, что проблема гетерогенности тестовых участков возникает не только при валидации индекса LAI, но и другого не менее распространенного индекса NDVI, определяемого как

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (1)$$

где NIR – величина отраженного с растительности излучения в близком инфракрасном диапазоне; RED – величина такого же сигнала в красной зоне.

Также отметим наличие тесной связи между индексами LAI и NDVI в виде [12]:

$$\text{LAI} = \alpha \left[1 - \left(\frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\max}}{\text{NDVI}_{\min} - \text{NDVI}_{\max}} \right)^{0.6175} \right]^{\beta}, \quad (2)$$

где α , β – коэффициенты подгонки; NDVI – текущее значение этого индекса; NDVI_{\min} , NDVI_{\max} – минимальные и максимальные значения указанного растительного индекса.

Следовательно, гетерогенность тестовых участков является важным фактором, правильный учет которого необходим для проведения операции валидации бортовых данных наиболее достоверным образом.

Для решения вышеуказанной проблемы далее предлагается метод максимально правдоподобной валидации спутниковых данных с использованием множества упорядоченных гетерогенных участков.

Основная часть

1.1. Постановка задачи

Предлагаемый метод максимально достоверной валидации предусматривает оптимальный набор тестовых участков для проведения валидации с максимально правдоподобным результатом.

Рассмотрим более подробно суть предлагаемого метода.

Допустим, что в наземном полигоне имеется множество тестовых участков для осуществления валидации измеряемого показателя x .

Распределение x на каждом из тестовых участках характеризуется своей нормально распределенной генеральной совокупностью, характеризующейся парой показателей $(\sigma_x$ и $\mu_x)$, где σ_x – с.к.о.; μ_x – среднее значение X . Гетерогенность тестовых участков определяется следующими факторами:

1. Имеется возможность составить такое множество $M = \{\mu_{xi}\}$, где элементы этого множества определяются как

$$\mu_{xi} = \mu_{x,i-1} + \Delta\mu_x; \Delta\mu_x = \text{const}; i = (\overline{1, n}), \quad (3)$$

где n – количество тестовых участков.

2. Соразмерно множеству M можно составить такое множество, где $S = \{\sigma_j\}; j = (\overline{1, n})$.

Элементы этого множества определяются как $\sigma_{x,j} = \sigma_{x,j-1} + \Delta\sigma_x; \Delta\sigma_x = \text{const}$.

3. Между элементами множества M и S существует взаимно однозначная связь: $\sigma_{x,j} = f(\mu_{xi})$,

$$\sigma_x = \sigma(\mu_x). \quad (4)$$

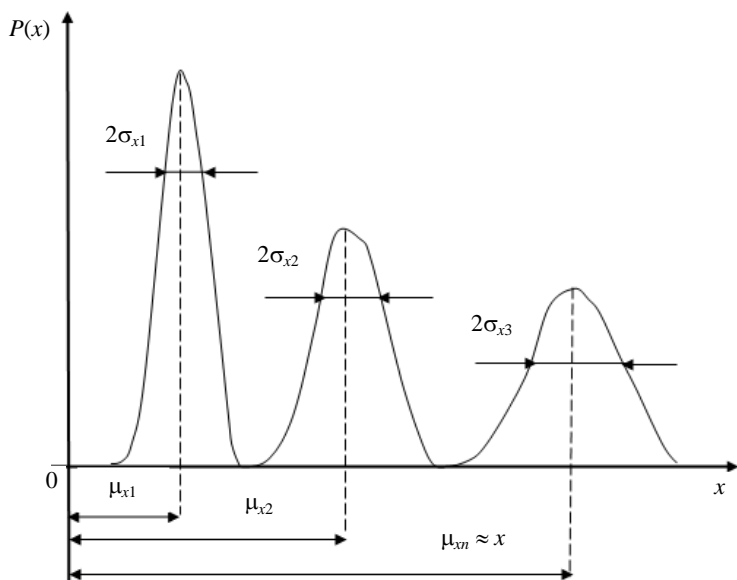


Рис. Общий вид кривых нормальных распределений на различных участках, где между σ_x и μ_x имеется линейная растущая зависимость

Хорошо известно, что для выборки из нормально распределенной генеральной совокупности выборочное среднее не зависит от выборочного стандартного отклонения. Однако в данном случае рассматривается ситуация, когда на каждом участке в пределах множества гетерогенных участков имеется своя специфическая нормально распределенная генеральная совокупность.

Общий вид нормальных распределений X , в которых существует линейная растущая зависимость типа (4), приведен на рисунке.

Рассмотрим решение задачи оптимального выбора тестовых участков.

1.2. Решение задачи максимально правдоподобной генерализации мультиспектральных снимков тестовых участков

При решении вышеставленной задачи считаем, что нам известен нормальный закон распределения X в тестовых участках. При этом согласно (3) показатель от участка к участку изменяется по линейно ступенчатому закону, и каждый участок характеризуется своим отношением σ и μ . Следовательно, с учетом (4) получаем сумму плотностей распределения вероятностей:

$$\sum_{i=1}^n f(x)_i = \sum_{i=1}^n \log \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}f(\mu_i)} \cdot \exp \left[-\frac{(x-\mu_{xi})^2}{2f(\mu_i)^2} \right] \right]. \quad (5)$$

Далее, условно переходя на непрерывную форму записи, выражение (5) перепишем как

$$P(\ln x) = \int_{\mu_{x\min}}^{\mu_{x\max}} \ln \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\mu_x)} \cdot \exp \left[-\frac{(X-\mu_x)^2}{2\sigma(\mu_x)^2} \right] \right] d\mu_x. \quad (6)$$

Рассматривая (6) в качестве оптимизируемого целевого функционала, условие для вычисления оптимальной функции $\sigma(\mu_x)$ согласно методу Эйлера определим как [13]:

$$\frac{d \left\{ \ln \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\mu_x)} \cdot \exp \left[-\frac{(X-\mu)^2}{2\sigma(\mu_x)^2} \right] \right] \right\}}{d(\sigma(\mu_x))} = 0. \quad (7)$$

Из условия (7) получаем:

$$\frac{d \left\{ \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(\mu_x)} + \ln \left[\exp \left[-\frac{(X-\mu_x)^2}{2\sigma(\mu_x)^2} \right] \right] \right\}}{d(\sigma(\mu_x))} = 0. \quad (8)$$

Из (8) получаем следующее уравнение:

$$-\frac{1}{\sigma(\mu_x)} + \frac{(X-\mu_x)^2}{\sigma(\mu_x)^3} = 0. \quad (9)$$

Из (9) окончательно имеем:

$$\sigma(\mu_x) = X - \mu_x. \tag{10}$$

Таким образом, при условии (10) функция логарифмического правдоподобия достигает экстремума.

Этот экстремум является максимумом, если выполняется условие:

$$\frac{d\left(-\frac{1}{\sigma(\mu_x)} + \frac{(X-\mu_x)^2}{\sigma(\mu_x)^3}\right)}{d\sigma(\mu_x)} < 0. \tag{11}$$

Из (11) имеем:

$$\frac{1}{\sigma(\mu_x)^2} - \frac{3(X-\mu_x)^2}{\sigma(\mu_x)^4} < 0 \tag{12}$$

или

$$\frac{3(X-\mu_x)^2}{\sigma(\mu_x)^2} > 1. \tag{13}$$

Из (13) получим:

$$\sqrt{3}(X - \mu_x) > \sigma(\mu_x) \tag{14}$$

или

$$X > \mu_x + \frac{\sigma(\mu_x)}{\sqrt{3}}. \tag{15}$$

Таким образом, максимально правдоподобная валидация может быть осуществлена при соблюдении двух условий: (10) и (15).

1.3. Модельные исследования

Целью проводимого модельного исследования является показ правильности полученных результатов по оптимизации процесса генерализации бортовых снимков упорядоченного множества гетерогенных тестовых участков в количестве n , характеризующихся множествами M и S , определенных выше. Методология модельных исследований заключается в вычислении значений подинтегральной функции функционала σ при разных видах функции связи $\sigma = f(\mu)$. Используемые виды этой функции приведены в табл. 1.

Таблица 1

Используемые виды функции $\sigma = f(\mu)$

№ п/п	Вид функции $\sigma = f(\mu)$
1	$\sigma(\mu) = x - \mu$
2	$\sigma(\mu) = \frac{x-\mu}{2}$
3	$\sigma(\mu) = (x - \mu) \cdot \sqrt{2}$

Значение подинтегрального выражения функционала (6) по определению при $\sigma(\mu) = x - \mu$ должно иметь наивысокую величину. С учетом монотонности логарифмической функции были вычислены значения выражения, находящегося под логарифмом. Вычисленные значения этого выражения для разных видов функции связи приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вычисленные значения подинтегрального выражения функционала (6)

№ п/п	Вычисленные значения
1	$1/\sqrt{e} \cdot \sigma(\mu)$
2	$2/e^2 \cdot \sigma(\mu)$
3	$1/\sqrt{2}\sigma(\mu) \cdot \sqrt[4]{e}$

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, при функции связи $\sigma(\mu) = x - \mu$ вычисленное значение целевого функционала будет достигать наивысокую величину, что подтверждает полученные результаты по проводимой оптимизации.

Основные результаты

Сформулирована и решена задача оптимизации процесса генерализации результатов бортовых измерений индексов растительности с использованием набора наземных гетерогенных тестовых участков, обладающих собственной нормально распределенной генеральной совокупностью. Задача решается с использованием интегральной логарифмической функции правдоподобия, которая представляется в качестве оптимизируемого функционала, зависящего от условно непрерывной оптимизируемой функции взаимосвязи с.к.о. результатов измерений по участкам индекса и его средними значениями. Вычислен оптимальный вид указанной взаимосвязи, при которой при соблюдении некоторого выявленного условия логарифмическая интегральная функция правдоподобия достигает максимальной величины.

Заключение

Предложен метод генерализации мультиспектральных снимков, предусматривающий использование множества упорядоченных тестовых участков при условии достижения максимально правдоподобной

генерализации. Использована интегральная логарифмическая функция правдоподобия в качестве оптимизируемого функционала путем нахождения условно непрерывной оптимизируемой функции взаимосвязи с.к.о. результатов измерений по участкам индекса и его средними значениями. Показано, что при определенном виде указанной связи логарифмическая функция правдоподобия достигает максимума. Это обстоятельство позволяет проводить операцию оптимальной генерализации результатов измерения вегетационных индексов. Вместе с тем предложенный метод может быть использован для генерализации снимков не только вегетационных, но и любых других спектральных индексов, имеющих нормальный закон распределения.

Библиографический список

1. Chen J.M., Black T.A. Defining leaf area index for non – flat leaves // *Plant Cell Environ.* – 1992. – Vol. 15. – P. 421–429.
2. Moulin Sçç Bondeau Açç Delecolle Rç Combining agricultural crop models $\sigma = f(\mu)$ and satellite observations: from field to regional scales // *Int. J. Remote Sens.* – 1998. – Vol. 19. – P. 1021–1036.
3. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data / S.W. Running, D.D. Baldocchi, D.P. Turner, S.T. Gower, P.S. Bakwin, K.A. Hibbard // *Remote Sens. Environ.* – 1999. – Vol. 70. – P. 108–127.
4. Relationships between leaf area index, FAPAR and net primary production of terrestrial ecosystem / D.P. Turner, W.B. Cohen, R.E. Kennedy, K.S. Fassnacht, J.M. Briggs // *Remote Sens. Environ.* – 1999. – Vol. 70. – P. 52–68.
5. Potential monitoring of crop production using a satellite – based Climate – Variability Impact Index / P. Zhang, B. Anderson, B. Tan, D. Huang, R. Myneni // *Agric. For. Meteorol.* – 2005. – Vol. 132. – P. 344–358.
6. Liang S.L., Li X.W., Wang J.D. Leaf area index // *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications*. Science Press: Beijing, China. – 2012. – Vol. 11. – P. 342–344.
7. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data / R.B. Myneni, S. Hoffman, Y. Knyazikhin, J.L. Privette, J. Glassy, Y. Tian, Y. Wang, X. Song, Y. Zhang, G.R. Smith // *Remote Sens. Environ.* – 2002. – Vol. 83. – P. 214–231.

8. GEOVI: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 1: Principles of development and production / F. Baret, M. Weiss, R. Lacaze, F. Camacho, H. Makhmara, P. Pacholyzk, B. Smets // *Remote Sens. Environ.* – 2013. – Vol. 137. – P. 299–309.

9. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time – series MODIS surface reflectance / Z.Q. Xiao, S.L. Liang, J.D. Wang, P. Chen, X. Yin, L. Zhang, J.L. Song // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2014. – Vol. 52. – P. 209–223.

10. Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface / C. Justice, A. Belward, J. Morisette, P. Lewis, J. Privette, F. Baret // *Int. J. Remote Sens.* – 2000. – Vol. 21. – P. 3383–3390.

11. Validation of global medium – resolution LAI Products: A framework proposed within the CEOS Land Product Validation subgroup / J.T. Morisette, F. Baret, J.L. Privette, R.B. Myneni, J.E. Nickeson, S. Garrigues, N.V. Shabanov, M. Weiss, R.A. Fernandes, S.G. Leblanc // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2006. – Vol. 44. – P. 1804–1817.

12. A network of Sites and a Methodology for the Validation of Medium Spatial Resolution Satellite Products / F. Baret, M. Weiss, S. Garrigues, D. Allard, M. Leory, H. Jeanjean, R. Fernandes, R.B. Myneni, J.T. Moriette, Valeri J. Privette // *Remote Sens. Environ.* – 2015.

13. Элсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. – М.: Наука, 1974. – С. 432.

References

1. Chen J.M., Black T.A. Defining leaf area index for non - flat leaves. *Plant Cell Environ*, 1992, vol. 15, pp. 421-429.

2. Moulin Sşç Bondeau Aşç Delecolle Rş Combining agricultural crop models $\sigma = f(\mu)$ and satellite observations: from field to regional scales. *Int. J. Remote Sens.*, 1998, vol. 19, pp. 1021-1036.

3. Running S.W., Baldocchi D.D., Turner D.P., Gower S.T., Bakwin P.S., Hibbard K.A. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sens. Environ.*, 1999, vol. 70, pp. 108-127.

4. Turner D.P., Cohen W.B., Kennedy R.E., Fassnacht K.S., Briggs J.M. Relationships between leaf area index, FAPAR and net primary production of terrestrial ecosystem. *Remote Sens. Environ.*, 1999, vol. 70, pp. 52-68.

5. Zhang P., Anderson B., Tan B., Huang D., Myneni R. Potential monitoring of crop production using a satellite - based Climate - Variability Impact Index. *Agric. For. Meteorol.*, 2005, vol. 132, pp. 344-358.

6. Liang S.L., Li X.W., Wang J.D. Leaf area index. *Advanced Remote Sensing: Terrestrial Information Extraction and Applications*. Science Press: Beijing, China, 2012, vol. 11, pp. 342-344.

7. Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sens. Environ.*, 2002, vol. 83, pp. 214-231.

8. Baret F., Weiss M., Lacaze R., Camacho F., Makhmara H., Pacholyzk P., Smets B. GEOVI: LAI, FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part 1: Principles of development and production. *Remote Sens. Environ.*, 2013, vol. 137, pp. 299-309.

9. Xiao Z.Q., Liang S.L., Wang J.D., Chen P., Yin X., Zhang L., Song J.L. Use of general regression neural networks for generating the GLASS leaf area index product from time - series MODIS surface reflectance. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2014, vol. 52, pp. 209-223.

10. Justice C., Belward A., Morisette J., Lewis P., Privette J., Baret F. Developments in the validation of satellite sensor products for the study of the land surface. *Int. J. Remote Sens.*, 2000, vol. 21, pp. 3383-3390.

11. Morisette J.T., Baret F., Privette J.L., Myneni R.B., Nickeson J.E., Garrigues S., Shabanov N.V., Weiss M., Fernandes R.A., Leblanc S.G. Validation of global medium - resolution LAI Products: A framework proposed within the CEOS Land Product Validation subgroup. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2006, vol. 44, pp. 1804-1817.

12. Baret F., Weiss M., Garrigues S., Allard D., Leory M., Jeanjean H., Fernandes R., Myneni R.B., Moriette J.T., Privette Valeri J. A network of Sites and a Methodology for the Validation of Medium Spatial Resolution Satellite Products. *Remote Sens. Environ.*, 2015.

13. Elsgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniia i variatsionnoe ischislenie* [Differential equations and calculus of variations]. Moscow: Nauka, 1974, 432 p.

Сведения об авторах

Асадов Хикмет Гамид оглы (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор технических наук, профессор, начальник отдела Научного исследовательского института аэрокосмической информатики, (Баку, AZ1145, ул. С.С. Ахундова, 1, тел. +994 50 324 72 40, e-mail: asadzade@rambler.ru).

Алиева Амида Джабраиль гызы (Баку, Азербайджанская Республика) – доктор философии по технике, старший специалист Национального аэрокосмического агентства (Баку, AZ1145, ул. С.С. Ахундова, 1, e-mail: amidec.b@gmail.com).

About the authors

Asadov Hikmet Hamid oglu (Baku, Republic of Azerbaijan) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Research Institute of Aerospace Informatics, Baku, Republic of Azerbaijan. Address-Baku city, AZ1145, st. S.S.Akhundova, 1, tel. +994 50 324 72 40 E-mail asadzade@rambler.ru

Aliyeva Amida Jabrayil gizi (Baku, Republic of Azerbaijan) – Doctor of Philosophy in Engineering, Senior Specialist of the National Aerospace Agency, Baku, AZ1145, st. S.S. Akhundova, 1, e-mail amidec.b@gmail.com

Поступила: 26.06.2022. Одобрена: 01.08.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Асадов, Х.Г. Метод максимально правдоподобной генерализации мультиспектральных снимков с использованием множества упорядоченных гетерогенных тестовых участков / Асадов Х.Г., Алиева А.Дж. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 69–79. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.04

Please cite this article in English as:

Asadov H.G., Aliyeva A.J. A method of maximum likelihood generalization of multispectral images using a set of ordered heterogeneous test sites. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 69-79. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.04