

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 631.171

DOI 10.25587/2587-8751-2023-4-51-59

*Д.А. Гумбатов¹, Ю.Г. Данилов²*¹ Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика² СВФУ им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

e-mail: H.Dilan@mail.ru

e-mail: dan57sakha@mail.ru

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНДЕКСА ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ФИТОЦЕНОЗОВ

Аннотация. В ландшафтных и биогеографических исследованиях особую актуальность имеет оценка процесса фотосинтеза, влияющего на возможность определения продуктивности фитоценозов, расчета прироста фитомассы. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для оценки индекса листовой поверхности (LAI) со временем получает все больший размах благодаря их малой цене, высокой эффективности функционирования и точности. Основой для определения LAI является модель для щелевой фракции, теоретически оцениваемой с использованием закона Бера-Бугера-Ламберта. Проанализирована возможность определения растительности с применением БПЛА, на борту которого может быть установлен либо лидар либо мультиспектрометр. В первой задаче определяется по методу вычисления логарифма щелевой функции (фракции), умноженной на косинус угла сканирования и деленной на коэффициент ослабления. Во второй задаче используется существующая корреляция между известными вегетационными индексами и . Модели эмпирической статистической регрессии могут быть пригодными для определения LAI после определения различных вегетационных индексов. На основе результатов проводимых мультиспектральных измерений было обнаружено, что методика определения LAI, основанная на измерении интенсивности лучей, прошедших через крону растений приводит к сильно зашумленным оценкам. По этой причине было решено использование щелевой фракции (GF) При этом использован тот экспериментально установленный факт о том, что при умножении логарифма вегетационного индекса на высоту крону указанная корреляция значительно усиливается. Для повышения достоверности полученных значений предложено использовать среднеинтегральное значение этого показателя, вычисляемого путем составления и вычисления оптимизационной вариационной задачи, содержащей дополнительно вводимое ограничительное условие. При этом удастся решить обе задачи на максимум, т.е. появляется возможность повысить отношения сигнал/шум вычисляемой величины индекса . В обоих процедурах оптимизационных расчетов присутствуют обобщенные показатели, имеющие различный физический смысл.

Ключевые слова: лидар, мультиспектрометр, индекс листовой площади, корреляция, БПЛА, оптимизация.

D.A. Gumbatov ¹, Yu.G. Danilov ²

National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan
 M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia
 e-mail: H.Dilan@mail.ru
 e-mail: dan57sakha@mail.ru

IMPROVED METHODS FOR DETERMINING THE LEAF SURFACE INDEX USING UNMANNED AERIAL VEHICLES TO DETERMINE THE PRODUCTIVITY OF PHYTOCENOSSES

Abstract. In landscape and biogeographic studies, the assessment of the photosynthesis process, which affects the possibility of determining the productivity of phytocenoses, calculating the growth of phytomass, is of particular relevance. The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to evaluate the leaf surface index (LAI) is gaining more and more scope over time due to their low price, high operational efficiency and accuracy. The basis for determining LAI is a model for the slit fraction, theoretically estimated using the Bera-Booger-Lambert law. The possibility of determining the LAI of vegetation using a UAV, on board of which either a lidar or a multispectrometer can be installed, is analyzed. In the first problem, LAI is determined by calculating the logarithm of the slit function (fraction) multiplied by the cosine of the scanning angle and divided by the attenuation coefficient. The second problem uses the existing correlations between known vegetation indices and LAI. Empirical statistical regression models may be suitable for determining LAI after determining various vegetation indices. Based on the results of multispectral measurements, it was found that the LAI determination technique based on measuring the intensity of rays that passed through the crown of plants leads to highly noisy estimates. For this reason, it was decided to use the slit fraction (GF), while using the experimentally established fact that when multiplying the logarithm of the vegetation index by the height of the crown, this correlation is significantly enhanced. To increase the reliability of the obtained LAI values, it is proposed to use the average integral value of this indicator, calculated by composing and calculating an optimization variational problem containing an additional restrictive condition. At the same time, it is possible to solve both problems to the maximum, i.e. it becomes possible to increase the signal-to-noise ratio of the calculated value of the LAI index. In both optimization calculation procedures, there are generalized indicators that have different physical meanings.

Keywords: lidar, multispectrometer, leaf area index, correlation, UAV, optimization.

Введение

Хорошо известно, что индекс листовой площади широко используется для исследования и предсказания степени развития растительности естественных фитоценозов и сельскохозяйственных угодий [1-6]. Использование беспилотных летательных аппаратов для оценки индекса LAI со временем получает все больший размах благодаря их малой цене, высокой эффективности функционирования и точности. В настоящее время известны, в основном, две методики использования БПЛА со встроенной бортовой измерительной аппаратурой для определения индекса LAI:

1. Методика определения LAI с использованием лидаров, установленных на борту БПЛА;
2. Методика определения LAI с использованием мультиспектральной аппаратуры, установленной на борту БПЛА.

Дадим краткую характеристику этим методикам. Как отмечается в работе [7] основой для определения LAI является модель для щелевой фракции, теоретически оцениваемой с использованием закона Бера-Бугера-Ламберта. При этом связь щелевой фракции прямым образом не может быть измерена лидаром, однако данные получаемые с помощью лазера хорошо коррелируют со значением щелевой фракции. Вместе с тем, согласно [7], было обнаружено, что методика определения LAI, основанная на измерении интенсивности лучей, прошедших через крону растений приводит к сильно зашумленным результатам. По этой причине было решено определение щелевой фракции (GF) количественно, используя следующую формулу

$$GF = \frac{n_{gr}}{n} \quad (1)$$

где n_{gr} – количество измерений, в которых лазерный луч прошел через крону растений и достиг поверхности земли;

n – общее количество бортовых лидарных измерений.

При этом индексе LAI с учетом (1) определяется как

$$LAI = - \frac{\cos(\theta) \ln GF}{k} \quad (2)$$

где θ – средний угол сканирования;

k – коэффициент ослабления.

Отметим, что методика, основанная на лидарных измерениях с использованием формул (1) и (2), была реализована во многих работах, например, в работе [7] для исследования развития озимой пшеницы, в работе [8] для исследования развития хлопковых полей.

Что касается мультиспектральной методики определения, то здесь проводятся два типа радиометрических измерений:

1. Мультиспектральные измерения исходной солнечной радиации с помощью сенсорного модуля, установленного на верхней стороне БПЛА.

2. Мультиспектральные измерения отраженного от растительности на полях сигнала.

Далее осуществляется калибровка используемых радиометрических каналов.

Как отмечается в работе [8] модели эмпирической статистической регрессии могут быть пригодными для определения LAI после определения различных вегетационных индексов на основе результатов проводимых мультиспектральных измерений. Подробный список таких вегетационных индексов приведен в работе [8]. Наиболее часто используемыми моделями являются [8]:

1. Линейная функция

$$LAI = aX + b \quad (3)$$

2. Экспоненциальная функция

$$LAI = a \exp(X) \quad (4)$$

3. Логарифмическая функция

$$LAI = a \ln X + b \quad (5)$$

4. Степенная функция

$$LAI = aX^b \quad (6)$$

5. Множественная линейная регрессия

$$LAI = \sum_{i=1}^n a_i X_i + b \quad (7)$$

где X_i – модельные входные параметры; a , b – постоянные коэффициенты.

В качестве примера, где была исследована корреляция между широко используемыми спектральными вегетационными индексами и можно рассмотреть работу [9], согласно которой, корреляция между зеленым вегетационным индексом и составляет ; а между индексом и имеем . Соответствующие скаттерогаммы показаны на рис. 1 и 2.

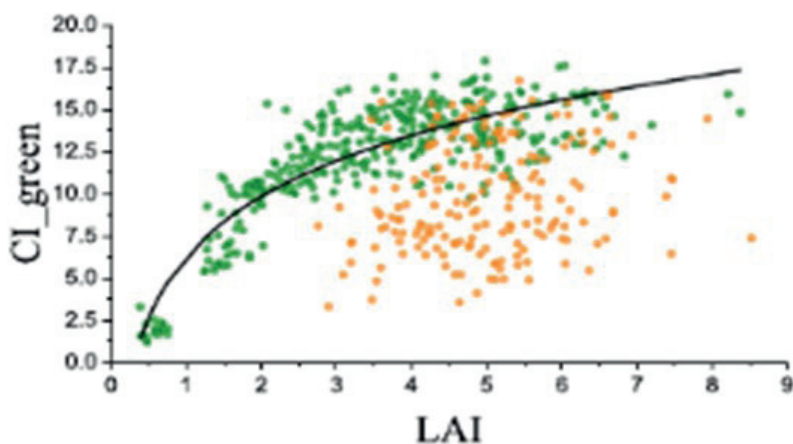


Рис. 1. Скаттерогамма регрессионной зависимости зеленого индекса от [9]

Fig. 1 Scatterogram of the regression dependence of the green index on *LAI* [9]

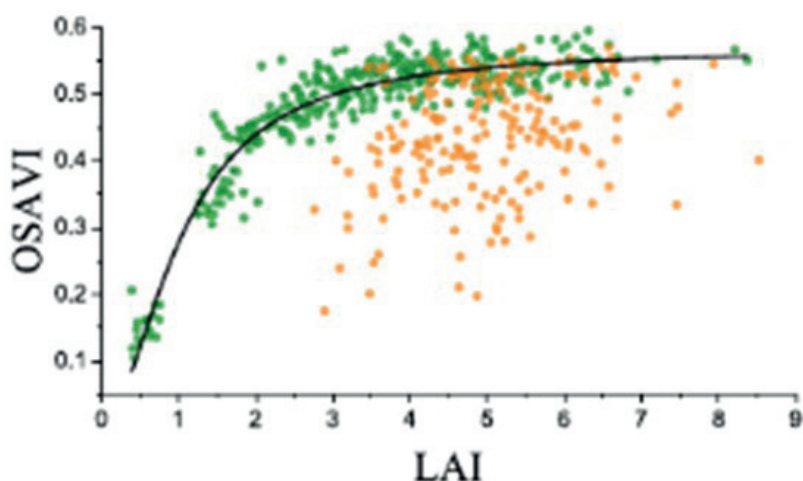


Рис. 2. Скаттерогамма регрессионной зависимости между индексами и [9]

Fig. 2 Scatterogram of regression dependence between *OSAVI* and *LAI* indexes [9]

Вместе с тем, исследования, проведенные в [9] показали значительный недостаток модели (5), заключающийся в том, что из-за эффекта насыщения обычных вегетационных индексов и др.) при средних и высоких значениях сильно ухудшается информативность указанных корреляционных связей.

При этом наши исследования показали, что если модель (5) заменить на (8)

где -высота кроны растения (в работе [9] это рисовые плантации), то степень корреляции между и индексом можно увеличить на 20 %. Таким образом, актуализируется задача дальнейшего уменьшения зашумленности получаемых результатов оценки по формулам (2) и (8)

в плане некоторого усовершенствования методик получения таких оценок путем применения различных оптимизационных процедур.

Материалы и методы

Предлагается следующее усовершенствование методики проведения лидарных измерений для определения на основе формулы (2) с учетом (1).

Суть предлагаемого усовершенствования заключается в реализации особой функциональной зависимости от .

Указанную зависимость обозначим как

$$LAI = H \ln X + b \quad (7)$$

К функции, оптимальный вид которой подлежит поиску, применим следующее ограничительное условие

$$n = \varphi(y); y = \cos \theta \quad (8)$$

Далее усовершенствование затрагивает вид функции (2) следующим образом. Исследуется средне интегральная величина, которая определяется как

$$\int_0^1 \varphi(y) dy = C_1; \quad C_1 = const \quad (9)$$

С учетом выражений (8) и (9), для выявления возможности получения наивысшего значения, обеспечивающего максимально значение отношения сигнал/шум, составим задачу безусловной вариационной оптимизации, целевой функционал которого имеет вид

$$LAI_{с.и} = - \int_0^{y_{max}} \frac{y}{k} \ln \left[\frac{n_{fr}}{\varphi(y)} \right] dy \quad (10)$$

где λ_1 – множитель Лагранжа.

Решение задачи (10) согласно [10], должно удовлетворить условию

$$F_1 = \int_0^{y_{max}} \frac{y}{k} \ln \left[\frac{n_{fr}}{\varphi(y)} \right] dy + \lambda_1 \left[\int_0^{y_{max}} \varphi(y) dy - C_1 \right] \quad (11)$$

С учетом (11) получаем:

$$\frac{d \left\{ -\frac{y}{k} \ln \left[\frac{n_{fr}}{\varphi(y)} \right] + \lambda_1 \varphi(y) \right\}}{d\varphi(y)} = 0 \quad (12)$$

Из (12) имеем

$$\frac{y}{k} \left[\frac{1}{\varphi(y)} \right] + \lambda_1 = 0 \quad (13)$$

С учетом (13) и (8) имеем

$$\varphi(y) = -\frac{y}{k\lambda_1} \quad (14)$$

Из (14) находим

$$\int_0^1 \frac{y}{k\lambda_1} dy = -C \quad (15)$$

где y_m – максимальная величина y .

С учетом $y_m = 1$ из (13) и (15) получим

$$\varphi(y) = 2yC \quad (16)$$

Очевидно, что при решении (16) среднеинтегральная величина LAI достигнет максимума, т.к. повторная производная (12) по $\varphi(y)$ оказывается всегда отрицательной.

Таким образом, согласно (16), выбор показателя n равной $\frac{2[\cos\theta] \cdot C}{k}$ может привести к увеличению $LAI_{с.и.}$, что в свою очередь повысит отношение сигнал/шум.

Покажем, что аналогичный результат также может быть получен применительно к формуле (2).

Прежде всего допустим возможность реализации зависимости

$$X = f(H) \quad (17)$$

которая указывает на связь между величиной вегетационного индекса X и высотой кроны H .

Отметим, что связь (17) вполне реальна, т.к. чем более развита листовая площадь растительности, тем больше величина вегетационного индекса и скорость его увеличения.

Далее, на введенную функцию $f(H)$ наложим следующее ограничительное условие

$$\int_0^1 f(H) dH = C_2; \quad C_2 = const \quad (18)$$

Условие (18) обозначает то, что активность вегетации растительности не может быть охарактеризована одним лишь значением роста (высоты) кроны или величиной вегетационного индекса. При этом, показатель C_2 выступает в качестве совместного показателя нормального развития растительности. Графически условие (18) отображено на рис. 3.

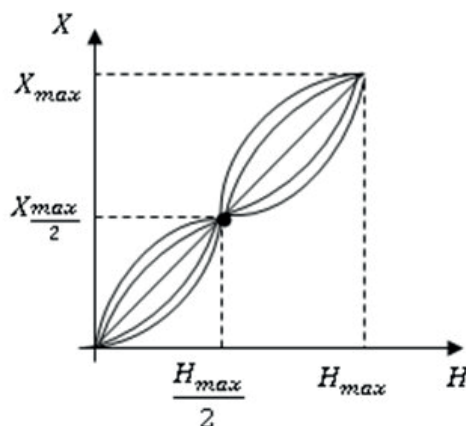


Рис. 3. Геометрическая интерпретация условия (18)

Fig. 3 Geometric interpretation of condition (18)

Для выбора оптимального вида кривой $f(H)$ на базе (8) сформируем следующий целевой функционал

$$F_2 = \int_0^{X_{max}} [H \ln X(H) + b] dH \quad (19)$$

С учетом (18) и (19) сформируем целевой функционал безусловной вариационной оптимизации F_2 :

$$F_2 = \int_0^{X_{max}} [H \ln X(H) + b] dH + \lambda_2 \left[\int_0^{X_{max}} f(H) dH - C_2 \right] \quad (20)$$

Решение задачи (20) согласно [10] должно удовлетворить условию

$$\frac{d\{H \ln X(H) + b + \lambda_2 f(H)\}}{dX(H)} = 0 \quad (21)$$

Из (21) получаем

$$\frac{H}{X(H)} + \lambda_2 = 0 \quad (22)$$

Из (22) находим

$$X(H) = -\frac{H}{\lambda_2} \quad (23)$$

С учетом (18) и (23) получаем

$$-\int_0^{X_{max}} \frac{H}{\lambda_2} dH = C_2 \quad (24)$$

Из (24) находим

$$\lambda_2 = -\frac{H_{max}^2}{2C_2} \quad (25)$$

Из (23) и (25) находим

$$X(H) = \frac{2HC_2}{H_{max}^2} \quad (26)$$

Очевидно, что и при решении (26) F_2 достигает максимума, т.к. повторная производная (22) по $X(H)$ оказывается отрицательной величиной.

Обсуждение

Таким образом рассмотрена возможность определения LAI растительности с применением БПЛА, на борту которого может быть установлен лидар или мультиспектрометр. В первом случае LAI определяется по методу вычисления логарифма целевой функции (фракции), умноженной на косинус угла сканирования и деленной на коэффициент ослабления.

Во втором случае используется известный факт наличия корреляции между вегетационными индексами и LAI . При этом использован тот экспериментально установленный факт, что при

умножении логарифма вегетационного индекса на высоту кроны указанная корреляция значительно усиливается. Кроме того, при данном подходе значительно уменьшается зашумленность.

В обоих процедурах оптимизационных расчетов присутствуют обобщенные показатели, имеющие различный физический смысл.

Заключение

Определение *LAI* на основе указанных двух подходов не позволяет получить результат с достаточно высоким отношением сигнал/шум. Для повышения достоверности полученных значений *LAI* предложено использовать среднеинтегральное значение этого показателя, определяемое путем составления и вычисления оптимизационной вариационной задачи, содержащей дополнительно вводимое ограничительное условие. При этом удастся решить обе задачи на максимум, т.е. появляется возможность повысить отношения сигнал/шум вычисляемой величины индекса *LAI*.

Литература

1. Yao, X. Estimation of wheat LAI at middle to high levels using unmanned aerial vehicle narrowband multispectral imagery / X. Yao, N. Wang, Y. Liu, T. Cheng, Y. Tian, Q. Chen, Y. Zhu // Remote Sensing. 2017. – 9 (12). <https://doi.org/10.3390/rs9121304>
2. Zhang, Z. Estimation of leaf area index with various vegetation indices from Gaofen-5 band reflectances / Z. Zhang, B. H. Tang // In proceedings of the IGARSS 2018. IEEE international geoscience and remote sensing symposium, Valencia, Spain. 23-27 July 2018. – Pp. 2619-2622.
3. Hasan, U. Estimating the leaf area index of winter wheat based on unmanned aerial vehicle rgb-image parameters / U. Hasan, M. Sawut, S. Chen // Sustainability, 2019. 11. 6829.
4. Tunca, E. Yield and leaf area index estimations for sunflower plants using unmanned aerial vehicle images / E. Tunca, E. S. Koksall, S. Cetin [et al.] // Environ. Monit. Assess. 2018. 190. 682.
5. Hu, T. Development and performance evaluation of a very low-cost UAV-LiDAR system for forestry applications / T. Hu, X. Sun, Y. Su, H. Guan, Q. Sun, M. Kelly, Q. Guo. // Remote Sens. 2021. 13. 77.
6. Lopez-Calderon, M. J. Estimation of total nitrogen content in forage maize (Zea Mays L). Using spectral indices: analysis by random forest / M. J. Lopez-Calderon, J. Estrada-Avalos, V. M. Rodriguez-Moreno [et al.] // Agriculture 2020. 10. 451.
7. Bates, J. S. Winter wheat LAI estimation using UAV mounted LiDAR / J. S. Bates // Geomundus 2020.
8. Yan, P. Estimating LAI for cotton using multisource UAV data and a modified universal model / P. Yan, Q. Han, Y. Feng, S. Kang // Remote Sens. 2022. 14. 4272.
9. Gong, Y. Remote estimation of leaf area index (LAI) with unmanned aerial vehicle (UAV) imaging for different rice cultivars throughout the entire growing season / Y. Gong, K. Yang, Z. Lin, S. Fang, X. Wu, R. Zhu, Y. Peng // Plant Methods (2021) 17:88. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00789-10>.

References

1. Yao, X. Estimation of wheat LAI at middle to high levels using unmanned aerial vehicle narrowband multispectral imagery / X. Yao, N. Wang, Y. Liu, T. Cheng, Y. Tian, Q. Chen, Y. Zhu // Remote Sensing. 2017. – 9 (12). <https://doi.org/10.3390/rs9121304>.
2. Zhang, Z. Estimation of leaf area index with various vegetation indices from Gaofen-5 band reflectances / Z. Zhang, B. H. Tang // In proceedings of the IGARSS 2018. IEEE international geoscience and remote sensing symposium, Valencia, Spain. 23-27 July 2018. – Pp. 2619-2622.
3. Hasan, U. Estimating the leaf area index of winter wheat based on unmanned aerial vehicle rgb-image parameters / U. Hasan, M. Sawut, S. Chen // Sustainability, 2019. 11. 6829.
4. Tunca, E. Yield and leaf area index estimations for sunflower plants using unmanned aerial vehicle images / E. Tunca, E. S. Koksall, S. Cetin [et al.] // Environ. Monit. Assess. 2018. 190. 682.

5. Hu, T. Development and performance evaluation of a very low-cost UAV-LiDAR system for forestry applications / T. Hu, X. Sun, Y. Su, H. Guan, Q. Sun, M. Kelly, Q. Guo. // Remote Sens. 2021. 13. 77.
6. Lopez-Calderon, M. J. Estimation of total nitrogen content in forage maize (*Zea Mays* L). Using spectral indices: analysis by random forest / M. J. Lopez-Calderon, J. Estrada-Avalos, V. M. Rodriguez-Moreno [et al.] // Agriculture 2020. 10. 451.
7. Bates, J. S. Winter wheat LAI estimation using UAV mounted LiDAR / J. S. Bates // Geomundus 2020.
8. Yan, P. Estimating LAI for cotton using multisource UAV data and a modified universal model / P. Yan, Q. Han, Y. Feng, S. Kang // Remote Sens. 2022. 14. 4272.
9. Gong, Y. Remote estimation of leaf area index (LAI) with unmanned aerial vehicle (UAV) imaging for different rice cultivars throughout the entire growing season / Y. Gong, K. Yang, Z. Lin, S. Fang, X. Wu, R. Zhu, Y. Peng // Plant Methods (2021) 17:88. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00789-10>.

Сведения об авторах

ГУМБАТОВ Дилан Азиз оглы – докторант Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика, e-mail: H.Dilan@mail.ru

GUMBATOV Dilan Aziz oglu – PhD student, National Aerospace Agency of the Republic of Azerbaijan, e-mail: H.Dilan@mail.ru

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – к.г.н, заместитель ректора СВФУ по вопросам устойчивого развития арктических территорий, профессор ЭГО ИЕН, доцент, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), e-mail: dan57sakha@mail.ru

DANILOV Yuri Georgievich – Candidate of Geographical Sciences, Deputy Rector for Sustainable Development of the Arctic Territories, Associate Professor, Institute of Natural Sciences, M. K. Ammosov North-Eastern Federal University. e-mail: dan57sakha@mail.ru