УДК 551.501

Двухволновой лазерный метод мониторинга породного состава леса

Городничев В.А.¹, Белов М.Л.^{1,*},
Швыгина М.М.¹, Ситников Д.С.¹

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведен сравнительный анализ и выбор наиболее эффективных длин волн зондирования для двухволнового лазерного метода определения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев. Показано, что наиболее эффективным вариантом, позволяющим проводить обнаружение с вероятностью правильного обнаружения $\sim 0,99$ и вероятностью ложных тревог $\sim 0,04$, являются длины волн 0,532 и 1,54 мкм. Однако, с точки зрения безопасности для зрения лучше выбрать длины волн 0,355 и 1,54 мкм, которые позволяют удовлетворительно решить задачу определения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев с вероятностью правильного обнаружения $\sim 0,9$ и вероятностью ложных тревог $\sim 0,14$.

Ключевые слова: лазерный метод, коэффициенты отражения, мониторинг леса

Введение

На сегодняшний день одной из актуальных задач контроля природной среды является мониторинг лесных массивов. Достоверная информация о состоянии и составе лесных массивов необходима для объективной оценки ситуации, прогнозов и планов рационального использования лесных ресурсов (см., например, [1-3]).

Наиболее важными задачами мониторинга лесных массивов являются: их картографирование, определение возрастного и породного состава лесов, контроль санитарного состояния лесных ресурсов.

В настоящее время основным источником данных о текущем состоянии лесных массивов является наземный мониторинг. Он дает объективную информацию о лесных массивах, однако не позволяет получать оперативную информацию о состоянии лесов, особенно для больших площадей леса и в удаленной ненаселенной местности.

Эффективным методом контроля состояния растительности (в том числе и леса) является оптическое аэрокосмическое зондирование (см., например, [4-8]).

Методы оптического аэрокосмического зондирования растительного покрова в настоящее время в большинстве своем являются пассивными. Достоинством их является

возможность получения информации за короткое время с больших площадей на поверхности Земли. Однако, оптические пассивные методы (в основном, в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах) могут работать только в светлое время суток и в хороших погодных условиях.

Поэтому, представляют интерес лазерные методы, которые могут работать в широком диапазоне атмосферных условий в любое время суток.

Статья посвящена разработке лазерного метода определения лесных участков с преобладанием хвойных или лиственных пород деревьев.

1. Постановка задачи

Для выбора длин волн зондирования (для лазерного метода определения участков леса с преобладанием хвойных или лиственных пород деревьев с авиационного носителя) необходимо учесть пропускание земной атмосферы на вертикальной трассе.

Спектральная зависимость пропускания земной атмосферы показана на рисунке 1 (для условий средних широт, летнего времени года и содержания водяного пара в атмосфере, равного 2 см осадённой воды [9]).

Рис.1. Спектральная зависимость пропускания атмосферы

Рисунок 1 показывает, что выбираемые лазерные длины волн зондирования в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (наиболее эффективных для мониторинга растительного покрова) должны лежать в окнах прозрачности земной атмосферы: менее 0,85 мкм; 0,95 – 1,06 мкм; 1,2 – 1,3 мкм; 1,5 – 1,75 мкм; 2,1 – 2,4 мкм.

В статье для длин волн зондирования в окнах прозрачности земной атмосферы на основе измеренных спектров отражения лиственных и хвойных пород деревьев проводит-

ся сравнительный анализ и выбор наиболее эффективных длин волн для двухволнового лазерного метода определения участков леса с преобладанием или лиственных или хвойных пород деревьев.

2. Сравнительный анализ длин волн зондирования для двухволнового лазерного метода определения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев

Для сравнительного анализа и выбора наиболее эффективных длин волн для двухволнового лазерного метода определения участков леса с преобладанием или лиственных или хвойных пород деревьев использовались экспериментально измеренные спектральные альбедо (коэффициенты отражения) лиственных и хвойных пород [10,11].

Для оценки состояния растительного покрова используются информационные индексы (называемые индексами вегетации - см., например, [12-14]), которые используют значения коэффициентов отражения в разных диапазонах спектра. Наиболее распространенный индекс NDVI использует значения коэффициентов отражения в красном и ближнем ИК диапазонах спектра.

В качестве информационного индекса (хвойные или лиственные породы деревьев) в статье использовалось отношение $R(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{A(\lambda_2)}{A(\lambda_1)}$ коэффициентов отражения участков леса $A(\lambda_1), A(\lambda_2)$ на двух длинах волн λ_1, λ_2 .

Значение информационного индекса $R(\lambda_1, \lambda_2)$ показаны на рисунках 2-7 для разных длин волн зондирования (в разных окнах прозрачности атмосферы).

По вертикальной оси на рисунках 2-7 показаны значения информационного индекса $R(\lambda_1, \lambda_2)$ в летнее время года для ряда деревьев (для которых имеются данные в спектральных библиотеках [10,11]), а по горизонтальной оси – номер i спектра отражения. Номера 1-26 – лиственные деревья (различные образцы и виды тополя, ореха, клена, березы, дуба, бука)), номера 27-55 – хвойные деревья (разные образцы и виды сосны, ели, можжевельника, кедра, пихты).

Рис.2. Информационный индекс $R(0,85 \text{ мкм}, 0,532 \text{ мкм})$

Рис.3. Информационный индекс $R(0,85 \text{ мкм}, 0,355 \text{ мкм})$

Рис.4. Информационный индекс $R(1,54 \text{ мкм}, 0,85 \text{ мкм})$

Рис.5. Информационный индекс $R(0,532 \text{ мкм}, 0,355 \text{ мкм})$

Рис.6. Информационный индекс $R(1,54 \text{ мкм}, 0,532 \text{ мкм})$

Рис.7. Информационный индекс $R(1,54 \text{ мкм}, 0,355 \text{ мкм})$

Рисунки 2-7 показывают, что пары длин волн 0,85 и 0,532 мкм; 0,85 и 0,355 мкм; 0,532 и 0,355 мкм не позволяют проводить обнаружение участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев (информационные индексы лиственных и хвойных деревьев для этих пар длин волн имеют близкие значения).

Наиболее подходящими для задачи обнаружения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев являются пары длин волн 1,54 и 0,85 мкм; 1,54 и 0,532 мкм; 1,54 и 0,355 мкм. При этом, визуальный анализ диаграмм позволяет заметить, что наиболее эффективной для данной задачи является пара длин волн 1,54 и 0,532 мкм.

Для количественной оценки эффективности работы лазерного метода на длинах волн зондирования $\lambda_1 = 0,532 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 1,54 \text{ мкм}$ проводилось математическое моделирование. Было поведено вычисление вероятностей правильного обнаружения (правильного определения преобладающей породы деревьев) и ложных тревог (неправильного определения преобладающей породы деревьев).

Математическое моделирование проводилось по 10^5 реализаций шума измерения. Считалось, что шум распределен по нормальному закону (среднее значение шума полагалось равным нулю, относительное среднеквадратическое отклонение δ задавалось в диапазоне 1 – 5 %).

Решение о преобладании породы деревьев, принималось при условии:

- для лиственной породы величина информационного параметра больше или равна порогового значения (пороговое значение принималось равным 1,93);
- для хвойной породы величина информационного параметра меньше порогового значения.

Математическое моделирование проводилось для каждого из деревьев в базе данных и потом усреднялось по всей базе данных.

3. Результаты математического моделирования

Результаты математического моделирования вероятностей правильного обнаружения ($P_{по}$) и ложных тревог ($P_{лт}$) для пары длин волн зондирования $\lambda_1 = 0,532$ мкм, $\lambda_2 = 1,54$ мкм приведены в таблице 1.

Таблица 1. Вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для 0,532 мкм, $\lambda_2 = 1,54$ мкм

δ , %	$P_{по}$	$P_{лт}$
1	$>0,99$	0,04
3	0,99	0,05
5	0,98	0,06

Результаты математического моделирования показывают, что задача дистанционного определения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев может быть надежно решена (с вероятностью правильного обнаружения $\sim 0,99$ и вероятностью ложных тревог $\sim 0,4$) с помощью двухволнового лазерного метода, использующего длины волн 0,532 и 1,54 мкм.

Однако, длина волны 0,532 мкм является потенциально опасной для зрения. Поэтому, с точки зрения как задачи таксации лесов, так и безопасности для зрения лучше взять длины волн зондирования 0,355 и 1,54 мкм.

Отметим, что как длина волны 0,355 мкм, так и 1,54 мкм лежат в областях спектра безопасных для глаз. Излучение в УФ области 0,18 – 0,38 мкм и в ближнем ИК области более 1,4 мкм является более безопасным (оно воздействует на передние среды глаза), чем излучение в области 0,38-1,4 мкм (воздействующее на сетчатку глаза) [15,16].

Рис.8. Зависимость максимальной безопасной для глаз энергии импульса лазера от длины волны излучения

Зависимость максимальной безопасной для зрения энергии импульса лазера от длины волны излучения приведена на рисунке 8 [16] при параметрах, характерных для систем лазерного зондирования - длительности импульса 6 нс, частоте повторения 100 Гц. Рисунок 8 показывает преимущество диапазонов 0,18 – 0,38 мкм и свыше 1,4 мкм с точки зрения безопасности для зрения.

Результаты математического моделирования вероятностей правильного обнаружения ($P_{по}$) и ложных тревог ($P_{лт}$) для пары лин волн 0,355 и 1,54 мкм приведены в таблице 2 (пороговое значение принималось равным 4,21).

Таблица 2. Вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги для $\lambda_1 = 0,355$ мкм, $\lambda_2 = 1,54$ мкм

$\delta, \%$	$P_{по}$	$P_{лт}$
1	0.90	0.14
3	0.89	0.14
5	0.88	0.14

Результаты математического моделирования показывают, что задача дистанционного определения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев на безопасных для зрения длинах волн может быть удовлетворительно решена (с вероятностью правильного обнаружения $\sim 0,9$ и вероятностью ложных тревог $\sim 0,14$) с помощью двухволнового лазерного метода, использующего длины волн 0,355 и 1,54 мкм.

Заключение

Проведен сравнительный анализ и выбор наиболее эффективных длин волн зондирования для двухволнового лазерного метода определения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев. Показано, что наиболее эффективным вариантом, позволяющим проводить обнаружение с вероятностью правильного обнаружения $\sim 0,99$ и вероятностью ложных тревог $\sim 0,04$, являются длины волн 0,532 и 1,54 мкм. Однако, с точки зрения безопасности для зрения лучше выбрать длины волн 0,355 и 1,54 мкм, которые позволяют удовлетворительно решить задачу определения участков леса с преобладанием лиственных или хвойных пород деревьев с вероятностью правильного обнаружения $\sim 0,9$ и вероятностью ложных тревог $\sim 0,14$.

Список литературы

1. Гиперспектральные снимки: обзор сенсоров для БПЛА, систем обработки данных и приложений для сельского и лесного хозяйства Режим доступа: <http://geomatica.ru/clauses/giperspektralnye-snimki-obzor-sensorov-dlya-bpla-sistem-obrabotka-dannyh-i-prilozhenij-dlya-selskogo-i-lesnogo-hozyajstva> (дата обращения 02.03.2020).
2. Мониторинг лесов с помощью группировки спутников RapidEye. Режим доступа: <http://geomatica.ru/clauses/303/> (дата обращения 02.03.2020).

3. Технологии дистанционной оценки лесных ресурсов России: современные возможности и потенциал применения. Режим доступа: <https://docplayer.ru/58588071-Tehnologii-distancionnoy-ocenki-lesnyh-resursov-rossii-sovremennye-vozmozhnosti-i-potencial-primeneniya.html> (дата обращения: 02.03.2020).
4. White J.C., Coops N.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review // Canadian J. of Remote Sensing. 2016. Vol. 42. No. 5. Pp. 619–641. DOI: [10.1080/07038992.2016.1207484](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484)
5. Puliti S., Ørka H.O., Gobakken T., Næsset E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. No. 8. Pp. 9632–9654. DOI: [10.3390/rs70809632](https://doi.org/10.3390/rs70809632)
6. Getzin S., Nuske R.S., Wiegand K. Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. No. 8. Pp. 6988–7004. DOI: [10.3390/rs6086988](https://doi.org/10.3390/rs6086988)
7. Gini R., Passoni D., Pinto L., Sona G. 2014. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: a test in a park area of Northern Italy // Eur. J. of Remote Sensing. 2014. Vol. 47. No. 1. Pp. 251–269. DOI: [10.5721/EuJRS20144716](https://doi.org/10.5721/EuJRS20144716)
8. Hansen E.H., Ene L.T., Maurya E.W., Patočka Z., Mikita T., Gobakken T., Næsset E. Comparing empirical and semi-empirical approaches to forest biomass modelling in different biomes using airborne laser scanner data // Forests. 2017. Vol. 8. No. 5. P. 170. DOI: [10.3390/f8050170](https://doi.org/10.3390/f8050170)
9. Прозрачность земной атмосферы. Режим доступа: <http://www.bourabai.kz/physics/3115.html> (дата обращения 02.03.2020).
10. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R.A., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J. USGS digital spectral library splib06a // U.S. Geological Survey. Digital Data Series 231. 2007. Режим доступа: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ds231> (дата обращения 11.04.2020). DOI: [10.3133/ds231](https://doi.org/10.3133/ds231)
11. Meerdink S.K., Hook S.J., Abbott E.A., Roberts D.A. ECOSTRESS spectral library version 1.0 // Remote Sensing of Environment. 2019. Vol. 230. Article 111196. DOI: [10.1016/j.rse.2019.05.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.015)
12. Zygielbaum A.I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. No. 12. Article L12403. DOI: [10.1029/2009GL038906](https://doi.org/10.1029/2009GL038906)
13. Vina A., Gitelson A.A., Nguy-Robertson A.L., Peng Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops // Remote Sensing of Environment. 2011. Vol. 115. No. 12. Pp. 3468–3478. DOI: [10.1016/j.rse.2011.08.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.010)
14. Ahmad F. Spectral vegetation indices performance evaluated for Cholistan Desert // J. of Geography and Regional Planning. 2012. Vol. 5. No. 8. Pp. 165–172. DOI: [10.5897/JGRP11.098](https://doi.org/10.5897/JGRP11.098)
15. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий. Введ. 2015-01-01. М.: Стандартинформ, 2013. 19 с.

16. Mayor S.D., Spuler S.M., Morley B.M. Scanning eye-safe depolarization lidar at 1.54 microns and potential usefulness in bioaerosol plume detection // Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE). 2005. Vol. 5887. Pp. 137-148. DOI: [10.1117/12.620361](https://doi.org/10.1117/12.620361)

Two-wave Laser Method for Monitoring the Species Composition of Forest

V.A. Gorodnichev¹, M.L. Belov^{1,*},
M.M. Shvygina¹, D.S. Sitnikov¹

[*belov@bmstu.ru](mailto:belov@bmstu.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: laser method, reflection coefficient, forest monitoring

Today the monitoring of forests is one of the actual tasks of environmental control. The most important problems of monitoring of forest resources are mapping of forests, determining species and age composition of forests and analysis of sanitary condition of forests.

An effective method of monitoring the state of vegetation (including forests) is optical aerospace sensing. The methods of optical sensing of vegetation cover are currently passive, for the most part.

However, passive methods are available to use for daylight only. Therefore, laser methods which can be used in wide range of light and atmospheric conditions are of interest.

In this article there was carried out the comparative analysis and selection of the most effective sensing wavelengths in atmospheric transparency windows for two-waves laser method for determining forest areas with prevalence of coniferous or deciduous wood species.

As an information index (coniferous or deciduous wood species) in this article the ratio of reflection coefficients of parcels of forest at two wavelengths was used. Pairs of wavelengths 1,54μ and 0,532μ; 1,54μ and 0,355μ are the most relevant for detecting forest areas with prevalence of coniferous or deciduous wood species.

For quantitative assessment the efficiency of the laser method mathematical modeling was carried out. The results of mathematical modeling show that that the wavelengths of 0.532μm and 1.54μm are the most effective and provide scanning with probability of correct detecting ~ 0.99 and with false-alarm probability ~ 0.04.

However, in terms of eye safety it's better to choose wavelengths of 0.355μm and 1.54μm, because they allow to solve satisfactory the problem of determining forest areas with prevalence of coniferous or deciduous wood species with probability of correct detecting ~ 0.9 and with false-alarm probability ~ 0.14.

References

1. *Giperspektralnye snimki: obzor sensorov dlia BPLA, sistem obrabotki dannykh i prilozhenij dlia sel'skogo i lesnogo khoziajstva* [Hyperspectral images: review of sensor for pilotless aerial vehicle, data processing systems and software applications for agriculture and forestry]. Available at: <http://geomatica.ru/clauses/giperspektralnye-snimki-obzor-sensorov-dlya-bpla-sistem-obrabotka-dannyh-i-prilozhenij-dlya-selskogo-i-lesnogo-hozyajstva>, accessed 02.03.2020 (in Russian).
2. *Monitoring lesov s pomoshch'yu gruppirovki sputnikov RapidEye* [Forest monitoring by using package of the satellites RapidEye]. Available at: <http://geomatica.ru/clauses/303/>, accessed 02.03.2020 (in Russian).
3. *Tekhnologii distantsionnoj otsenki lesnykh resursov Rossii: sovremennye vozmozhnosti i potentsial primeneniia* [Remote estimate technology of Russia forest resource: advanced capability and potential]. Available at: <https://docplayer.ru/58588071-Tekhnologii-distancionnoy-ocenki-lesnyh-resursov-rossii-sovremennye-vozmozhnosti-i-potencial-primeneniya.html>, accessed 02.03.2020 (in Russian).
4. White J.C., Coops N.C., Wulder M.A., Vastaranta M., Hilker T., Tompalski P. Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: a review. *Canadian J. of Remote Sensing*, 2016, vol. 42, no. 5, pp. 619–641. DOI: [10.1080/07038992.2016.1207484](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484)
5. Puliti S., Ørka H.O., Gobakken T., Næsset E. Inventory of small forest areas using an unmanned aerial system. *Remote Sensing*, 2015, vol. 7, no. 8, pp. 9632–9654. DOI: [10.3390/rs70809632](https://doi.org/10.3390/rs70809632)
6. Getzin S., Nuske R.S., Wiegand K. Using unmanned aerial vehicles (UAV) to quantify spatial gap patterns in forests. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, no. 8, pp. 6988–7004. DOI: [10.3390/rs6086988](https://doi.org/10.3390/rs6086988)
7. Gini R., Passoni D., Pinto L., Sona G. 2014. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: a test in a park area of Northern Italy. *Eur. J. of Remote Sensing*, 2014, vol. 47, no. 1, pp. 251–269. DOI: [10.5721/EuJRS20144716](https://doi.org/10.5721/EuJRS20144716)
8. Hansen E.H., Ene L.T., Mauya E.W., Patočka Z., Mikita T., Gobakken T., Næsset E. Comparing empirical and semi-empirical approaches to forest biomass modelling in different biomes using airborne laser scanner data. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 5, p. 170. DOI: [10.3390/f8050170](https://doi.org/10.3390/f8050170)
9. *Prozrachnost' zemnoj atmosfery* [Earth atmospheric transmission]. Available at: <http://www.bourabai.kz/physics/3115.html>, accessed 02.03.2020 (in Russian).
10. Clark R.N., Swayze G.A., Wise R.A., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J. USGS digital spectral library splib06a. *U.S. Geological Survey. Digital Data Series 231*, 2007. Available at: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ds231>, accessed 11.04.2020. DOI: [10.3133/dsw231](https://doi.org/10.3133/dsw231)
11. Meerdink S.K., Hook S.J., Abbott E.A., Roberts D.A. ECOSTRESS spectral library version 1.0. *Remote Sensing of Environment*, 2019, vol. 230, article 111196. DOI: [10.1016/j.rse.2019.05.015](https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.015)

12. Zygielbaum A.I., Gitelson A.A., Arkebauer T.J., Rundquist D.C. Non-destructive detection of water stress and estimation of relative water content in maize. *Geophysical Research Letters*, 2009, vol. 36, no. 12, article L12403. DOI: [10.1029/2009GL038906](https://doi.org/10.1029/2009GL038906)
13. Vina A., Gitelson A.A., Nguy-Robertson A.L., Peng Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 2011, vol. 115, no. 12, pp. 3468-3478. DOI: [10.1016/j.rse.2011.08.010](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.010)
14. Ahmad F. Spectral vegetation indices performance evaluated for Cholistan Desert. *J. of Geography and Regional Planning*, 2012, vol. 5, no. 8, pp. 165-172. DOI: [10.5897/JGRP11.098](https://doi.org/10.5897/JGRP11.098)
15. GOST 31581-2012. *Lazernaia bezopasnost'*. *Obshchie trebovaniia bezopasnosti pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdelij* [All-Union State Standard 31581-2012. Laser safety. General safety requirements for development and operation of laser products]. Moscow: Standartinform Publ., 2013. 19 p. (in Russian).
16. Mayor S.D., Spuler S.M., Morley B.M. Scanning eye-safe depolarization lidar at 1.54 microns and potential usefulness in bioaerosol plume detection. *Proc. of the Soc. of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, 2005, vol. 5887, pp. 137-148. DOI: [10.1117/12.620361](https://doi.org/10.1117/12.620361)