

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

PARAMETRIC VEGETATION INDICES FOR PROCESSING REMOTE SENSING DATA

Ключевые слова: вегетационные индексы, дистанционное зондирование, спектрорадиометр, хлорофилл, нелинейность.

Относительно большое количество вегетационных индексов, вызванное высокой информативностью отражательной спектроскопии, вызвало как проблемы выбора наилучшего индекса из существующих, так и трудности реализации однозначных условий их определения в условиях большой неопределенности сигналов дистанционного зондирования растительного покрова. Проанализированы проблемы использования нормализованного дифференциального вегетационного индекса, связанные с зашумленностью и эффектом насыщения сигнала красной зоны. Рассмотрена возможность введения параметрических вегетационных индексов, реализующих предлагаемый принцип взаимосвязанного выбора длин волн при взятии отсчетов в отражательном спектре для вычисления вегетационных индексов, пригодных для исследования роста растений на ранних фазах вегетационного цикла растительности. Реализация данного принципа осуществляется путем взятия взаимосвязанных отсчетов в красной зоне и в близкой инфракрасной зоне отражательного спектра растительных полей. Предложен новый вегетационный индекс, названный взаимосвязанным нормализованным дифференциальным вегетационным индексом, обладающий значительно низкой нелинейностью в определенном начальном диапазоне концентрации хлорофилла в растениях. Этот индекс может быть использован для кон-

троля развития растений в начальных вегетационных периодах общего цикла роста растений.

Keywords: vegetation indices, remote sensing, spectroradiometer, chlorophyll, nonlinearity.

A relatively large number of vegetation indices due to high information capacity of reflection spectroscopy caused the problems related with both with the selection of the best ones from the existing indices, and the difficulties of the realization of similar conditions for their determination under the condition of significant uncertainty of the signals of remote sensing of vegetation cover. This paper analyzes the problems of the use of normalized vegetation indices linked with high noises and signal saturation effect of red zone. The possibility of developing new parametric vegetation indices realizing the proposed principle of interrelated selection of wavelengths upon sampling in reflection spectrum for calculating vegetation indices applicable for the research of plant growth at the early phases of vegetation cycle is studied. The realization of this principle is carried out by interrelated measurements in red and near infrared zones of reflection spectrums derived from vegetation fields. A new vegetation index referred to as an interrelated normalized differential index featuring significantly low non-linearity in the beginning and middle parts of chlorophyll concentration changing interval is proposed. The new index may be applied to monitor plant growth at the beginning periods of general vegetation cycle.

Керимов Руслан Мехман оглы, аспирант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Абдулов Рауф Нусрат оглы, к.т.н., зам. гл. инженера, НИИ Министерства оборонной промышленности Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Агаев Фахраддин Гюльали оглы, д.т.н., проф., директор, Институт космических исследований природных ресурсов, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Kerimov Ruslan Mehman oglu, post-graduate student, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Abdulov Rauf Nusrat oglu, Cand. Tech. Sci., Deputy Head Engineer, Research Institute of Defence Industry of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Agayev Fahraddin Gulali oglu, Dr. Tech. Sci., Prof., Director, Institute of Space Research of Natural Resources, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Введение

Хорошо известно, что в листьях растений содержится хлорофилл «а» и хлорофилл «b», которые являются важными пигментами, превращающими световую энергию в потенциальную химическую энергию. Количество хлорофилла в растениях определяет их фотосинтетический потенциал, что тесно связано с таким явлением, как стресс рас-

тения и во многом определяет питательные свойства вегетации [1, 2].

Традиционно, в целях определения содержания хлорофилла в растениях методами абсорбционной спектрометрии используются двухволновые спектральные измерители, работающие на длинах волн 660 и 940 нм [3].

В технике дистанционного зондирования для этих целей широко используются методы отражательной спектроскопии [4-6]. Большая информативность отражательной спектроскопии обусловила наличие большого количества вегетационных индексов, что в свою очередь вызвало проблемы как выбора наилучшего индекса из существующих, так и трудности реализации однозначных условий их определения в условиях большой неопределенности сигналов дистанционного зондирования растительного покрова.

Проанализируем проблемы использования широко распространенных нормализованных дифференциальных вегетационных индексов, связанные с зашумленностью и эффектом насыщения сигнала красной зоны, и рассмотрим возможность введения параметрических вегетационных индексов, реализующих предлагаемый принцип взаимосвязанного выбора длин волн при взятии отсчетов в отражательном спектре для вычисления вегетационных индексов, пригодных для исследования роста растений на ранних фазах вегетационного цикла растительности.

Задачами исследований являются:

1) анализ влияния зашумленности и насыщения сигналов отражательной спектроскопии на корректность реализации процедуры вычисления вегетационных индексов;

2) формирование принципа параметрической взаимосвязи длин волн, используемых для взятия отсчетов в зонах RED и NIR;

3) анализ возможности введения и использования параметрических нормализованных дифференциальных вегетационных индексов с использованием известных принципов многокритериальной оптимизации для взаимосвязанного выбора длин волн отсчетов в RED и NIR диапазонах;

4) формирование нового вегетационного индекса – взаимосвязанного нормализованного дифференциального вегетационного индекса, обладающего лучшей линейностью по сравнению с известным индексом NDVI на начальных фазах вегетационного цикла растений.

Методы решения задач

Прежде всего рассмотрим существующую практику учета влияния шумов при вычислении вегетационных индексов. В идеальном случае вегетационный индекс должен быть чувствительным к какому-либо физическому параметру (например, LAI, PAR или концентрация хлорофилла в листь-

ях) и не проявлять свойства насыщения при росте этих параметров. Очевидно, что вегетационный индекс должен быть нечувствительным к таким шумовым факторам, как влияние почвы, атмосферы, структуры кроны растения, взаиморасположения солнца – растения – измерителя, а также топографии местности. Указанные факторы можно разделить на две группы: 1) учитываемые факторы (почва, атмосфера, взаиморасположения солнца, растительности и измерителя, топография местности); 2) не учитываемые или трудноучитываемые факторы (структура кроны растений, индивидуальные особенности растений, взаимовлияние растений и т.д.). Для учета влияния шумов в работах [7-9] были предложены такие показатели, как относительный эквивалентный шум [7], эквивалентный шум растительности [8], функция чувствительности [9], требующие полевые и лабораторные измерения биофизических показателей растительности. Для учета топографических и геостатических особенностей развития растительности были развиты такие методы вычисления сигнал/шум, как метод однородного участка, геостатический метод и т.д. [10].

Вместе с тем такие трудноучитываемые факторы, как структура кроны, взаимовлияние растений и т.д. в принципе оказывают непосредственное воздействие на развитие самого растения, т.е. приводят к вариациям полезного сигнала, получаемого от растения методом отражательной спектроскопии. Указанное обстоятельство показывает, что шумовой фактор воздействует как аддитивно, так и мультипликативно, т.е. отраженный сигнал, полученный с помощью спектрометра должен быть представлен как

$$I_{\text{опр}}(\lambda) = \alpha_1(\lambda) \cdot I_p(\lambda) + \alpha_2(\lambda), \quad (1)$$

где $I_{\text{опр}}(\lambda)$ – идеальный сигнал без шумов на выходе спектрометра;

$\alpha_1(\lambda)$ – мультипликативный шумовой коэффициент;

$I_p(\lambda)$ – отражательный сигнал растения;

$\alpha_2(\lambda)$ – аддитивная шумовая составляющая.

Кроме вышесказанного, хорошо известен эффект насыщения отраженного сигнала растений в красной зоне, что еще более увеличивает информационную неопределенность красной зоны. Все вышеуказанное вносит существенную неопределенность в вопрос выбора длин волн для получения отсчетов в RED и NIR зонах.

Согласно работе [11], в спектрорадиометре AVHRR для исключения неопределенностей, вызванных неудобствами красной зоны, сигнал этой зоны был заменен на сигнал зеленой зоны. Возникающая проблема идентичности показаний MODIS и AVHRR в работе решалась путем замены в MODIS сигнала красной зоны на сверточный сигнал, составленный из взвешенной комбинации красной и зеленой зон. Даже в этом случае относительно полного совпадения показаний этих двух спектрорадиометров достигнуто не было. Выходом из положения в данном случае, как нам представляется, являются:

1) отказ от практики невзаимосвязанного выбора длин волн проводимых измерений в зонах RED и NIR;

2) выработка параметрического критерия взаимосвязанности выбираемых длин волн в зонах RED и NIR.

Предлагаемый принцип взаимосвязанного выбора длин волн, проводимых измерений в зонах RED и NIR заключается в следующем:

1. Составляется скалярная величина

$$S_1 = \alpha_1 \cdot R_{NIR}(Chl) + \alpha_2 R_{RED}(Chl), \quad (2)$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$;

R_{NIR} , R_{RED} – отраженные сигналы, соответственно, в ближней инфракрасной и красной зонах.

При заданной величине α_1 , при известной величине концентрации Chl, равной Chl, выбор λ_{RED} выбирается так, чтобы при значении концентрации хлорофилла 2Chl выражение (2) достиг бы своего минимума. Взамен традиционной формуле NDVI, имеющей вид

$$NDVI_{mpod} = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (3)$$

предлагается модифицированный нормализованный дифференциальный индекс

$$NDVI_{mod} = \frac{NIR - RED^*}{\alpha_1 NIR + \alpha_2 RED^*}, \quad (4)$$

где RED^* – отсчет на той длине волны λ_{RED} в красной зоне, которая связана с длиной волны λ_{NIR} согласно вышеизложенному принципу.

Как видно из предлагаемой формулы модифицированного нормализованного дифференциального индекса (4), знаменателем этой формулы является выражение (2), следовательно, при увеличении концентрации Chl величина $NDVI_{mod}$ будет стремиться к максимуму. Это свойство $NDVI_{mod}$ позволяет несколько уменьшить свойство

насыщения NDVI при высоких значениях концентрации хлорофилла. Приведем результаты проведенного модельного исследования, подтверждающие увеличение линейности функциональной зависимости дифференциального вегетационного индекса в некотором диапазоне изменения концентрации Chl.

Модельные исследования

В качестве основы для проводимых модельных исследований приняты экспериментальные данные, полученные при дистанционном зондировании кукурузных полей [11].

В таблице приведены использованные исходные и вычисленные данные: отсчеты отраженной спектроскопии на длинах волн $\lambda_{NIR}=780$ нм; $\lambda_{RED}=550$ нм; вычисленные значения S_1 по выражению (1) при $\alpha_1=0,7$; $\alpha_2=0,3$.

Chl(мг/м ²)	$\lambda_{NIR}=780$ нм	$\lambda_{RED}=550$ нм	S_1
100	45,9	26	39,93
200	46,8	18	38,16
300	47,7	12	36,99
400	48,6	8	36,42
500	49,5	6,5	37,50

На рисунке приведены вычисленные графики известного нормализованного дифференциального вегетационного индекса (3) и предлагаемого вегетационного индекса (4).

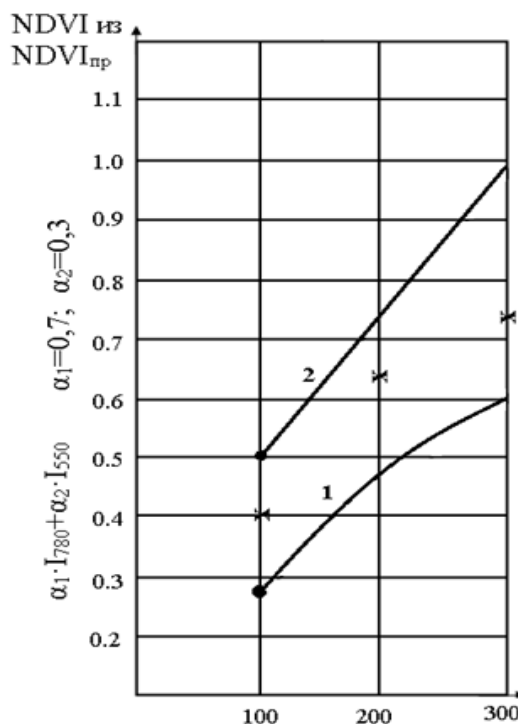


Рис. Графики известного индекса NDVI (кривая 1) и предлагаемого индекса $INDVI$ (кривая 2)

Вычисленные значения нелинейности графиков составили, соответственно, 9,5 и 6,1%. Такое значительное уменьшение нелинейности индекса (4) по сравнению с индексом (3) за счет взаимосвязанного выбора λ_{NIR} и λ_{RED} позволяет нам рекомендовать индекс (4), названный нами взаимосвязанным нормализованным дифференциальным вегетационным индексом (INDVI) для использования взамен NDVI.

Обсуждения и выводы

Таким образом, предлагаемый принцип взаимосвязанного выбора длин волн отсчетов в красной и близкой инфракрасной зонах отражательного спектра растительных полей, а также предложенный на основе этого принципа новый нормализованный дифференциальный вегетационный индекс позволяют существенно уменьшить нелинейность известного индекса NDVI, вызванного насыщением сигнала красной зоны при высоких концентрациях хлорофилла.

Сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Предложен принцип взаимосвязанного выбора длин волн λ_{NIR} , λ_{RED} для взятия отсчетов в красной зоне и в близкой инфракрасной зоне отражательного спектра растительных полей. При этом взаимосвязь этих длин волн определяется тем, что взвешенная свертка отсчетов, полученных на этих длинах волн при концентрации хлорофилла растения, равной двухкратной величине измеряемых величин концентрации хлорофилла, должна проходить через максимум.

2. Предложен новый вегетационный индекс, названный взаимосвязанным нормализованным дифференциальным вегетационным индексом, обладающий значительно низкой нелинейностью в определенном начальном диапазоне концентрации хлорофилла в растениях. Этот индекс может быть использован для контроля развития растений в начальных вегетационных периодах общего цикла роста растений.

Библиографический список

1. Curran P.J., Durgan J.L., Gholz H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine // *Tree Physiol.* – 1990. – Vol. 7. – P. 33-48.
2. Moran J.A. Mitchell A.K. Goodmanson G., Stockburger K.A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiol.* – 2000. – Vol. 20. – P. 1113-1120.

3. Markwell J., Osterman J.C., Mitchell J.L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter // *Photosynth. Res.* – 1995. – Vol. 46 (3). – P. 467-472.

4. Adams M.L., Philpot W.D., Norvell W.A. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation // *Int. J. Remote Sens.* – 1999. – Vol. 20 (18). – P. 3663-3675.

5. Hatfield, J.L.; Gitelson, Anatoly A.; Schepers, James S.; and Walthall, C.L., "Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions" (2008). *Papers in Natural Resources*. Paper 257. <http://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/257>. [Дата обращения 01.06.2016].

6. Le Maire G., Francois C., Dufrene E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements // *Remote Sensing of Environment.* – 2004. – Vol. 89. – P. 1-28.

7. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // *Remote Sensing of Environment.* – 1991. – Vol. 35 (2-3). – P. 161-173.

8. Huete A.R., Post D.F., Jackson R.D. Soil spectral effect on 4-space vegetation discrimination // *Remote Sensing of Environment.* – 1984. – Vol. 15. – P. 155-165.

9. Ji L., Peters A.J. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function // *Remote Sensing of Environment.* – 2007. – Vol. 106 (1). – P. 59-65.

10. Lei J., Zhang L., Rover J., Wylie B.K., Chen X. Geostatistical estimation of signal-to-noise ratios for spectral vegetation indices // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* – 2014. – Vol. 96. – P. 20-27.

11. Gitelson A.A., Kaufman Y.J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series spectral considerations // *Remote Sensing of Environment.* – 1998. – Vol. 66 (3). – P. 343-350.

References

1. Curran P.J., Durgan J.L., Gholz H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine // *Tree Physiol.* – 1990. – Vol. 7. – P. 33-48.
2. Moran J.A. Mitchell A.K. Goodmanson G., Stockburger K.A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiol.* – 2000. – Vol. 20. – P. 1113-1120.

tance: a comparison of methods // *Tree Physiol.* – 2000. – Vol. 20. – P. 1113-1120.

3. Markwell J., Osterman J.C., Mitchell J.L. Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter // *Photosynth. Res.* – 1995. – Vol. 46 (3). – P. 467-472.

4. Adams M.L., Philpot W.D., Norvell W.A. Yellowness index: an application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation // *Int. J. Remote Sens.* – 1999. – Vol. 20 (18). – P. 3663-3675.

5. Hatfield, J.L.; Gitelson, Anatoly A.; Schepers, James S.; and Walthall, C.L., "Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions" (2008). *Papers in Natural Resources*. Paper 257. <http://digitalcommons.unl.edu/natrespapers/257>. [Дата обращения 01.06.2016].

6. Le Maire G., Francois C., Dufrene E. Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements // *Remote Sensing of Environment.* – 2004. – Vol. 89. – P. 1-28.

7. Baret F., Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment // *Remote Sensing of Environment.* – 1991. – Vol. 35 (2-3). – P. 161-173.

8. Huete A.R., Post D.F., Jackson R.D. Soil spectral effect on 4-space vegetation discrimination // *Remote Sensing of Environment.* – 1984. – Vol. 15. – P. 155-165.

9. Ji L., Peters A.J. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function // *Remote Sensing of Environment.* – 2007. – Vol. 106 (1). – P. 59-65.

10. Lei J., Zhang L., Rover J., Wylie B.K., Chen X. Geostatistical estimation of signal-to-noise ratios for spectral vegetation indices // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing.* – 2014. – Vol. 96. – P. 20-27.

11. Gitelson A.A., Kaufman Y.J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series spectral considerations // *Remote Sensing of Environment.* – 1998. – Vol. 66 (3). – P. 343-350.

