Параметрический метод определения межсвязей между различными вегетационными индексами

Parametric method for determining the interconnections between different vegetation indices

Асадов / Asadov H.
Хикмет Гамид оглы
(asadzade@rambler.ru)
доктор технических наук, профессор, иностранный член Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова.
Национальное аэрокосмическое агентство, начальник отдела НИИ Аэрокосмической информатики.
г. Баку, Азербайджанская Республика

Сулейманова / Suleymanova Y.
Егана Джалал гызы
(Suleymanovayegane64@gmail.com)
кандидат технических наук.
ОКБ Космического приборостроения Национального аэрокосмического агентства,
заместитель директора.
г. Баку, Азербайджанская Республика

Ключевые слова: вегетационный индекс – vegetation index; параметрическая связь – parametric coupling; оптимизация – optimization; спектрорадиометр – spectroradiometer; регрессионные уравнения – regression equations.

Разработан метод определения межсвязей между различными вегетационными индексами, связанными регрессионными уравнениями с каким-либо параметром в виде алгебраического степенного многочлена. Показано, что может быть установлена некоторая связь между указанными индексами, а среднеинтегральное значение параметра достигнет максимума при отсутствии функциональной связи между этими индексами. В обратной постановке задачи проанализирован вопрос о взаимосвязи нормализованных разностных вегетационных индексов с относительными вегетационными индексами, рассматриваемыми в виде параметра.

The article describes the developed method for determining the interconnections between different vegetation indices in the direct and inverse formulations of the problem. A generalized presentation of the parametric method is proposed in the direct formulation of the problem of determining the relationships between various spectral vegetation indices, as well as a practical application. It is shown that if there is a certain pair of vegetation indices connected by regression equations with any parameter in the form of an algebraic power polynomial, then some connection can be established between these indices, and the common parameter for these two vegetation indices will reach the maximum of its average integral value in the absence of any functional relationship between these indices. In the inverse formulation of the problem, the question of the relationship of normalized difference vegetation indices with relative vegetation indices considered as a parameter is analyzed.

В настоящее время количество вегетационных индексов перевалило за нескольких сотен и продолжает расти. Вместе с тем при каждом космическом эксперименте используется некоторый базовый комплект спектральных индексов.

Так, например, информация о состоянии растительности принимается от группы спутников Sentinel 2 в виде набора из восьми спектральных индексов, так или иначе характеризующих состояние растительности.

В табл. 1. приведены определения этих индексов, вычисляемых на базе данных каналов 2, 3, 4, 8, 9, 11 Sentinel 2.

Как видно из сведений, приведенных в табл.1, в основном метод вычисления вегетационных индексов заключается в проведении замеров сигналов различных спектральных каналов спектрорадиометров и проведении соответствующих вычислений по заданной формуле индекса.

Вместе с тем часто исследователей интересует не только значение какого-либо спектрального индекса, но и его связь с другими спектральными индексами схожего назначения. Такая потребность, например, может возникнуть при исследовании одного и того же физического объекта или процесса с помощью различных бортовых спектрорадиометров, обладающих неидентичными каналами в смысле длин волн проводимых измерений.

В этих случаях проведение межспутниковой валидации и калибрации сталкивается с большими трудностями из-за возможного суммирования погрешностей измерения соответствующих каналов измерений сравниваемых спектрорадиометров. Одним из возможных решений данного вопроса в рассматриваемом случае является использование в этих целях промежуточного параметра, функционально связанного с исследуемыми спектральными индексами. При наличии такого параметра оказывается возможным установление параметрической связи между исследуемыми вегетационными индексами. Следует отметить, что при наличии такого общего

параметра для некоторой группы вегетационных индексов появляются дополнительные возможности установления отдельных неявных связей между некоторыми вегетационными индексами и выбранным общим параметром.

Далее излагается предлагаемый параметрический метод исследования взаимосвязи между различными вегетационными индексами в прямой и обратной постановках задачи.

Предлагаемый метод

Прямая постановка задачи

Допустим, что нам известно множество

$$V = V(i);\ i = 1, n \tag{1}$$

где $V(i)$ – спектральный вегетационный индекс. При этом функциональные назначения индексов $V(i)$ различно. и они формируются с использованием различных спектральных каналов одного или нескольких спектрорадиометров.

Также допустим, что нам известен промежуточный параметр t, спектрального и/или статистического происхождения. Далее, нам известны линейные или нелинейные регрессионные уравнения, связывающие t и $V(i)$

$$\left.\begin{array}{l} t = f_1(V_1) \\ t = f_2(V_2) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots \\ t = f_n(V_n) \end{array}\right\} \tag{2}$$

С учетом вышеприведенных данных можно решить нижеуказанные задачи:

1. Определение непосредственной статистической связи между индексами V_i и V_j.
2. Определение связи вегетационного индекса V_i через сумму индексов V_j; $i \neq j$
3. Определение неявного вида регрессионной связи V_i и параметра t при наличии явных регрессионных зависимостей между t и $V_i (j \neq i)$.

Таблица 1

Формулы вычисления вегетационных индексов на базе данных Sentinel 2

Индекс	Формула	Источник
Атмосферно-устойчивый вегетационный индекс	$ARVI = \frac{(NIR) - (2 \times \mathrm{Re}\, d) + (Blue)}{(NIR) + (2 \times \mathrm{Re}\, d) + (Blue)}$	[1]
Индекс незаросшей почвы	$BSI = \frac{(\mathrm{Re}\, d + SWIR) - (NIR + Blue)}{(\mathrm{Re}\, d + SWIR) + (NIR + bBlue)}$	[2]
Индекс зеленого хлорофилла	$GCI = \frac{(NIR)}{(Green)} - 1$	[3]
Зеленый нормализованный разностный вегетационный индекс	$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$	[4]
Модифицированный почвенный отрегулированный вегетационный индекс 2	$MSAVI2 = \frac{2 \times NIR + 1\sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8(NIR - \mathrm{R}\, ED)}}{2}$	[5]
Индекс водного стресса	$MSI = \frac{(MidIR)}{(NIR)}$	[7]
Нормализованный разностный водный индекс	$NDMI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$	[6]
Нормализованный разностный вегетационный индекс	$NDVI = \frac{(NIR - \mathrm{Re}\, d)}{(NIR + \mathrm{Re}\, d)}$	[8]

Решение первого из вышеперечисленных вопросов получается относительно легко, так как для любой пары регрессионных уравнений.

$$\left.\begin{aligned} t &= f_i(V_i) \\ t &= f_j(V_j) \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

получим

$$V_i = f_i^{-1}(t) \quad (4)$$

и далее

$$V_i = f_i^{-1}(V_j(f_j)) \quad (5)$$

Таким образом, выражение (5) при наличии функций f_i и f_j позволяет установить связь между индексами V_i и V_j.

Рассмотрим решение второго вопроса исследования. Из (2) имеем

$$k \times t = \sum_{i=1}^{k} f_i(V_i) \quad (6)$$

Из (6) получаем

$$t = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} f_i(V_i) \quad (7)$$

С учетом (3) и (7) получим

$$f_i(V_i) = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} f_i(V_i) \quad (8)$$

Из (8) окончательно находим

$$f_i(V_i)(1-\frac{1}{k}) = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} f_j(V_j) \quad (9)$$

или

$$f_i(V_i) = \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq 1}}^{k} f_j(V_j)}{k-1} \quad (10)$$

Что касается решения третьей задачи, то с учетом (4) и (7) получаем:

$$V_i = f_i^{-1}(\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} f_i(V_i)) \quad (11)$$

Если неизвестно уравнение $f_j(V_j)$, для вычисления этой функции (11) представим в виде

$$V_i = f_i^{-1}(\frac{1}{k}\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{k} f_i(V_i) + \frac{1}{k} f_j(V_j)). \quad (12)$$

Из (12) при линейной функции получим

$$V_i = f_i^{-1}(\frac{1}{k}\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq j}}^{k} f_i(V_i)) + f_i^{-1}(\frac{1}{k} f_j(V_j)) \quad (13)$$

Таким образом, система уравнений f_i^{-1} (13) позволяет вычислить функцию $f_j(V_j)$, если известны $f_i^{-1}, k, f_j(V_j), i \neq j$.

Система уравнений (13) может быть применена для вычисления постоянных коэффициентов функции $f_j(V_j)$ если эта функция предположительно задана в виде алгебраического многочлена.

Для проведения модельного исследования воспользуемся результатами работы [7], где приведены регрессионные уравнения, связывающие показанные в таблице 1 вегетационные индексы с некоторым параметром *y*, определенным в качестве показателя «горячих точек», образованных из-за чрезмерного выпаса скота. Как отмечено в [9], метод анализа таких горячих точек позволяет рассчитать статистический показатель Getis-Ord Gi. Полученный результат показывает, в какой области пространства кластеризуются обьекты с высокими и низкими значениями этого показателя. Чтобы объект был сочтен в качестве статистически существенной горячей точки, этот объект должен иметь высокое значение этого показателя и быть окружен другими объектами, обладающими указанными свойствами.

Локальная сумма для объекта и его соседей сравнивается пропорционально с сумме всех объектов. Когда локальная сумма очень отличается от ожидаемой локальной суммы, и это отличие является слишком большим, чтобы быть результатом случайного процесса, получается статистически значимая *z*-оценка.

Конкретные виды регрессионных уравнений между параметром *y* и рассматриваемыми вегетационными индексами приведены в табл. 2 [7] .

Как показано на табл. 2. между *NDVI* и параметром *y* существует следующее регрессионное уравнение

$$y = -247.39NDVI^2 + 197.60NDVI - 11.920 \quad (14)$$

Между индексом *NDMI* и *y* существует регрессионное уравнение

$$y = -116.86NDMI - 25.755 \quad (15)$$

Очевидно что на базе уравнений (13) и (14) можно составить квадратное уравнение и вычислить зависимость между *NDVI* и *NDMI*. В общем случае может быть рассмотрена следующая задача: при наличии какой связи между *NDVI* и *NDMI*. общий параметр мог бы иметь экстремальную величину.

Для решения данного вопроса в общем виде введем на рассмотрение функцию

$$NDVI = \psi(NDMI) \tag{16}$$

и с учетом (13) и (15) сформируем следующий целевой функционал

$$y_{cp} = \frac{1}{\Delta NDMI}\int_{NDMI_{\min}}^{NDMI_{\max}} [-a_1\psi^2 + a_2\psi - a_3]dNDMI \tag{17}$$

где $\Delta NDMI = NDMI_{\max} - NDMI_{\min}$,
$a_1 = 247.39; a_2 = 197.60; a_3 = 11.926$

Для нахождения оптимальной функции вычислим производную подынтегральной функции в (16) относительно ψ и приравним результат нулю.

Имеем

$$2a_1\psi = a_2 \tag{18}$$

Или

$$\psi = \frac{a_2}{2a_1} \tag{19}$$

Таким образом при (18), т.е при постоянной величине введенной функции связи между *NDVI* и *NDMI,* ?параметр y_{cp} достигнет максимума. Следовательно, среднеинтегральная величина общего параметра достигает максимума при отсутствии какой либо функциональной связи между рассматриваемыми вегетационными индексами.

Обратная постановка задачи

В обратной постановке задачи определения параметрической взаимосвязи вегетационных индексов с некоторым параметром ставится и решается следующая задача: известны нормализованные вегетационные индексы VI_1 и VI_2, следует найти некоторый параметр в виде относительного вегетационного индекса наличие которого позволило бы установить однозначную связь между указанными нормализованными индексами.

Допустим, что существует множество длин волн $\lambda = \{\lambda_i\}$, где $\Delta\lambda = \lambda_i - \lambda_{i-1}$; $\Delta\lambda = \text{const}$. При этом имеются множество измеренных значений отражательного спектра

$$I = \{I(\lambda_i)\} \tag{20}$$

Нормализованный разностный индекс определим как

$$\gamma_{i,j} = \frac{I(\lambda_i) - I(\lambda_j)}{I(\lambda_i) + I(\lambda_j)}; i \neq j \tag{21}$$

Проведя некоторые преобразования, из (21) получим

$$\frac{I(\lambda_i)}{I(\lambda_j)} = \frac{(1+\gamma_{i,j})}{(1-\gamma_{i,j})} \tag{22}$$

или

$$I(\lambda_i) = \frac{I(\lambda_i)\cdot(1+\gamma_{i,j})}{(1-\gamma_{i,j})} \tag{23}$$

Подобно (22), для любого k, где $k \neq j; k \neq i; k = \overline{1,n}$ напишем

Таблица 2

Регрессионные уравнения связывающие параметр и рассматриваемые вегетационные индексы

Название индекса	Регрессионное уравнение
ARVI	$y = 7927.8x^2 + 1111.7x + 38.489$
BSI	$y = 0.0023x - 19.783$
GCI	$y = 35.355x + 7.9429$
GNDVI	$y = -421.94x^2 + 271.15x - 40.285$
MSVA2	$y = -168.49x^2 + 148.89x - 12.450$
MCI	$y = 34.972x - 54.806$
NDMI	$y = -116.86x - 25.755$
NDVI	$y = -247.39x^2 + 197.60x - 11.920$

$$I(\lambda_i) = \frac{I(\lambda_k)\cdot(1+\gamma_{i,k})}{(1-\gamma_{i,k})} \quad (24)$$

Из (22) и (23) получим

$$\beta = \frac{I(\lambda_j)}{I(\lambda_k)} = \frac{(1-\gamma_{i,k})(1-\gamma_{i,j})}{(1-\gamma_{i,k})(1+\gamma_{i,j})} \quad (25)$$

Где $\beta = \beta(\lambda_j, \lambda_k)$ может быть представлен в виде относительного вегетационного индекса или параметра. Примем, что $k = j+1$. В этом случае (25) перепишем как

$$\frac{I(\lambda_j)}{I(\lambda_{j+1})} = \frac{(1+\gamma_{i,j+1})(1-\gamma_{i,j})}{(1-\gamma_{i,j+1})(1+\gamma_{i,j})} \quad (26)$$

Суммируя (25) по всем $j = \overline{1,n}$, получим

$$\sum_{j=1}^{n} \frac{I(\lambda_j)}{I(\lambda_{j+1})} = \sum_{j=1}^{n} \frac{(1+\gamma_{i,j+1})(1-\gamma_{i,j})}{(1-\gamma_{i,j+1})(1+\gamma_{i,j})} \quad (27)$$

Приведем пример использования (25). Примем $\gamma_{1j} = NDWI$ где

$$NDWI = \frac{G-NIR}{G+NIR} \quad (28)$$

также $\gamma_{1,k} = NDCI$, где

$$NDCI = \frac{G-R}{G+R} \quad (29)$$

В этом случае

$$\beta = \frac{I(NIR)}{I(R)} \quad (30)$$

Таким образом, зная значения *NDWI* и *NDCI*, можно сразу вычислить величину параметра β. В табл. 3 приведены некоторые пары нормализованных вегетационных индексов, зная которые можно вычислить соответствующий параметр β, представляющий собой относительный вегетационный индекс.

Заключение

Предложен параметрический метод определения связей между различными спектральными вегетационными индексами в двух постановках задачи исследования. В первой постановке показано, что если существует определенная пара вегетационных индексов, связанных регрессионными уравнениями с каким-либо параметром, то может быть установлена некоторая связь между указанными индексами, а общий параметр для двух вегетационных индексов достигнет максимума своей усредненной величины при отсутствии какой-либо функциональной связи между этими индексами. По второй постановке задачи проанализирован вопрос о взаимосвязи нормализованных разностных вегетационных индексов с относительными вегетационными индексами.

Показано, что если известны два нормализованные разностные индекса и первые члены этих индексов совпадают, то отношение вторых членов этих нормализованных индексов в качестве параметра может быть вычислено по предлагаемой формуле, с использованием для этого значения рассматриваемых нормализованных индексов.

Литература

1. Kaufman, Y. J. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS / Y.J. Kaufman, D. Tanre // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1992. – Vol. 30, No. 2. – P. 261–270.

2. Rikimaru, A. Development of Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model Using Indices of Vegetation, Bare soil and Shadow / A. Rikimaru // Proceedings of the XVIII ACRS, Kuala Lumpur, Malaysia, 20–24 October, 1997.

3. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops / A.A. Gitelson, A. Vina, V. Ciganda [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2005. – Vol. 32. – P. L08403.

Таблица 3

Пары нормализованных вегетационных индексов и соответствующий параметр

γ_1	γ_2	β
NDWI	*NDCI*	$I(NIR)/I(R)$
ARVI	*NDI*	$I(RB)/I(MIR)$
NDVI	$PSND_c$	R_{680}/R_{470}
NDII	*NDI*	*SWIR / MIR*

4. Gitelson, A. A. Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700nm / A.A. Gitelson, M.N. Merzlyak, H.K. Lichtenthaler // Journal of Plant Physiology. – 1996. – Vol. 148. – P. 501–508.

5. A modified soil adjusted vegetation index / J. Qi, A. Chehbouni, A.R. Huete // Remote Sensing of Environment. – 1994. – Vol. 48, Iss. 2. – P. 119–126.

6. Gao, B.-C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B.-C. Gao // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – P. 257–266.

7. Harmse, C. J. Evaluating Several Vegetation Indices Derived from Sentinel-2 Imagery for Quantifying Localized Overgrazing in a Semi-Arid Region of South Africa / C.J. Harmse, H. Gerber, A.van Niekerk / Remote Sensing. – 2022. – Vol. 14. – P. 1720.

8. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C.J. Tucker // Remote Sensing of Environment. – 1979. – Vol. 8. – P. 127–150.

9. Как работает инструмент Анализ горячих точек / ArcGIS-pro. – URL: https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-statistics/h-how-hot-spot-analysis-getis-ord-gi-spatial-stati.htm (дата обращения: 25.08.2022).