



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 11 • № 1 • 2015 С. 56 – 60

УДК 504.064 : 535.361.2 : 519.6

Оцінювання стану рослинності на основі Фур'є-аналізу даних дистанційного спостереження

О.В. Семенів

Інститут космічних досліджень НАН України та Державного космічного агентства України

В роботі розглядається підхід до оцінювання стану рослинності на основі метода Фур'є-перетворення спектрів відбивання листя рослин та застосування кореляційного та регресійного аналізу. Досліджено взаємозв'язок між значеннями коефіцієнтів спектральної густини та сумарної концентрації хлорофілу в листі рослин. Представлено результати чисельного моделювання та порівняльного аналізу з експериментальними даними.

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ, Семенов О.В. — В работе рассмотрен подход к оцениванию состояния растительности на основе метода Фурье-преобразования спектров отражения листьев растений и применения корреляционного и регрессионного анализа. Исследована взаимосвязь между значениями коэффициентов спектральной плотности и суммарной концентрацией хлорофилла в листьях растений. Представлено результаты численного моделирования и сравнительного анализа с экспериментальными данными.

VEGETATION STATE ESTIMATION BASED ON THE FOURIER ANALYSIS OF REMOTE SENSING DATA, by Semeniv O.V. — An approach to vegetation state estimation based on the Fourier transform of the leaves' reflection spectra, correlation and regression analysis is presented. The interrelation between the coefficients of the spectral density and the total concentration of chlorophyll in the leaves is investigated. The results of numerical modeling and comparative analysis of the experimental data are shown.

Ключевые слова: ДЗЗ; преобразование Фурье; корреляционный анализ; регрессионный анализ; состояние растительности.

Key words: remote sensing; Fourier transform; correlation analysis; regression analysis; vegetation state.

1. ВСТУП

Хлорофіл є важливим пігментом в процесі фотосинтезу, тому існує думка, що він є найбільш важливою органічною молекулою на Землі [12]. Зміна сумарної концентрації хлорофілу a і b та їх відносних пропорцій викликані різними фізіологічними стресами, процесами розвитку листків та їх старіння. Хлорофіл значною мірою пов'язаний із загальною концентрацією азоту в рослині, що дозволяє оцінювати рівень забезпечення рослини поживними речовинами [17]. Отже, виділення корисної інформації із даних спостережень рослинного покриву та їх інтерпретація щодо вимірювання концентрації біохімічних компонент є важливою складовою дослідження стану навколишнього середовища, сільськогосподарських рослин, лісових угідь, прогнозування врожайності, виявлення екологічно небезпечних забруднень та в багатьох інших сферах діяльності людини.

Гіперспектральні дані, виміряні за допомогою аерокосмічних та наземних засобів дистанційного спостереження, дозволяють отримувати інформацію в широкому діапазоні, що в свою чергу спонукає до створення та інтеграції нових методів інтерпретації інформації для побудови моделей оцінювання стану рослинного покриву на основі концентрації біохімічних компонент, а саме хлорофілу. Проте створення таких методів та побудова моделей є не тривіальною задачею, адже на спектр відбиття впливає цілий ряд факторів, наприклад, вміст води, товщина листка, багаторусність рослини, підстилаюча поверхня, інші біохімічні компоненти, умови освітлення та ін. В даному напрямку розроблено ряд аналітичних підходів оцінювання концентрації хлорофілу на основі гіперспектральних даних, проте, як вказано в роботах [10, 11], немає універсального та оптимального рішення, що дозволяє отримувати репрезентативні результати як в лабораторних, так і польових умовах. Останнім часом все більшого застосування набувають математичні методи, що базуються на компонентному аналізі, аналізі дериватив та статистичному навчанні [3, 7, 14, 16, 18]. Дані методи демонструють значні перспективи застосування, однак вони доволі чутливі до різного роду шумів та вимагають цілого комплексу попередніх досліджень для побудови оптимальної моделі. Тому як доповнення до вже існуючих методів в даній роботі розглядається широко відомий метод перетворення Фур'є для виділення характерних показників із спектру відбиття листків

рослин, що корелюють із концентрацією хлорофілу. Мета цієї статті зосереджена на реконструкції моделі оцінювання концентрації хлорофілу в листках рослин шляхом уточнення методики Фур'є-аналізу спектрів відбиття та її тестування на експериментальних вибірках.

2. ФУР'Є-АНАЛІЗ СПЕКТРІВ ВІДБИТТЯ РОСЛИН ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ВМІСТУ ХЛОРОФІЛУ

Перетворення Фур'є використовується в багатьох областях науки як потужний апарат аналізу багатомірних даних (сигналів) [4]. Спектральний аналіз є одним із методів обробки сигналів, який дозволяє охарактеризувати частотний склад даних вимірювання [4]. Загалом для задач оцінювання концентрації пігментів в листках рослин шляхом обробки спектрів відбиття із застосуванням методу Фур'є можна виділити два напрямки: перший полягає у застосуванні дискретного перетворення Фур'є для побудови алгоритму фільтрації даних з подальшим використанням методів виділення інформативних ознак (ІО) [6–8]; другий базується на безпосередньому кореляційному та регресійному аналізах частотного спектру. Більш детально зупинимося на використанні дискретного перетворення Фур'є для аналізу спектрів відбиття (СВ) рослинності та подальшого використання результатів для побудови моделі оцінювання концентрації біохімічних компонент. Для побудови моделі визначення концентрації біохімічних компонент (хлорофілу) перш за все потрібно виділити ІО спектру відбиття. В даному підході процедура отримання ІО здійснювалась за допомогою алгоритмічного модуля пакету MatLab швидкого Фур'є-перетворення з подальшим емпіричним дослідженням частотного спектру [13, 15]

$$x(k) = \sum_{\tau=1}^N S_j(\tau) \omega_N^{(\tau-1)(k-1)}, \quad (1)$$

де $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$, а $S_j(\tau)$, $\tau = 1, \dots, N$ — значення коефіцієнту відбиття в τ -й момент часу. Для чисельних розрахунків використано отримані в цифровому вигляді набір спектральних кривих $S_j(\lambda)$ вимірювання польового спектрометра [6–8], де S — коефіцієнт відбиття, λ — довжина хвилі, а $j = 1, \dots, J$ — кількість спектральних кривих; час вимірювання однієї спектральної кривої складав 2 с. Після отримання цифрового вигляду спектру відбиття шматочки листків обробляли 80% розчином ацетону для екстракції хлорофілу, вміст якого визначали біохімічним методом Арнона [9].

Для набору СВ J (рис. 1) розраховано частотні спектри. Після цього проведено кореляційний аналіз для дослідження зв'язку між концентрацією хлорофілу та величиною значень коефіцієнтів Фур'є. В результаті виявлено, що найбільшу кореляцію із концентрацією хлорофілу мають величини щільності Фур'є-спектру на дуже низьких частотах (табл. 1, рис. 2). На основі отриманих результатів виділено коефіцієнти Фур'є, які відповідають максимальній кореляції на найнижчих частотах та позначено їх $x_1, \dots, x_{N'}$, де N' — кількість відібраних коефіцієнтів. Значення коефіцієнтів використано для побудови регресійних моделей.

3. ІДЕНТИФІКАЦІЯ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ХЛОРОФІЛУ

Задача знаходження моделі полягає в наступному: нехай задано вибірку $x_1, \dots, x_{N'}$, де N' — кількість відібраних коефіцієнтів, та множину відповідних до них значень концентрації хлорофілу $z_1, \dots, z_{N'}$. Тепер проведемо вибір регресійної моделі із сімейства поліноміальних функцій та визначимо оптимальні параметри \mathbf{w} на основі методу найменших квадратів [1]

$$\mathbf{w} = \underset{\mathbf{w} \in D_w}{\operatorname{argmax}} f_p(\mathbf{z}|\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{f}) = f_p(\mathbf{D}_{\mathbf{x}, \mathbf{z}}|\mathbf{w}, \mathbf{f}).$$

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів кореляції

Частота, Гц	Значення коефіцієнта кореляції
0,001	–0,99
0,002	0,48
0,003	–0,98
0,004	–0,99
0,005	–0,93
0,006	–0,92
0,007	–0,91
0,008	0,37
0,009	0,91
0,010	0,82
0,011	0,76
0,012	–0,25
0,013	0,64
0,014	–0,45
0,015	–0,91

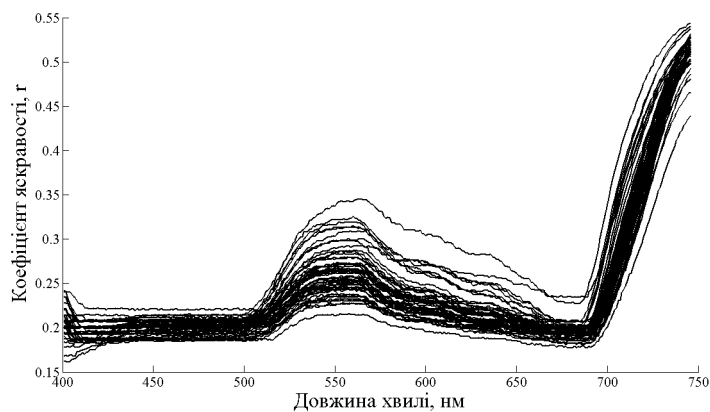


Рис. 1. Набір експериментальних даних, отриманих за допомогою польового спектрометра

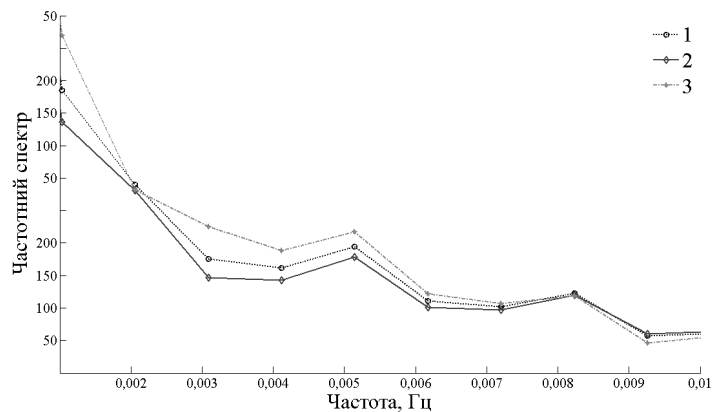


Рис. 2. Спектр Фур'є трьох кривих відбиття рослин в діапазоні від 0 до 0,01 Гц (крива (1) відповідає середньому вмісту хлорофілу; (2) — низькому; (3) — високому)

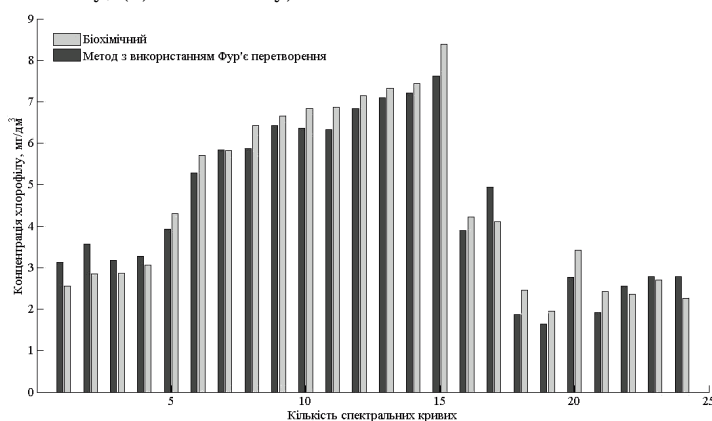


Рис. 3. Порівняння отриманих оцінок вмісту хлорофілу із застосуванням моделі (3) із встановленими концентраціями біохімічним методом

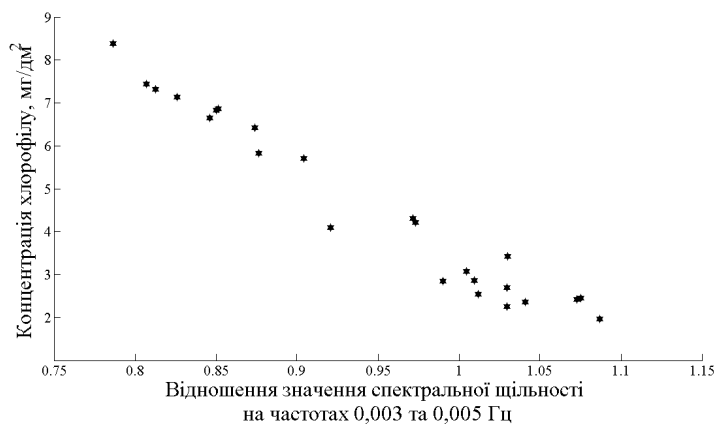


Рис. 4. Залежність величини відношення значень спектральної щільності на частотах 0,003 та 0,005 Гц (x_3/x_5) від концентрації хлорофілу

Таблиця 2. Результати статистичних обчислень

№№	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7
Коефіцієнт множинної кореляції	0,999	0,9996	0,9368	0,9786	0,98	0,99
Коефіцієнт детермінації	0,998	0,9992	0,8776	0,9576	0,97	0,99
Скоректований коефіцієнт детермінації	0,9961	0,997	0,8695	0,9516	0,97	0,99
F-критерій	F(8,8) 509,0052	F(12,4) 441,7974	F(1,15) 107,5761	F(2,14) 158,1952	–	–
Рівень значимості p	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001	0,00001
Стандартна похибка	0,1175	0,103	0,6778	0,4129	0,14	0,12
MSE	0,006495	0,0025	0,405	0,14	0,1562	0,1162
MAE	0,070306	0,037	0,444	0,303	0,562	0,362
MRSE	0,000347	0,0001	0,012	0,013	0,001	0,001
MRAE	0,014730	0,0074	0,082	0,072	0,006	0,005

Функція f_p залежить від гіпотези породження даних і формується на основі висновку Байєса [5]. Перевірка адекватності регресійної моделі проводиться на основі F_{st} -статистики [2]. В ході досліджень вибрано декілька типів регресійних моделей, структура (кількість та частоти коефіцієнтів спектральної щільності) та параметри яких визначалися на основі попереднього кореляційного аналізу.

Покрокова регресійна модель. Для побудови покрокової регресійної моделі використано більше десятка коефіцієнтів Фур'є, що відповідають низьким частотам. В результаті ітеративної процедури відібрано 8 із них для пошуку параметрів. Отримана модель має наступний вигляд:

$$z(x_{N'}) = 21,1 - 0,02x_1 - 0,074x_4 + 0,66x_{13} - 0,23x_5 - 0,098x_{12} - 0,91x_{18} + 0,2x_{11} + 0,348x_{15}. \quad (2)$$

Проведено дослідження на адекватність отриманої регресійної моделі, розраховано ряд статистичних величин для аналізу значимості результатів та перевірки гіпотез (табл. 2).

Лінійна регресійна модель. Для побудови лінійної множинної регресійної моделі використано коефіцієнти Фур'є, які відповідають найбільшим за значенням по модулю коефіцієнтам кореляції ($|r| > 0,6$)

$$z(x_{N'}) = 22,4 - 0,05x_1 + 0,16x_3 - 0,02x_4 - 0,07x_5 - 0,51x_6 - 0,42x_7 + 0,33x_9 - 0,12x_{10} + 0,01x_{11} + 0,35x_{13} + 0,63x_{15}. \quad (3)$$

Також проведено розрахунок ряду статистичних величин для аналізу значимості результатів та перевірки гіпотез і адекватності отриманої моделі (табл. 2). Аналіз результатів обчислень (рис. 3) у порівнянні із біохімічним методом [9] показав, що отримана модель дає змогу оцінювати вміст хлорофілу із достатньо високою точністю.

В ході досліджень емпірично встановлено, що вміст хлорофілу на пряму залежить від значення відношення величини спектральної щільності на деяких частотах (рис. 2), а саме на частотах 0,003 та 0,005 Гц. Відношення коефіцієнтів Фур'є на цих частотах (x_3/x_5) демонструє високу степінь кореляції із вмістом хлорофілу (рис. 4). Тому на основі цих величин запропоновано ряд регресійних моделей:

- лінійна модель на основі відношення величини щільності

$$z(x_3, x_5) = 25,45 - 22,39(x_3/x_5); \quad (4)$$

- лінійна модель

$$z(x_3, x_5) = 22,41 - 0,16x_3 - 0,1x_5; \quad (5)$$

- білінійна модель

$$z(x_3, x_5) = 0,105 - 0,023x_3 + 0,36x_5 + 0,006x_3^2 - 0,01x_3x_5 + 0,003x_5^2; \quad (6)$$

- бікубічна модель

$$z(x_3, x_5) = 0,31 + 0,339x_3 + 0,14x_5 - 0,004x_3^2 - 0,02x_3x_5 + 0,009x_5^2 + 0,0002x_3^3 - 0,0004x_3^2x_5 + 0,0005x_3x_5^2 - 0,0002x_5^3, \quad (7)$$

де x_3, x_5 — значення величини спектральної щільності на частотах 0,003 та 0,005 Гц.

Для перевірки адекватності моделей (4–7) проведено порівняльний аналіз результатів обчислень із експериментально визначеним вмістом хлорофілу біохімічним методом [9]. Розраховано ряд статистичних величин точності оцінювання на тестових вибірках даних (табл. 2). Як видно із табл. 2, усі моделі демонструють відносно високу точність визначення концентрації хлорофілу. Із представленого набору моделей виділено дві (2, 7) для реалізації в алгоритмічному модулі приладу для подальшого їх тестування в польових умовах.

4. ВИСНОВКИ

На основі сучасних принципів системного аналізу та методів цифрової обробки даних поставлено і розв'язано задачу оцінювання сумарної концентрації хлорофілу в листках рослин на основі

Фур'є-аналізу спектру відбиття. Запропоновано новий підхід оцінювання вмісту біохімічних компонент у листках рослин з урахуванням рівня шумів та проективного покриття. Підхід оцінювання базується на виділенні інформативних ознак шляхом застосування методу швидкого перетворення Фур'є і кореляційного аналізу та побудові регресійної моделі. Отримані результати показують, що застосування вище описаного підходу дозволяє отримати інформацію щодо стану рослинності, а саме концентрації біохімічних компонент в листках рослин. Запропонована процедура оцінювання концентрації хлорофілу доповнює існуючі методи та дозволяє розширити засоби виділення інформативних ознак із спектру відбиття рослин отриманих дистанційним шляхом.

1. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ: Подход с использованием ЭВМ. — М.: Мир, 1982. — 488 с.
2. Бендат Д., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. — М.: Мир, 1974. — 463 с.
3. Бідюк П.І., Митник О.Ю. Застосування генетичного алгоритму в задачах оцінювання вмісту хлорофілу в рослинності // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2004. — № 4. — С. 65–70.
4. Нуссбаумер Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. — М.: Радио и связь, 1985. — 249 с.
5. Стрижов В.В. Методы индуктивного порождения регрессионных моделей. — М.: Вычислительный центр РАН, 2008. — 61 с.
6. Яценко В.О., Кочубей С.М., Хандрига П.А. и др. Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация // Космічна наука і технологія. — 2007. — № 3(13). — С. 35–45.
7. Яценко В.О., Семенів О.В., Кашипровський О.І. Моделювання спектральних кривих та оцінювання вмісту хлорофілу в рослинності // Вісник Київського університету. Сер.: Фізико-математичні науки. — 2007. — № 2. — С. 200–203.
8. Яценко В.О., Семенів О.В. Динамічний підхід до оцінювання параметрів біохімічних компонент в рослинності // Вісник Київського університету. Сер.: Фізико-математичні науки. — 2009. — № 1. — С. 163–168.
9. Arnon D.I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* // Plant Physiol. — 1949. — **24**. — P. 1–15.
10. Blackburn G.A. Hyperspectral remote sensing of plant pigments // Journal of Experimental Botany. — 2006. — **58**. — P. 855–867.
11. Blackburn G.A. Wavelet decomposition of hyperspectral data: A novel approach to quantifying pigment concentrations in vegetation // International Journal of Remote Sensing. — 2007. — **28**. — P. 2831–2855.
12. Davies K.M. Plant pigments and their manipulation // Annual plant reviews. Vol. 14. — Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2004. — 352 p.
13. Duhamel P., Vetterli M. Fast Fourier Transforms: A Tutorial Review and a State of the Art // Signal Processing. — 1990. — **19**. — P. 259–299.
14. Feret J.B., François C., Asner G.P., et al. PROSPECT-4 and 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments // Remote Sensing of Environment. — 2008. — № 112. — P. 3030–3043.
15. Frigo M., Johnson S.G. FFTW: An Adaptive Software Architecture for the FFT // Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. — 1998. — **3**. — P. 1381–1384.
16. Jacquemoud S., Bacour C., Poilve H., Frangi J.P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: Direct and inverse mode // Remote Sensing of Environment. — 2000. — **74**. — P. 471–481.
17. 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 Physiology. — 2000. — **20**. — P. 1113–1120.
18. Zarco-Tejada P.J., Berni J.A.J., Suárez L., et al. Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection // Remote Sensing of Environment. — 2009. — **113**. — P. 1262–1275.

Надійшла до редакції 30.07.2015
Прийнята до друку 9.09.2015