

УДК 528.88:502.37

О.С. Гребень

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків

## БАЙЄСОВСЬКИЙ КРИТЕРІЙ МІНІМУМУ СЕРЕДНЬОГО РИЗИКУ У ЗАДАЧАХ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕГЕТАЦІЙНИХ ІНДЕКСІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР УКРАЇНИ

Стаття присвячена розвитку методів математичної статистики стосовно до задач визначення вегетаційних індексів сільськогосподарських культур України. Основу статті складає вибір критерію визначення сигналів сільськогосподарських культур. У якості основного критерію визначення обраний байєсовський критерій мінімуму середнього ризику. Необхідні для цього критерію вихідні дані можуть бути отримані від обласних управлінь «облдержродючості». Розглядаються супутникові системи ДЗЗ як двопозиційні радіолокаційні системи. Приведені основні радіолокаційні характеристики супутникових систем ДЗЗ. Побудовані раніше погано вивчені криві визначення сигналів по байєсовському критерію мінімуму середнього ризику.

**Ключові слова:** дистанційне зондування Землі, КА «Січ», РЛС.

### Вступ

У дійсний час для визначення вегетаційних індексів сільськогосподарських культур у нашій країні та за її

межами широко використовуються супутникові системи ДЗЗ. У Україні, як у космічній державі у різний час створювались супутникові системи Січ-1, Січ-1М, МС2-8. За участю України створена супутникова система

Стіптсат, запущений на орбіту та експлуатувався супутник Січ-2. Розробляються Січ-3О та Січ-3Р.

## 1. Основні радіолокаційні характеристики супутникових систем ДЗЗ

Сучасні методи визначення вегетаційних індексів базуються на використанні радіолокаційних відображень рослинності у різних спектральних діапазонах. Робочий спектральний діапазон радіолокаційних систем (РЛС) лежить у межах від кількох мегагерц до частот ультрафіолетової частини оптичного діапазону [1]. При цьому відношення крайніх частот складає  $10^9:1$ , що є достатнім для визначення вегетаційних індексів сільськогосподарських культур.

Конкретні методи будовання РЛС значно відрізняються один від одного. Однак основні принципи будовання залишаються незмінними та містять у собі наступне. В досліджуємім простір випромінюються електромагнітні коливання (зазвичай використовується спеціальний передатчик радіолокаційних зонуючих сигналів, у супутникових системах дистанційного зондування сільськогосподарських культур використовується електромагнітне сонячне випромінювання). Відображаючи об'єкти (цілі), що пересікає радіохвиля, відображають частину електромагнітної енергії у напрямку пункту прийому, розташованому у розглянутому випадку на борту штучного супутника Землі. Утворений ехосигнал уловлюється приймаючою антеною та детектується. Знаходження ехосигналу є доказом існування цілі.

У будь-якій РЛС виділяють дві характерні задачі та відповідно дві характерні властивості: можливість визначити цілі на великих відстанях та можливість визначити їх місцезнаходження з високою точністю. При цьому необхідно використовувати вірогіднісні характеристики супутникових систем ДЗЗ. У зв'язку з цим для опису процесів функціонування супутникових систем ДЗЗ як радіолокаційних систем та оцінки їх технічних характеристик будемо використовувати методи математичної статистики.

## 2. Рівняння дальності радіолокації при визначенні рослинності

Основне рівняння дальності радіолокації для активної РЛС визначає потужність прийнятого сигналу [1]:

$$P_r = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} = \frac{\sigma}{4\pi R^2} A_r \quad (1)$$

Права частина записана як утворення трьох співмножників. Перший співмножник представляє собою щільність потужності випромінювання передатчику РЛС на відстані  $R$  [М] від передатчика з потужністю  $P_t$  [Вт];  $G_t$  – коефіцієнт посилення антени. Чисельник другого співмножника – ефективна площа

рассіювання (ЕПР) цілі  $\sigma$  [М<sup>2</sup>], знаменник враховує розподілення електромагнітної енергії у просторі в залежності від відстані для відображеного сигналу.

Максимальна дальність радіолокаційного знаходження  $R_{\max}$  визначається як дальність, при якій потужність прийнятого відображеного сигналу є рівною потужності мінімального визначаємого сигналу  $S_{\min}$ .

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2 S_{\min}} \quad (2)$$

Мінімальний визначаємый сигнал  $S_{\min}$  є статичною мірою і має бути записаний через умовну вірогідність правильного визначення та умовну вірогідність ложної тривоги.

Будемо у подальшому враховувати, що більш зручний характеристикою та більш важливим параметром сигналу є відношення енергії сигналу до енергії шуму  $\mathcal{E}/N_0$ .

При використанні такої характеристики на виході погодженого фільтру пікове відношення сигнал/шум по потужності складає  $2\mathcal{E}/N_0$  [1, 2].

Для оптичної радіолокаційної системи, що використовується у якості зондуємого сигналу електромагнітне сонячне випромінювання у основному рівнянні дальності радіолокації перший співмножник у (1) необхідно записати як щільність потужності сонячного випромінювання на поверхні Землі  $P_c$  (Вт/М<sup>2</sup>). З урахуванням введеного позначення з основного рівняння радіолокації можна визначити важливу радіолокаційну характеристику системи ДЗЗ, що використовується для визначення вегетаційних індексів рослин – коефіцієнт відбивання потужності сонячного випромінювання з урахуванням ЕПР рослинності

$$\rho = \frac{\sigma^*}{P_c 4\pi R^2} A_r \quad (3)$$

де  $\sigma^*$  - ЕПР рослинності.

Радіолокаційною характеристикою рослинності як протяжного об'єкту (цілі) у радіолокації є окреме ЕПР  $\sigma_0$  [1, 3], як визначає яку частину площі рослинності складає ЕПР. Питомна ЕПР зв'язана з просторовою роздільною здатністю РЛС  $\Delta\rho$  у наступному співвідношенні [3]:

$$\sigma^* = \sigma_0 \cdot \Delta\rho \quad (4)$$

де  $\Delta\rho$  – площа елемента просторової роздільної здатності РЛС.

Тепер основне рівняння радіолокації при визначенні рослинності та використанні сонячного випромінювання можна переписати у такому вигляді

$$P_r = P_c \frac{\sigma_0 \cdot \Delta\rho}{4\pi R^2} A_r \quad (5)$$

Рівняння (5) визначає квадратичну залежність потужності прийнятого сигналу від дальності до радіолокаційної цілі (рослинності).

Для орієнтовних оцінок коефіцієнтів радіолокаційних відображень рослинності та питомних ЕПР можна скористатися графіками (рис. 1 – 4), взятими з роботи [1].

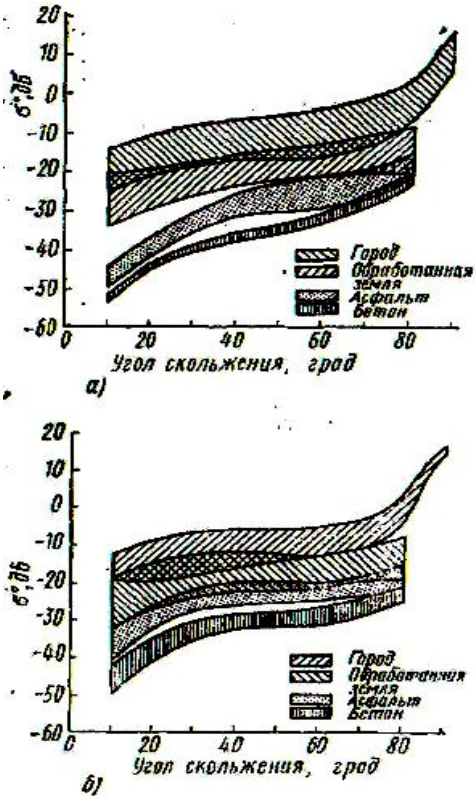


Рис. 1. Межі зміни ЕПР для різних класів поверхонь при горизонтальній (а) та вертикальній (б) поляризаціях

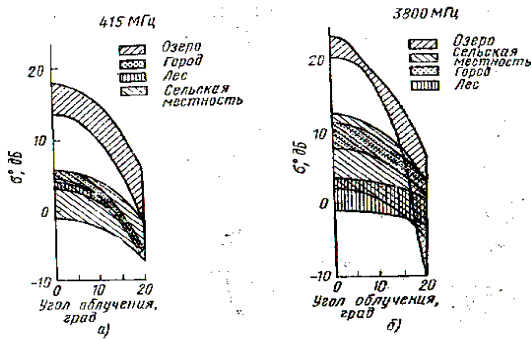


Рис. 2. Межі зміни коефіцієнту радіолокаційного розсіювання різними класами поверхонь для кутів опромінювання, близьких до вертикального (а – на частоті 415 МГц, б – на частоті 3800 МГц)

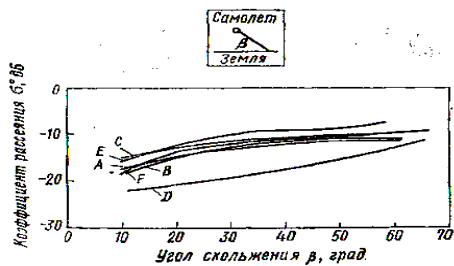


Рис. 3. Залежності радіолокаційного розсіювання від кута для різних видів поверхні, отримані

у результаті аналізу радіолокаційних зображень поверхні у діапазоні 3 см

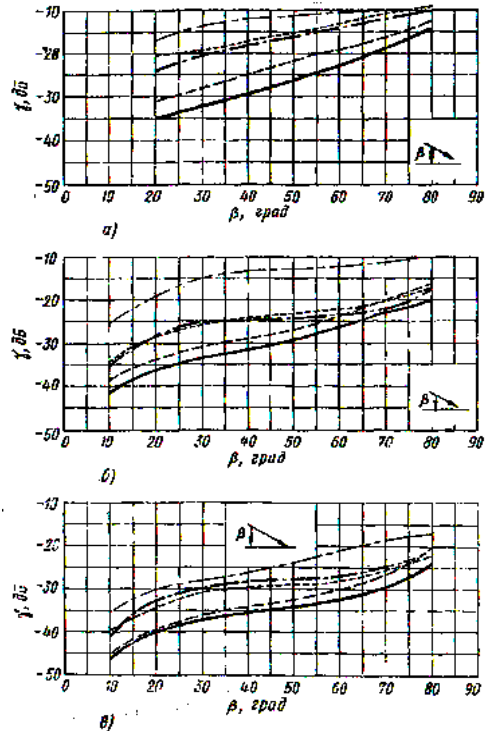


Рис. 4. Зміни інтенсивності радіолокаційних відображень у залежності від кута та частоти (а – діапазон 8 мм., б – діапазон 2 см., в – діапазон 3 см.)

### 3. Формули математичної статистики для визначення вегетаційних індексів

Враховуємо тепер, що сигнали супутникових систем ДЗЗ формуються на виході оптимального фільтру. Тому, потужність сигналів супутникових систем ДЗЗ відповідає енергетичному співвідношенню сигнал/шум, а отже з урахуванням методів математичної статистики формули для визначення вегетаційних індексів [2, 4 – 13] приймають такий вигляд:

Normalized Difference Vegetation Index:

$$NDVI = (q_{NIR} - q_{RED}) / (q_{NIR} + q_{RED}); \quad (6)$$

Simple Ratio Index

$$SR = q_{NIR} / q_{RED}; \quad (7)$$

Enhanced Vegetation Index:

$$EVI = 4.5 \left( \frac{q_{NIR} - q_{RED}}{q_{NIR} + 6q_{RED} - 7.5q_{BLUE} + 1} \right); \quad (8)$$

Atmospherically Resistant Vegetation Index:

$$ARVI = \frac{q_{NIR} - (2q_{RED} - q_{BLUE})}{q_{NIR} + (2q_{RED} - q_{BLUE})}; \quad (9)$$

SumGreenIndex:

$$SGI = (q_{NIR} - q_{RED}) / (q_{NIR} + q_{RED} - q_{BLUE}); \quad (10)$$

Red Edge Normalized Difference Vegetation Index

$$NDVI_{705} = (q_{750} - q_{705}) / (q_{750} + q_{705}); \quad (11)$$

Modified Red Edge Simple Ratio Index:

$$mSR_{705} = (q_{750} - q_{445}) / (q_{750} + q_{445}); \quad (12)$$

Modified Red Edge Normalized Difference Vegetation Index:

$$mNDVI_{705} = (q_{750} - q_{705}) / (q_{750} + q_{705} - 2q_{445}); \quad (13)$$

Vogelmann Red Edge Index 1:

$$VOG1 = q_{740} / q_{720}; \quad (14)$$

Vogelmann Red Edge Index 2:

$$VOG2 = (q_{734} - q_{747}) / (q_{715} + q_{726}); \quad (15)$$

Vogelmann Red Edge Index 3:

$$VOG3 = (q_{734} - q_{747}) / (q_{715} + q_{720}); \quad (16)$$

Red Edge Position Index:

$$\text{RedEdgePositionIndex} = NDVI_{205} + mSR_{205} + VOG1 + VOG2 + VOG3; \quad (17)$$

Photochemical Reflectance Index:

$$PRI = (q_{531} - q_{570}) / (q_{531} + q_{570}); \quad (18)$$

Structure Insensitive Pigment Index:

$$SIPI = (q_{800} - q_{445}) / (q_{800} + q_{680}); \quad (19)$$

Red Green Ratio Index:

$$RGI = q_{GREEN} / q_{RED}; \quad (20)$$

Normalized Difference Nitrogen Index:

$$NDNI = \frac{\log(1/q_{1510}) - \log(1/q_{1680})}{\log(1/q_{1510}) + \log(1/q_{1680})}; \quad (21)$$

Normalized Difference Lignin Index:

$$NDLI = \frac{\log(1/q_{1510}) - \log(1/q_{1680})}{\log(1/q_{1510}) + \log(1/q_{1680})}; \quad (22)$$

Cellulose Absorption Index:

$$CAI = 0.5(q_{2000} + q_{2200}) - q_{2100}; \quad (23)$$

Plant Senescence Reflectance Index:

$$PSRI = (q_{680} - q_{500}) / q_{750}; \quad (24)$$

Carotenoid Reflectance Index 1:

$$CRI1 = (1/q_{510}) - (1/q_{550}); \quad (25)$$

У формулах (6 – 25) величина:

Carotenoid Reflectance Index 2:

$$CRI2 = (1/q_{510}) - (1/q_{700}); \quad (26)$$

Anthocyanin Reflectance Index 1:

$$ARI1 = (1/q_{550}) - (1/q_{700}); \quad (27)$$

Anthocyanin Reflectance Index 2:

$$ARI2 = q_{800} [(1/q_{550}) - (1/q_{700})]; \quad (28)$$

Water Band Index:

$$WBI = q_{900} / q_{970}; \quad (29)$$

Normalized Difference Water Index:

$$NDWI = (q_{857} - q_{1241}) / (q_{857} + q_{1241}); \quad (30)$$

Moisture Stress Index:

$$MSI = q_{1599} / q_{819}; \quad (31)$$

Normalized Difference Infrared Index:

$$NDII = (q_{819} - q_{1649}) / (q_{819} + q_{1649}). \quad (32)$$

## Висновок

Відзначимо також, що криві знаходження по критерію мінімуму середнього ризику приймають релейний характер, що дозволить виявляти рідні аномалії у ідентифікаційних індексах рослин. Врахуємо аномалії у рослинах, що з'являються у результаті впливання неблагоочинних умов: забруднення ґрунту важкими металами, накопичення пес-

тицидів, мінеральних та органічних добрив та ін. Кількісні та якісні характеристики забруднень можуть бути отримані після аналізу супутникових знімків, що задані у ТЗ регіонів.

Характерно, що при рівнянні апріорних вірогідностей  $1-P(\Omega)=P(\Omega)=0,5$  вага апріорних даних стає рівною 1 та критерій мінімуму середнього ризику переходить у відомий у радіолокації критерій Неймана-Пірсона. Для всіх інших випадків, коли  $P(\Omega)>0,5$ , вірогіднісні характеристики знаходження сільськогосподарських культур по байєсовському критерію мінімуму середнього ризику перевищують аналогічні вірогіднісні характеристики знаходження по критерію Неймана-Пірсона.

## Список літератури

1. Сколник М. Справочник по радиолокации. Т. 1 / М. Сколник. Под ред. К.Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1977. – 322 с.
2. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
3. Фельдман Ю.И. Теория флуктуаций локальных сигналов, отраженных распределенными целями / Ю.И. Фельдман. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.
4. Гарбук С.В. Космические системы дистанционного зондирования земли / С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон. – М.: Издательство АИБ, 1997. – 296 с.
5. Гарбук С.В. Изображение земли из космоса: Примеры применения / Гарбук С.В. – М.: ИТЦ СканЭкс, 2005. – 100 с.
6. Черепанов А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – М.: Проспект, 2009. – № 3. – С. 28-32.
7. Антонов В.Н. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ / В.Н. Антонов, Л.А. Сладких // Геоматика. – М.: Проспект, 2009. – № 4. – С. 50-53.
8. Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным / Н. Кукуль, Н. Ильин, С. Скакун, А. Лавренко. – К.: ИКИ НАНУ-НКАУ, 2005. – 25 с.
9. Зерновое сельское хозяйство – вид из космоса [Электронный ресурс] / R&D Center ScanEx. – Режим доступа: [http://www.scanex.ru/ru/data/Applications\\_ScanEx\\_p19-31.pdf](http://www.scanex.ru/ru/data/Applications_ScanEx_p19-31.pdf) – 28.12.2011.
10. Вегетационные индексы. Основы, формулы, практическое использование [Электронный ресурс] / Режим доступа: MapExpert [http://mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=20](http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=20) 30.12.2011.
11. Применение данных ДЗЗ в сельском хозяйстве / [Электронный ресурс] ЦПОСІ та КНП. – Режим доступа: [http://dzz.gov.ua/CPOSI/style/page\\_2](http://dzz.gov.ua/CPOSI/style/page_2) – 5.01.2012.
12. Красовский Г.Я. Введение в методы космического мониторинга окружающей среды / Г.Я. Красовский, В.А. Петросов. – Х.: ХАИ, 1999. – 206 с.
13. Степная зона Украины [Электронный ресурс] / Smotret-Mir.Ru. – Режим доступа: <http://smotret-mir.ru/ukraina/stepnaya-zona-ukrainy.html> – 12.02.2012.

Надійшла до редколегії 4.02.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Д.В. Голкін, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**БАЙЕСОВСКИЙ КРИТЕРИЙ МИНИМУМА СРЕДНЕГО РИСКА В ЗАДАЧАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР УКРАИНЫ**

А.С. Гребень

*Статья посвящена развитию методов математической статистики применительно к задачам определения вегетационных индексов сельскохозяйственных культур Украины. Основу статьи составляет выбор критерия обнаружения сигналов сельскохозяйственных культур. В качестве основного критерия обнаружения выбран байесовский критерий минимума среднего риска. Необходимые для этого критерия исходные данные могут быть получены от областных управлений. Рассматриваются спутниковые системы ДЗЗ как двухпозиционные радиолокационные системы. Приведены основные радиолокационные характеристики спутниковых систем ДЗЗ. Построены ранее слабо изученные кривые обнаружения сигналов по байесовскому критерию минимума среднего риска.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, КА «Сич», РЛС.

**BAYESIAN CRITERION OF MINIMUM AVERAGE RISK IN THE PROBLEMS  
OF A CERTAIN VEGETATION INDEX CROP OF UKRAINE**

A.S. Greben

*The article is devoted to the development of statistical techniques as applied to determine the vegetation indices of crops in Ukraine. The basis of this paper is the selection of a test for detecting signals of crops. The main criterion is chosen Bayesian detection criterion of a minimum average risk. The necessary criteria for the original data may be obtained from regional administrations. Satellite remote sensing systems are considered as two-position radar systems. We present the main characteristics of satellite radar remote sensing systems. Poorly constructed earlier learning curve of signal detection by Bayesian criterion of minimum average risk.*

**Keywords:** Earth remote sensing, spacecraft «Sich», radar.