

ДОБРИ ПРАКТИКИ ЗА СИНХРОНИЗИРАНЕ НА ХИПЕРСПЕКТРАЛНИ ДАННИ ОТ КОСМИЧЕСКИ СЕНЗОРИ ЗА МОНИТОРИНГ НА ЕКОБИОЛОГИЧНИЯ СТАТУС НА РАЗЛИЧНИ КУЛТУРИ И КОМБИНИРАНЕТО ИМ С ДРУГИ ДАННИ ЗА ЦЕЛИТЕ НА РАСТИТЕЛНАТА ФЕНОМИКА

Лъчезар Филчев, Десислава Ганева

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: lachezarhf@space.bas.bg; dganeva@space.bas.bg*

Ключови думи: хиперспектрални (спектрометрични) данни, екобиологичен статус, състояние на посеви, наблюдение на земята

Резюме: Разгледано е използването на хиперспектрални данни за определяне на параметри на посев и посев/почва. В доклада са дадени данни за хиперспектралните спътникови мисии, които са достъпни за използване в българското растениевъдство, както и някои съвременни приложения на хиперспектралните данни в растениевъдството. В заключение са изведени предложения и препоръки, и е направен опит за предлагане на методика за определяне на тестови полета и наземни изследвания синхронизирани с дистанционни наблюдения на посеви. За тази цел е използван международният опит на програми и проекти като METEOC, VALERIE, и SPARC (Barax).

GOOD PRACTICES FOR SYNCHRONIZING HYPERSPECTRAL DATA FROM SPACE SENSORS WITH ANCILLARY DATA TO MONITOR THE ECOBIOLOGICAL STATUS OF DIFFERENT CROPS FOR PLANT PHENOMICS PURPOSES

Lachezar Filchev, Desislava Ganeva

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: lachezarhf@space.bas.bg; dganeva@space.bas.bg*

Keywords: hyperspectral data, ecobiological status, crop status, Earth Observation

Abstract: The use of hyperspectral data to retrieve crop and crop/soil parameters has been considered. The report provides information on hyperspectral satellite missions, which are available to the Bulgarian agriculture, as well as some modern applications of hyperspectral data in agriculture. In conclusion, suggestions and recommendations have been drawn up, and an attempt has been made to propose a methodology for choosing test fields and ground-based observations synchronised with remote sensing measurements of crops. For this purpose, the international experience of programmes and projects such as METEOC, VALERIE, and SPARC (Barax) has been used.

Въведение

Има различни приети дефиниции за хиперспектралните дистанционни изследвания или още известни като образна (спътникова) спектроскопия/спектрометрия (двата термина се използват взаимнозаменяемо), но всички те могат да бъдат стеснени до следните две определения [1]. Образната спектрометрия се определя като: "едновременно заснемане/регистрация на пространствено корегистрирани изображения в множество спектрално съседни области". При това определение хиперспектралният сензор може да бъде един сензор с 20 последователни спектрални канала всеки с ширина от 10 nm. Второто определение за хиперспектралното заснемане гласи, че една система е хиперспектрална, ако заснема 40 или повече тесни съседни спектрални канала/области (10÷20 nm) едновременно [2]. Едва след появата на новите сателитни платформи, разработени по линия на Новата програма на хилядолетието (NMP) на НАСА, като например Earth Observer-1 (NMP/EO-1), със

спектрометъра Hyperion, и PProject for OnBoard Authonomy (PROBA), с инструмента Compact High Resolution Imaging Спектрометър (CHRIS) на борда, разработен от Европейската космическа агенция (ESA), изведени в орбита през 1999 г. и 2001 г. съответно, сателитната образна спектрометрия за граждански и научни приложения стана възможна. Към момента на изготвяне на доклада може да се провери наличността на данните от различните разглеждани сензори и спътникови платформи в съответните архиви за територията на България използвайки свободния каталог стандартизиран от CEOS [3].

В настоящият доклад е приета дефиницията от Националната научна програма „Интелигентно земеделие“ за екобиологичен статус, който е контрол на основните химико-физични параметри на почвата. Почвата е един от основните ресурси в земеделието. Поддържането и управлението на плодородието на почвата е от основно значение за развитието на устойчиво земеделие [4]. Основните химико-физични параметри на почвата пряко влияят върху посевите, както на тяхната фенология, така и на тяхното състояние и продуктивност. Разгледано е използването на хиперспектрални данни за определяне на параметри на посев и посев/почва. В заключение са изведени предложения и препоръки, и е направен опит за предлагане на методика за определяне на тестови полета и на ход на наземни изследвания синхронизиране с дистанционни наблюдения на посевите. За тази цел е използван международния опит на програми и проекти като METEOS, VALERIE, и SPARC (Barax).

Материали и методи

В настоящия доклад е направена литературна справка за изготвяне на препоръки и представяне на добри практики при синхронизиране на хиперспектрални данни (спътникови и аеро) с наземни изследвания за мониторинг на еко биологичния статус на различни култури. Справката е направена в наличните в Интернет реферативни бази данни и бази данни с научна литература – Google Scholar, Scopus, ResearchGate. Запитванията са направени на основа на логически въпроси (заявки) по ключови думи в англоезичната литература. Получените резултати от литературната справка са представени по хронологичен ред за хиперспектралните спътникови мисии. Използването на хиперспектралните данни в растениевъдството е дадено по основни приложни области обособени в резултат на прегледа на научната литература по ключови думи.

Хиперспектрални данни от ново поколение космически сензори

а. Минали спътникови хиперспектрални мисии

NMP/EO-1 – Мисията NMP/EO-1 носи на борда три радиометъра: 1) Advanced Land Imager (ALI) - мултиспектрален pushbroom радиометър с 1 панхроматичен канал и 9 мултиспектрални канала; 2) Хиперион – спекторрадиометър и 3) Линеен еталонен спектрометър (LEISA) - Атмосферни Коректор (LAC). EO-1/Hyperion е решетъчен спектрометър с 30m (GSD) и 7.7 km ширина на сцената. Той осигурява 10 nm (интервал на семплиране) непрекъснати канали в $\lambda=400\div 500\text{nm}$. LAC е спектрометър, работещ в спектралния диапазон $\lambda=900\div 1600\text{nm}$, който е подходящ за екипа за валидиране на продуктите на EO-1 за корекция на атмосферните ефекти в многоспективните устройства през първата година от мисията [5–7]. Мисията на NMP/EO-1 приключи на 22.02.2017 г. след планирано извеждане от орбита [8].

ENVISAT/MERIS – Европейският аналог на MODIS, но ориентиран основно към изследвания на океаните, е образния спектрометър със средна разделителна способност (MERIS) на борда на ENVISAT. MERIS предоставяше редовни заснемания до 09.05.2012 г. когато ENVISAT прекрати предаването на данни. Инструмента се състои от 15-канална система, работеща във видимия и близкия инфрачервен диапазон ($\lambda=390\div 1040\text{ }\mu\text{m}$) с 300 \div 1200 m (GSD) [9].

б. Настоящи спътникови хиперспектрални мисии

PROBA-1/CHRIS – Компактният инструмент за изображения с висока разделителна способност (CHRIS) е качен на борда на спътника PROBA-1 през 2001 г. CHRIS има 18 спектрални канала в режими на заснемане 2, 3 и 4 и 37 спектрални канала в Режим 5 в диапазона на VNIR ($\lambda = 415\div 1050\text{ nm}$) при 17 m GSD. Инструментът може да бъде програмирани до 63 спектрални канала (CHRIS е напълно програмируем до 150 канала) при около 34 m GSD в Режим 1 (PROBA-1/CHRIS, 2014). Основната цел на спътниковия образен спектрометър CHRIS/Proba е събирането на данни за реконструиране на функцията за разпределение на отражението (BRDF) за по-добро разбиране на спектралните отражателни характеристики на обектите и явленията на земната повърхност, (PROBA instruments, 2014).

Мисията PROBA носи на борда и панхроматична камера с висока пространствена разделителна способност (HRC), миниатюрен телескоп от с размер на отвора 115 mm и фокусно разстояние 2 296 mm, което регистрира изображения с площ 25 km² с 5/8 m GSD. Всяко

номинално CHRIS/Proba изображение формира сцена с квадратен размер (13 km × 13 km) в перигея. Всяко сканиране се извършва при различни ъгли на видимост (-55°, -36°, 0°, 36°, и 55°) [10]. Мисията е вече в разширен режим (работи след планираният край на мисията) и предлага само за регистрирани потребители, от Категория 1 – предимно за научни цели, използващи данни от мисиите на трети страни (TPM), заснемане на нови и архивирани изображения от архива на изображения на ЕКА.

EOS-AM1/MODIS – В рамките на програмата EOS, която предвижда разработването на няколко сателита EOS, предназначени за 15 години работа, инструментът MODIS стартира на борда на сателита EOS-AM1. Той започва работа през февруари 2000 г. Ширината на сцената от MODIS е 2 300 km (GSD), с почти ежедневно заснемане, в 36 спектрални канала в диапазона $\lambda=0.4\div 14.4 \mu\text{m}$. Два канала са с 250 m (VNIR), пет ленти с 500 m, а останалите 1 000 m (GSD) [11]. Планираният край на мисията е в декември 2025 г. [12].

PRISMA – Най-новата PRISMA (PRecursive IperSpettrale of the application mission), разработена от Италианската космическа агенция (ASI), е в експлоатация от 21.03.2019 г. [13]. Данните, подобно на данните от CHRIS/Proba, могат да бъдат заявени за научни цели след направена регистрация и малък проект на <https://prismauserregistration.asi.it/>.

VEN μ S – Мисията VEN μ S, за мониторинг на растителността и околна среда на нов микро-сателит [14], е разработена съвместно от CNES и Израелската космическа агенция (ISA). Камерата на борда на спътника, изведен в орбита на 01.08.2017 г., заснема в 12 тесни спектрални канала. Научната цел VEN μ S е предоставяне на данни за научни изследвания, свързани с мониторинга, анализа и моделирането на земната повърхност, функционираща под влияние на фактори на околната среда, както и човешки дейности [15]. Спътника е в крайната си фаза на експлоатация и ще бъде изведен от орбита през 2022 г.

Международната космическа станция (МКС)/DESI – На борда на Международната космическа станция (МКС) има няколко хиперспектрални инструмента работещи в момента и предоставящи данни за научни цели. Един от тях е DESIS разработен от DLR [16]. Могат да се поръчат три вида продукти от 2018 г. досега, които са ниво 1B (системно и радиометрично коригирани), ниво 1C (геометрично коригирани) и ниво 2A (атмосферно коригирани). Пространствената разделителна способност е около 30 m. DESIS е чувствителен между 400 nm и 1 000 nm с разделителна способност около 3.3 nm. Данните DESIS се доставят в отделни изображения от около 30 × 30 km.

Международната космическа станция (МКС)/HISUI – Hyperspectral Imager Suite (HISUI) е спътникова хиперспектрална система за изображения, разработена от японското Министерство на икономиката, търговията и промишлеността (METI). Това е четвъртата оптична мисия на METI, след оптичния сензор (OPS) на борда японския спътник за изследване на земните ресурси JERS-1 (1992 – 1998), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) на борда спътника Terra на НАСА, и Advanced Satellite with New system Architecture for Observation 1 (ASNARO-1), (2014). През 2015 г. METI решава разгръщането на HISUI на Международната космическа станция (МКС), а не специален орбитален спътник на околополярна слънчево-синхронна орбита. Данните от HISUI се предлагат от ниво 0 (сурови данни) до ниво 2G (атмосферно коригиран продукт - невалидиран). Политиката за данни на HISUI е в процес на разглеждане и насоките за обсъждане са както следва. За сътрудници и коопериращи изследователи, проектът на HISUI ще бъде с приоритет, приоритетно получаване на данните и разпространение за поисканите от тях площи безплатно. За всички останали научни ползватели, проектът на HISUI разпространява архивни данни [17].

WorldView – Не на последно място, важно е да се отбележи появата на някои смесени комерсиални системи, като например WorldView-2, -3, и -4 които носят някои от характеристиките на хиперспектралните системи, като тесни канали, предназначени за специфични приложения, като например канали за оценка на цвета на океанската вода и изследвания на растителния стрес [18, 19]. Изображения – архивни и по заявка – могат да се поръчат от сайта на Махаг [20] или някой от техните представители за източна Европа и България.

с. Бъдещи спътникови хиперспектрални мисии

EnMap/HSI – В рамките на Програмата за екологично картографиране и анализ (EnMap) се подготвя инструментът HyperSpectral Imager (HSI). Създаден да регистрира биофизични, биохимични и геохимически променливи на глобално ниво и по този начин да подобри разбирането на биосферните/геосферни процеси [21]. Той е и ново поколение хиперспектрален инструмент, който предлага многогълни заснемания в $\pm 30^\circ$ от надира.

HyspIRI – Мисията на сателита Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI), ще изучава световните екосистеми и ще предоставя важна информация за природни бедствия като вулкани, горски пожари и суша, т.е. подобно на това, което изследва EO-1/Hyperion в неговата разширена мисия. Спектрометърът ще заснема изображения в спектралния диапазон $\lambda=380\div 2\ 500 \text{ nm}$ в

10 nm тесни съседни канали заедно с мултиспектрално изображение, който заснема от 3 до 12 μm в средната и топлинната-инфрочервена (ТИР) област на спектъра [22].

CHIME – Хиперспектралната мисия на програма "Коперник" (CHIME, или още познат като Sentinel-10) ще носи на борда си уникален инфрочервен спектрометър, който ще осигури оперативни хиперспектрални наблюдения в подкрепа на нови и подобрени услуги за устойчиво управление на селското стопанство и биологичното разнообразие, както и характеризирани на поземлените имоти. Мисията ще допълни "Сентинел-2" за приложения като картографиране на земната покривка след извеждането и в орбита през 2029 г. [23]. Мисията е част от плановите за разширяване на програма „Коперник“ с допълващи мисии към семейството на Sentinel [24].

EMIT – EMIT (Earth Surface Mineral Dust Source Investigation) е прикрепен към МКС, (EVI4) мисия за определяне на минералния състав на природни обекти, които произвеждат прахови аерозоли по целия свят [25]. Мисията ще картографира повърхностната минералогия на регионите с източници на сух прах чрез образна спектроскопия във видимата и къса инфрочервена област на спектъра (VSWIR). Картите на регионите източници на прах ще бъдат използвани за подобряване на прогнозите за ролята на минералния прах в радиационния баланс (затопляне или охлаждане) на атмосферата. Чрез измерване в детайли кои минерали съставят праха, EMIT ще помогне да се отговори на важния въпрос дали конкретния вид аерозол затопля или охлажда атмосферата. Хиперспектралният инструмент EMIT ще измерва различните дължини на вълните на светлината, излъчвана от минералите на повърхността на пустини и други източници на прах, за да се определи техният състав. Сензорът EMIT се основава отчасти на Лунния инструмент на НАСА "Moon Mineralogy Mapper" на борда на спътника Chandrayaan-1 на Индийската организация за космически изследвания. EMIT ще бъде транспортиран с товарен кораб до Международната космическа станция (МКС) през 2022 г.

Satellologic-NuSat – Една от оперативните съвременни хиперспектрални мисии с развитие в близко бъдеще е аржентинската Satellologic-NuSat EO (Earth Observation) Microsatellite Constellation (<https://satellologic.com>). Камерата на борда на микро-сателитните платформи, изведени през 10.2020 г. в орбита, могат да заснемат до от 29 (под-метрова разделителна способност) до 600 спектрални канала с ширина до 5 nm с 30 m GSD, в спектралната област $\lambda = 400+900 \text{ nm}$ [26].

Използвани хиперспектрални данни в земеделието

a. Вегетационни индекси (ВИ)

Хиперспектрални вегетационни индекси са използвани в редица изследвания в земеделието, от които за разпознаването на ябълкова краста по овощни дървета [28], за оценка на относителната вариация на добива от хиперспектрални изображения [29], за определяне на добива от посев от ориз [30] или добива на селекционните експерименти на зимна пшеница [31], [32].

b. Определяне на фенологични етапи и класификация

Хиперспектрални данни са в състояние да предскажат фенологичните етапи, по скалата BVCH, на ечемика [33] и на зимна пшеница [34]. В процеса на фенологично развитие на растенията редица от техните биохимично-биофизични показатели се променят и те могат да бъдат подробно записани с помощта на хиперспектрална технология за дистанционно наблюдение.

Хиперспектралните данни могат да се използва за навременна и точна оценка на физико-химичните свойства на посеви от ориз; обаче несъответствията, свързани с видимата почвата и водата, усложняват оценката на състоянието на азотния статус на културата, използвайки спектрално отражение на посева [35].

Хиперспектралните данни с дължини на вълните в SWIR1 и SWIR2 във връзка с тези от VIS и NIR могат да осигурят диференциация между фенологии на различни посеви и посев спрямо плевел [36].

Хиперспектралните данни и PLS-DA (partial least squares-discriminant analysis) са ефективни при различаването на сортовете царевица [37]. Значимите дължини на вълната са разположени в синьо (400 и 455 nm), зелено (545 nm), червено и червено (625, 680, 705 и 720 nm) и близко инфрочервено (765, 840 и 895 nm) обхвати на спектъра. Цъфтежът и настъпването на стареенето са определени като най-добрите фенологични етапи за точна сортова дискриминация на царевицата.

Хиперспектрална отражателна способност на ниво лист може да разграничи соевите генотипове [38]. Анализът на основните компоненти (Principal component analysis), приложен като индикатор за дисперсия на отражателните спектри сред генотипите, обяснява над 94% от спектралната дисперсия в първите три основни компонента. Линейният дискриминантен анализ (Linear discriminant analysis), използван за получаване на модел на класификация на всеки

спектър на отражение на соевите листа във всеки соев генотип, постигна точност между 61% и 100% в етапа на калибриране и между 50% и 100% в етапа на валидиране. Погрешна класификация се наблюдава само между генотипове от същия генетичен произход.

Хиперспектралните данни се използват успешно за проследяване на инвазивни видове растения [39, 40] или за класифициране на различните растителни видове [41, 42]. От изследователски интерес е проучването на възможността за използването на хиперспектрални данни със свръхвисока разделителна способност за разграничаване на растения, които не са от вида засят в парцелката.

с. Алгоритми за машинно обучение (ML)

Добива от посеви засети с картофи е определен с $r^2 = 0.81$ използвайки Partial Least Squares регресионен модел и пълния набор от спектрална информация получена от хиперспектрална камера монтирана на БЛА [43].

Три често срещани алгоритми за машинно обучение (ML): многослоен перцептрон (MLP), поддържаща векторна машина (SVM) и произволна гора (RF) са използвани за прогнозиране на добива на посеви от соя (Glycine max), използвайки хиперспектрални данни [44].

Техники за спектрално демиксиране на хиперспектрални данни могат да се използват за картографиране на вариацията в добива на посеви [45], [46].

Използването на данните от всички хиперспектрални канали повишава точността на прогнозиране спрямо използването само на ВИ. Моделите Splines и Fourier имат най-добрата точност на прогнозиране на добива от селекционни опити със зимна пшеница [47].

Заклучения и препоръки

Хиперспектрални спътникови данни, подобно на всички данни от спътникови дистанционни изследвания, трябва да се калибрират и валидират преди прякото им използване в практиката. Този процес е регулиран на международно ниво от групата по калибрация и валидация към Комитета по спътниците за наблюдение на Земята [48]. Проектът VALERI [49], който има за цел да валидира продукти, получени от сателитни сензори със средна пространствена разделителна способност, описва подробно методология за синхронизиране на спътникови данни с данни от наземни изследвания. Източник на много информация са инициативите “Метрология за наблюдение на Земята и климат – METEOC” [50], и “ESA SPectra bARrax Campaign (SPARC)” от 2003-2004 [51].

Въпреки широката международна мрежа предоставяща данни за различни видове земна повърхност за територията на България е необходима допълнителна калибрация и валидация за различните повърхности и по-специално растителни видове и почвени типове. Основен проблем при събирането на наземна хиперспектрална информация са ефектите на поглъщане породени от различни газове и прахови съставки в атмосферата, но най-вече съдържанието на водни пари, които правят значителни части от спектъра неизползваеми. За тази цел се използва инверсно моделиране на спектъра на основата на физико-математически модели на атмосферата или на отражателните характеристики на ниво листо, или корона. След продължително и консистентно събиране (достатъчен набор от полеви хиперспектрални данни) на наземна спектрометрична информация може да се използват данните с достатъчна достоверност и да се снижи процента грешка при интерпретацията на спектралните отражателни характеристики. Не малък проблем при обработката и синхронизирането на данните е различията в наземния и спътниковия сензор – по-специално ширината на спектралните канали – която не винаги съвпада поради различните инженерни решения на различните сензори изведени в орбита. Това налага често да се използват самолетни аналози на тези сензори, които са честа практика в страните от Западна Европа, САЩ и Канада. Именно на тези самолетни аналози до голяма степен се калибрират инструментите преди извеждането им в орбита и след извеждане в орбита. Полевите спектрометрични кампании със спектрометри са задължителни в случай, че самолетни такива не могат да бъдат организирани.

Комбинирането на полеви, самолетни или спътникови хиперспектрални данни с други наземни данни за целите на растителната феномика става едва след първоначалното калибриране и валидиране на първите. При удостоверяване на спектралните отражателни характеристики за всеки канал, стабилността на сигнала, както и корекционните коефициенти за конвертиране на цифровите стойности в отражателни характеристики – което понякога отнема години – данните от хиперспектралните мисии могат да се използват уверено, при условие че се прави проверка за тяхната достоверност периодично.

За да се определят параметрите на посева се използват качествени и количествени методи [52]. Качествените използват класификация с правила за определяне на всеки пиксел в съответен клас. Количествените се разделят на три големи групи: емпирични [52], физични [53],

[54] или хибридни [55]. Емпиричните, от своя страна, се разделят на две подгрупи: тези, които използват параметрични функции с една променлива, която е обикновено вегетационен индекс (ВИ), и непараметрични алгоритми, които използват цялата налична спектрална информация. В България добри резултати дават непараметричните алгоритми за определяне на параметри на посеви от зимна пшеница и рапица [56–58].

Особено внимание за синхронизиране на хиперспектрални спътникови данни с данни от наземни изследвания трябва да се даде на избора на тестови полета и методологията на изследване.

a. Избор на тестови полета

Избраните тестови полета (ТП) трябва да отговарят на редица критерии, за да позволят точното валидиране на биофизичните параметри от наземните измервания.

- Размер на ТП. То трябва да бъде съобразено с пространствената разделителна способност на сензора, който се изучава.
- Хомогенност. Наземните измервания се правят на елементарни площадки (ЕП). ЕП трябва да бъде относително хомогенна, т.е. стойността на биофизичния параметър, както и съответните радиометрични стойности, могат да се променят само незначително, когато се измести позицията от площта на ЕП към площта на един пиксел от сензора, който се изучава.
- Топография. ТП трябва да се намира в относително равна местност, за да се опрости интерпретацията както на наземните измервания, така и на сателитните данни.
- Тип култура. Изборът на ТП е направен така, че позволява да се вземат проби от променливостта на изучаваната култура и условията, срещани в България, или един район от страната, за съответната култура.
- Местоположение на ТП спрямо полосата на спътника. Може да се избере място, което попада на застъпващи се полоси на изучавания спътник. По този начин се увеличава времевата разделителна способност почти два пъти.

b. Методология

При разработване на методологията за синхронизиране на хиперспектрални спътникови данни с данни от наземни изследвания трябва да се вземат предвид следните стратегии:

- Стратегия за пробовземане.
 - Трябва да се определи размера на ЕП в съответствие с пространствената разделителна способност на сензора, който се валидира.
 - Броят на ЕП и тяхното оптимално местоположение е важен избор, за да се получи добро представяне на променливостта на изучаваната култура и на условията.
 - Геореферирането на ЕП трябва да се направи с GPS с голяма точност, съобразена с размера на ЕП и пространствената разделителна способност на изучавания сензор.
- Измервания на биофизичните параметри в ЕП.
 - Описва се подробно методът на измерване, който обикновено е локален, и свързаната с него стратегия за пространствено вземане на проби в рамките на ЕП.
 - Спазват се изискванията за метеорологична обстановка на съответния наземен уред и правилната му калибровка спрямо тези условия.
 - Датите на наземните измервания трябва да са възможно синхронизирани с датите на преминаването на изучавания спътник.
 - Може да се направи избор между точкови измервания и непрекъснати измервания, когато уреда го позволява.
 - При повече от един измерван параметър, трябва да се определи последователността на измерванията в зависимост от тяхната продължителност и изисквания към метеорологична обстановка.
- Мащабиране (scaling-up) от пробовземането, през мащаба на ЕП, до размера на пиксела на сензора, който се изучава. Трябва да се изготви стратегия и обработка за описаното мащабиране.
 - Избор на първоначална обработка на измерените наземни данни, между които изследване за наличие на нехарактерни стойности, осредняване, различия в повторенията и т.н.
 - Избор на алгоритъм за определяне на изучаваните параметри.

Благодарности

Настоящото изследване е резултат от задача 1: Изследване на възможностите за синхронизиране на хиперспектралните данни (спътникови и аеро) с наземните изследвания за

мониторинг на еко биологичния статус (контрол на основните химико-физични параметри на почвата) на различни култури по Национална научна програма „Интелигентно Растениевъдство“, финансирана от МОН, одобрена с решение на МС № 866/26.11.2020 г. Компонент 2. Диагностика и прогноза чрез изкуствен интелект. РП 2.2. „Използване на данни от наблюдения на земята (RST-ТТО)“.

Литература:

1. Filchev, L. Hyperspectral Satellite Earth Observation Missions - A Review, *Aerosp. Res. Bulg.*, vol. 26, pp. 191–206, 2014.
2. Van Der Meer F. and S. M. de Jong, *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*, Springer, 2006.
3. EO portal. [Online]. Available: <https://eoportal.org/web/eoportal/fedeo#>. [Accessed: 29-Jun-2021].
4. Papendick R. I. and J. F. Parr, *Soil Quality—The Key to a Sustainable Agriculture.*, *Am. J. Altern. Agric.*, vol. 7, no. 1/2, pp. 2–3, 1992.
5. Beck, R. *EO-1 User Guide*, 2003.
6. EO-1, Enhanced Formation Flying (EFF). [Online]. Available: <http://eo1.gsfc.nasa.gov/new/Technology/FormFly.html>. [Accessed: 10-Jun-2021].
7. Earth Observing 1 (EO-1) Sensors. [Online]. Available: <http://eo1.usgs.gov/sensors>. [Accessed: 10-Jun-2021].
8. Earth Observing 1 (EO-1), USGS, EROS Data Center. [Online]. Available: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/earth-observing-1-eo-1?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. [Accessed: 10-Jun-2021].
9. MERIS instrument. [Online]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/meris>. [Accessed: 10-Jun-2021].
10. PROBA, Instruments. [Online]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/chris?text=chris+proba>. [Accessed: 10-Jun-2021].
11. Kramer, H. *Observation of the Earth and its Environment*, 4th edition. Springer Verlag, 2002.
12. Upcoming Terra Constellation Exit, MODIS, NASA. [Online]. Available: https://modis.gsfc.nasa.gov/news/individual.php?news_id=100378. [Accessed: 10-Jun-2021].
13. Prisma mission. [Online]. Available: <http://prisma-i.it/index.php/en/>. [Accessed: 10-Jun-2021].
14. Venus mission. [Online]. Available: <https://venus.cnes.fr/en/VENUS/index.htm>. [Accessed: 10-Jun-2021].
15. France-Israel space cooperation. Upcoming launch of the french-israeli Venus satellite CNES and ISA leading the way on climate action electric propulsion. [Online]. Available: <https://presse.cnes.fr/en/france-israel-space-cooperation-upcoming-launch-french-israeli-venus-satellite-cnes-and-isa-leading>. [Accessed: 24-Jun-2021].
16. DESIS instrument. [Online]. Available: <https://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-13614/>. [Accessed: 10-Jun-2021].
17. HISUI: Hyper-spectral Imager SUite. Jspace systems. [Online]. Available: https://ssl.jspacesystems.or.jp/en/project_hisui/?doing_wp_cron=1625031349.7019279003143310546875. [Accessed: 10-Jun-2021].
18. WorldView-2. [Online]. Available: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2>. [Accessed: 24-Jun-2021].
19. WorldView-3. [Online]. Available: <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-3>. [Accessed: 24-Jun-2021].
20. Maxar. [Online]. Available: <https://www.maxar.com/constellation>; <https://discover.digitalglobe.com/>. [Accessed: 24-Jun-2021].
21. EnMap. [Online]. Available: <http://www.enmap.org/>. [Accessed: 24-Jun-2021].
22. HypSPiRI Homepage. [Online]. Available: <http://hyspiri.jpl.nasa.gov/>. [Accessed: 24-Jun-2021].
23. CHIME. [Online]. Available: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/11/CHIME. [Accessed: 24-Jun-2021].
24. Copernicus expansion missions, ESA. [Online]. Available: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_expansion_missions. [Accessed: 24-Jun-2021].
25. Earth Surface Mineral Dust Source Investigation (EVI-4) (EMIT on ISS). EOS, NASA. [Online]. Available: <https://eospsa.nasa.gov/missions/earth-surface-mineral-dust-source-investigation-evi-4>. [Accessed: 24-Jun-2021].
26. Satellogic-NuSat EO (Earth Observation) Microsatellite Constellation, eoPortal Directory. [Online]. Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/satellog-1>. [Accessed: 24-Jun-2021].
27. Ward, S. *The Earth Observation Handbook*, ESA, SP-1325. CEOS, 2012.
28. Delalieux, S. B. Somers, W. W. Verstraeten, J. A. N. van Aardt, W. Keulemans, and P. Coppin, Hyperspectral indices to diagnose leaf biotic stress of apple plants, considering leaf phenology, *Int. J. Remote Sens.*, vol. 30, no. 8, pp. 1887–1912, Apr. 2009.
29. Yang, C. and J. H. Everitt, Using spectral distance, spectral angle and plant abundance derived from hyperspectral imagery to characterize crop yield variation, *Precis. Agric.*, vol. 13, no. 1, pp. 62–75, Feb. 2012.
30. Wang, F., F. Wang, Y. Zhang, J. Hu, J. Huang, and J. Xie, Rice Yield Estimation Using Parcel-Level Relative Spectral Variables From UAV-Based Hyperspectral Imagery, *Front. Plant Sci.*, vol. 10, Apr. 2019.

31. Gonzalez-Dugo, V., P. Hernandez, I. Solis, and P. Zarco-Tejada, Using High-Resolution Hyperspectral and Thermal Airborne Imagery to Assess Physiological Condition in the Context of Wheat Phenotyping, *Remote Sens.*, vol. 7, no. 10, pp. 13586–13605, Oct. 2015.
32. Zhang, X. et al., Establishment of Plot-Yield Prediction Models in Soybean Breeding Programs Using UAV-Based Hyperspectral Remote Sensing, *Remote Sens.*, vol. 11, no. 23, p. 2752, Nov. 2019.
33. Lausch, A., C. Salbach, A. Schmidt, D. Doktor, I. Merbach, and M. Pause, Deriving phenology of barley with imaging hyperspectral remote sensing, *Ecol. Modell.*, vol. 295, pp. 123–135, Jan. 2015.
34. Zhang, Z. Y. Lou, O. Moses. A, R. Li, L. Ma, and J. Li, Hyperspectral remote sensing to quantify the flowering phenology of winter wheat, *Spectrosc. Lett.*, vol. 52, no. 7, pp. 389–397, Aug. 2019.
35. Din, M. et al., Estimation of Dynamic Canopy Variables Using Hyperspectral Derived Vegetation Indices Under Varying N Rates at Diverse Phenological Stages of Rice, *Front. Plant Sci.*, vol. 9, Jan. 2019.
36. Basinger, N. T. K. M. Jennings, E. L. Hestir, D. W. Monks, D. L. Jordan, and W. J. Everman, Phenology affects differentiation of crop and weed species using hyperspectral remote sensing, *Weed Technol.*, vol. 34, no. 6, pp. 897–908, Dec. 2020.
37. Chivasa, W. O. Mutanga, and C. Biradar, Phenology-based discrimination of maize (*Zea mays* L.) varieties using multitemporal hyperspectral data, *J. Appl. Remote Sens.*, vol. 13, no. 01, p. 1, Mar. 2019.
38. Crusiol, L. G. T. et al., Classification of Soybean Genotypes Assessed Under Different Water Availability and at Different Phenological Stages Using Leaf-Based Hyperspectral Reflectance, *Remote Sens.*, vol. 13, no. 2, p. 172, Jan. 2021.
39. He, K. S., D. Rocchini, M. Neteler, and H. Nagendra, Benefits of hyperspectral remote sensing for tracking plant invasions, *Divers. Distrib.*, vol. 17, no. 3, pp. 381–392, May 2011.
40. Somers, B. and G. P. Asner, Multi-temporal hyperspectral mixture analysis and feature selection for invasive species mapping in rainforests, *Remote Sens. Environ.*, vol. 136, pp. 14–27, Sep. 2013.
41. Meerdink, S. K., D. A. Roberts, K. L. Roth, J. Y. King, P. D. Gader, and A. Koltunov, Classifying California plant species temporally using airborne hyperspectral imagery, *Remote Sens. Environ.*, vol. 232, p. 111308, Oct. 2019.
42. Wilson, J., C. Zhang, and J. Kovacs, Separating Crop Species in Northeastern Ontario Using Hyperspectral Data, *Remote Sens.*, vol. 6, no. 2, pp. 925–945, Jan. 2014.
43. Li, B. et al., 'Above-ground biomass estimation and yield prediction in potato by using UAV-based RGB and hyperspectral imaging', *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 162, pp. 161–172, Apr. 2020.
44. Yoosefzadeh-Najafabadi, M., H. J. Earl, D. Tulpan, J. Sulik, and M. Eskandari, Application of Machine Learning Algorithms in Plant Breeding: Predicting Yield From Hyperspectral Reflectance in Soybean, *Front. Plant Sci.*, vol. 11, Jan. 2021.
45. Yang, C., J. H. Everitt, and J. M. Bradford, Airborne hyperspectral imagery and linear spectral unmixing for mapping variation in crop yield, *Precis. Agric.*, vol. 8, no. 6, pp. 279–296, Dec. 2007.
46. Luo, B., C. Yang, J. Chanussot, and L. Zhang, Crop Yield Estimation Based on Unsupervised Linear Unmixing of Multidate Hyperspectral Imagery, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 51, no. 1, pp. 162–173, Jan. 2013.
47. Montesinos-López, O. A. et al., 'Predicting grain yield using canopy hyperspectral reflectance in wheat breeding data', *Plant Methods*, vol. 13, no. 1, p. 4, Dec. 2017.
48. Комитета по спътниците за наблюдение на Земята. [Online]. Available: <http://calvalportal.ceos.org/>. [Accessed: 29-Jun-2021].
49. S. G. Frédéric Baret, Marie Weiss, Denis Allard et al., 'VALERI: a network of sites and a methodology for the validation of medium spatial resolution land satellite products', *Remote Sens. Environ.*, vol. 76, no. 3, 2000.
50. Метрология за наблюдение на Земята и климат. [Online]. Available: <http://www.meteoc.org/>. [Accessed: 29-Jun-2021].
51. ESA SPectra bARrax Campaign (SPARC). [Online]. Available: <https://earth.esa.int/eogateway/campaigns/sparc>. [Accessed: 29-Jun-2021].
52. Homolová, L., Z. Malenovský, J. G. P. W. Clevers, G. García-Santos, and M. E. Schaepman, Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping, *Ecol. Complex.*, vol. 15, pp. 1–16, 2013.
53. Hatfield, J. L., A. A. Gitelson, J. S. Schepers, and C. L. Walthall, Application of spectral remote sensing for agronomic decisions, *Agron. J.*, vol. 100, no. 3 SUPPL., 2008.
54. Baret, F. and S. Buis, Estimating Canopy Characteristics from Remote Sensing Observations: Review of Methods and Associated Problems, in: *Advances in Land Remote Sensing: System, Modeling, Inversion and Application*, 2008, pp. 173–201.
55. Verrelst, J. et al., Optical remote sensing and the retrieval of terrestrial vegetation bio-geophysical properties - A review', *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 108, pp. 273–290, 2015.
56. Ganeva, D., E. Roumenina, G. Jeleu, M. Banov, V. Krasteva, and V. Kolchakov, Applicability of parametric and nonparametric regression models for retrieval of crop canopy parameters for winter rapeseed and wheat crops using Sentinel-2 multispectral data', in: *Seventh International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2019)*, 2019, no. June, p. 44.
57. Ganeva, D. and E. Roumenina, Remote estimation of crop canopy parameters by statistical regression algorithms for winter rapeseed using Sentinel-2 multispectral images, *Aerosp. Res. Bulg.*, vol. 30, pp. 75–95, 2018.
58. Ganeva, D. Semiautomatic retrieval of biomass based on Vegetation Index optimization and learning machine methods for winter rapeseed crops, in: *SES 2018 - Fourteenth International Scientific Conference - SPACE, ECOLOGY, SAFETY*, 2018, no. November 2018, pp. 299–305.