

Олег Олександрович Білобородов (канд. техн. наук, провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу)¹

Андрій Миколайович Маланчук (науковий співробітник науково-дослідної лабораторії)¹

Володимир Ілліч Присяжний (канд. техн. наук, с.н.с., професор кафедри)²

Дмитро Станіславович Завадський (науковий співробітник науково-дослідної лабораторії)¹

¹Військова частина А4566, Київ, Україна

²Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

МОДЕЛЬ РЕЄСТРАЦІЇ ВИПРОМІНЕННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЮ АПАРАТУРОЮ НА РУХОМОМУ НОСІЇ

Представлені результати удосконалення моделі реєстрації оптичного випромінювання, яка, на відміну від існуючих, базується на методі дискретизації енергії випромінювання від району знімання (еталонного зображення). Застосування удосконаленої моделі дозволяє врахувати різний час накопичення випромінювання, що надходить від різних ділянок сцени внаслідок руху носія апаратури та маневру кута сканування; прогнозувати якість матеріалів зйомки з використанням аналітичної або дискретної моделі фоноцільової обстановки в районі знімання; комплексно досліджувати вплив параметрів системи, характеристик оптико-електронної апаратури та параметрів управління процесом реєстрації оптичного випромінювання на якість отримуваних зображень.

Ключові слова: оптичне випромінювання; модель реєстрації; числовий метод інтеграції.

Вступ

Зростання можливостей автоматизованої обробки геопросторових даних дозволило суттєво підвищити якість вирішення завдань геоінформаційного забезпечення. Розширення сфери застосування результатів аерокосмічного знімання потребує удосконалення технологій реєстрації випромінювання, оптимізації параметрів інформаційного комплексу аерокосмічних систем дистанційного зондування та методів обробки оптико-електронних знімків.

Постановка проблеми. Внаслідок неоднорідного розподілу яскравості в районі знімання та руху носія апаратури енергетична освітленість в картинній площині оптичного приймача також змінюється в просторово-часовому вимірі. Кількість електронів на виході фотоелектронного перетворювача (ФЕП), що визначають корисну складову значення яскравості h -го рядка k -го стовпця сформованого зображення:

$$N_{hk} = \int_{t_h}^{t_h+t_+} \left(\iint_{(x,y) \in S_k} k_{e2n} \cdot E^P(x, y, t) dx dy \right) dt, \quad (1)$$

де $E^P(x, y, t)$ – енергетична освітленість, створювана оптичною системою в площині ФЕП, t_+ – інтервал накопичення,

k_{e2n} – коефіцієнт перетворення енергії в електрони, S_k – активна ділянка фотоелекту k -го пікселя лінійки фотоелектронних перетворювачів.

Існуючі моделі процесу реєстрації оптичного випромінювання не враховують змінний час накопичення енергії, що надходить від різних ділянок району знімання. Вони дозволяють визначати функцію передачі модуляції оптико-електронної апаратури (в статичному положенні для тестових об'єктів), але для аналізу дешифрувальних властивостей реальних

зображень їх придатність обмежена при варіюванні параметрів апаратури, умов знімання тощо. Обмеження існуючих моделей процесу реєстрації оптичного випромінювання призводять до зниження достовірності результатів обґрунтування тактико-технічних вимог до апаратури перспективних зразків техніки та забезпечувальних підсистем (обчислювального комплексу, підсистеми орієнтації і стабілізації та ін.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження процесів реєстрації оптичного випромінювання присвячені застосуванню результатів моделювання для прогнозу якості зображень [1-3], впливу на якість викривлень різної природи [4], дослідженню залежності між різними характеристиками оптико-електронних перетворювачів [5, 6]. Розглядаються процеси застосування оптико-електронної апаратури [7, 8], методи покращення результатів тематичної інтерпретації в умовах нестационарного характеру отримання видових даних [9] тощо.

При цьому недостатньо повно розглядається процес безпосереднього перетворення оптичної енергії в електричну у зразках апаратури, що встановлюється на рухомих носіях.

Мета статті. Метою статті є удосконалення моделі реєстрації оптичного випромінювання оптико-електронною апаратурою на рухомому носії, яка, на відміну від існуючих, дозволяє вирішувати (1) з урахуванням просторової і часової залежності складових.

Методи дослідження

З метою усунення недоліків існуючих моделей процесу реєстрації оптичного випромінювання пропонується (1) обчислювати багатомірною реалізацією методу прямокутників в інтервалі моделювання $[t_0, t_m]$. Для цього необхідно здійснити дискретизацію просторово-часового

розподілу енергетичної освітленості в площині ділянки окремого ФЕП.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для формалізації просторових і часових змін потоку випромінення введемо до розгляду систему координат лінійки ФЕП (рис. 1): початок координат O_e – лівий нижній кут першого елемента лінійки, ось Ox_e – вздовж лінійки, ось Oz_e – вздовж вектора O_eO_p , де O_p – проекція т. O_e на район знімання, ось Oy_e – доповнює систему до правої. Розміри елемента ФЕП складають $d_x \times d_y$, відстань між сусідніми елементами вздовж лінійки – Δd_x , кількість елементів – K .



Рис. 1. Система координат лінійки фотоелектронних перетворювачів

Для забезпечення універсальності до удосконаленої моделі висувались вимоги щодо довільних розмірів елемента ФЕП, напрямку та величини швидкості руху носія апаратури (рис. 2 а), а також можливість використання аналітичної або дискретної моделі розподілу яскравості об'єктів та фону в районі знімання (рис. 2 б):

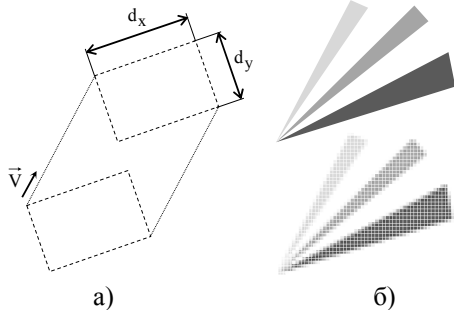


Рис. 2. Вимоги до удосконаленої моделі:
а) довільні розміри та вектор швидкості руху носія; б) аналітична або дискретна модель розподілу яскравості

Фізична сутність процесу реєстрації оптичного випромінення полягає у реалізації в окремому елементі ФЕП фотоелектричного ефекту з певного моменту t_h протягом інтервалу величиною t_+ , після чого здійснюється посилення накопиченого заряду та його перетворення до цифрового коду. Наступний інтервал накопичення починається через час ΔT ($\Delta T \geq t_+$, блоки 6, 8 алгоритму рис. 5). Кількість інтервалів накопичення (строк знімка): $N = \lfloor (t_m - t_0) / \Delta T \rfloor$, де $\lfloor \dots \rfloor$ – операція взяття цілої частки.

Для врахування нестационарного характеру потоку потужності (випромінення), що попадає на

ФЕП, інтервал накопичення розбивається на інтервали $\Delta t = t_+ / C$ (блоки 9, 10 алгоритму рис. 5), величина яких визначається необхідною точністю обчислень. Отже дискретизація за часом для довільної програми управління (рис. 3 а) реалізується зсувом на Δt моментів обчислення просторового розподілу щільності потужності на h -му інтервалі накопичення $[t_h, t_h + t_+]$ (рис. 3 б):

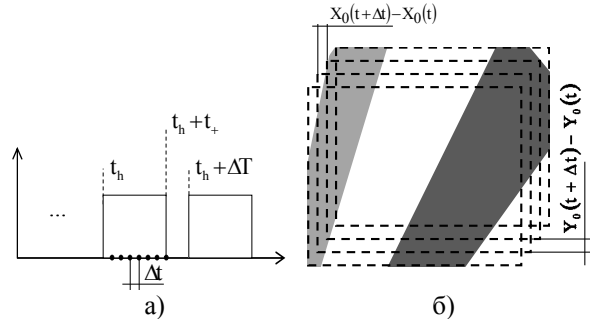


Рис. 3. Пояснення реалізації часової дискретизації: а) закон управління накопиченням; б) проекція району знімання на окремий елемент ФЕП

Просторовий розподіл щільності потужності випромінення, що попадає на ФЕП, враховується шляхом його дискретизації на осередки розміром $\delta_x \times \delta_y$ та обчислення потоку випромінення, що надходить від осередків району знімання з альбедо ρ_{ij} (рис. 4):

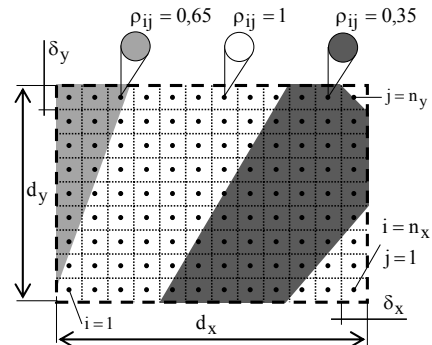


Рис. 4. Пояснення реалізації просторової дискретизації

Розміри елементарних осередків ФЕП:

$$\delta_x = d_x / n_x, \quad \delta_y = d_y / n_y, \quad (2)$$

де кількість відліків n_x та n_y визначається необхідною точністю обчислень.

Сутність роботи удосконаленої моделі реєстрації оптичного випромінення полягає у наступному: на кожному h -му інтервалі накопичення, s -му кроці циклічного алгоритму оцінюється щільність потоку потужності випромінення, що надходить від району знімання до точки з координатами (X_{ik}^e, Y_{jk}^e) k -го елемента ФЕП; обчислюється енергетична освітленість в (i, j) -му осередку ФЕП протягом інтервалу Δt та число електронів фотоелектричного ефекту. Після чого обчислення повторюються для нового розподілу поля яскравості після зсуву носія апаратури в нове положення через той же інтервал.

Наприкінці інтервалу накопичення обчислюється загальна кількість сигнальних та шумових електронів та моделюється подальше перетворення до значення числового коду (цифрового значення сигналу).

Координати центрів осередків ФЕП:

$$X_{ik}^e = (k-1) \cdot (d_x + \Delta d_x) + \frac{d_x}{n_x} \left(i - \frac{1}{2} \right),$$

$$Y_{jk}^e = \frac{d_y}{n_y} \left(j - \frac{1}{2} \right), \quad (3)$$

$$k = \overline{1, K}; \quad i = \overline{1, n_x}; \quad j = \overline{1, n_y}.$$

Зсув носія апаратури внаслідок руху враховується через зміну положення початку системи координат ФЕП в іншій СК, в якій описується просторовий розподіл яскравості в районі знімання (еталонного зображення).

Відповідні координатні перетворення здійснюються за допомогою матриці переходу $\|A^{P \leftarrow e}\|$:

$$\|X^P, Y^P\| = \|X^e, Y^e\| \cdot \|A^{P \leftarrow e}(t)\|. \quad (4)$$

Матриця переходу залежить від закону руху носія, закону управління положенням оптичної осі знімальної апаратури та плинного часу.

Результуючий знімок формується шляхом сполучення окремих строк пікселів в двомірний масив розміром $K \times N$. Блок-схема алгоритму обчислень наведена на рис. 5, де E^Σ – сумарна освітленість місцевості в діапазоні робочих довжин хвиль; ρ – альbedo ділянки місцевості;

E^0 – світність ділянки місцевості; f_e – еквівалентна фокусна відстань; D_e – ефективний діаметр вхідної зіниці; k_{atm} – коефіцієнт пропускання атмосфери; k_{os} – коефіцієнт пропускання оптичної системи; k_{n2u} – коефіцієнт перетворення електронів в напругу; U_f – напруга на виході ФЕП; k_U – коефіцієнт підсилення за напругою; U_S – напруга корисного сигналу на виході підсилювача; U_R – напруга на виході підсилювача, що відповідає середньоквадратичному значенню сумарного шуму; U_{SR} – напруга на вході аналого-цифрового перетворювача (АЦП) з урахуванням шумів; M_h – h-й рядок знімка; M – результуючий знімок.

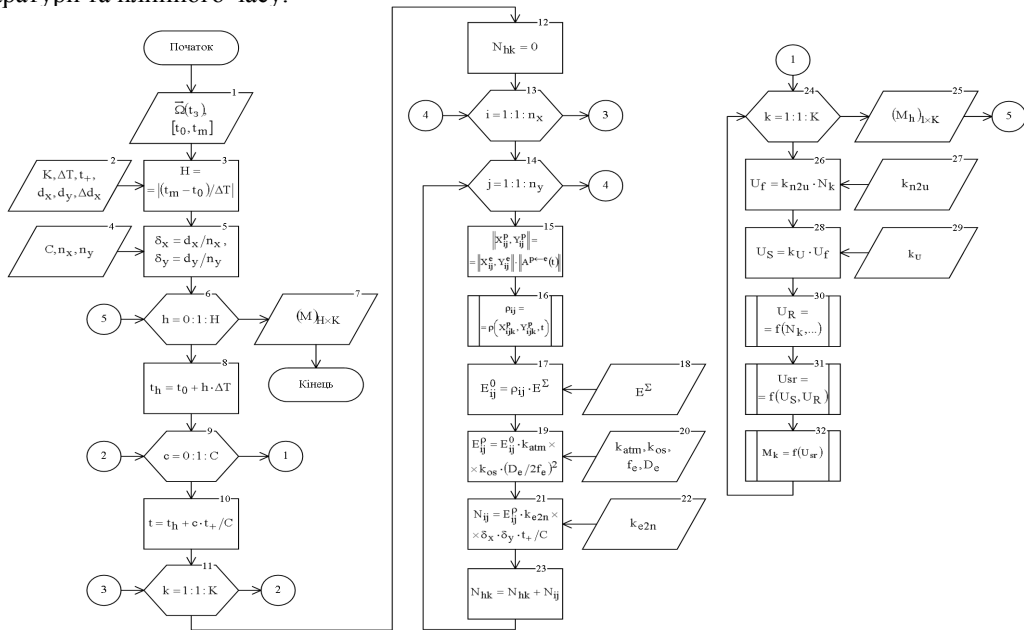


Рис. 5. Блок-схема алгоритму обчислень

Запропонована схема обчислень дозволяє враховувати особливості технологій виготовлення ФЕП, що впливають на неоднорідний характер розподілу квантової ефективності різних ділянок окремих елементів ФЕП (рис. 6), а також враховувати перехідні процеси на початку і наприкінці інтервалу накопичення. Відокремлення блоків, що обчислюють шумову складову, також дозволяє адаптувати модель до різної елементної бази та обраної електричної схеми.

Результати практичної перевірки удосконаленої моделі реєстрації оптичного випромінювання (рис. 7) підтверджують адекватність її роботи та підтверджують залежність результатів моделювання від вхідних даних та параметрів моделі.

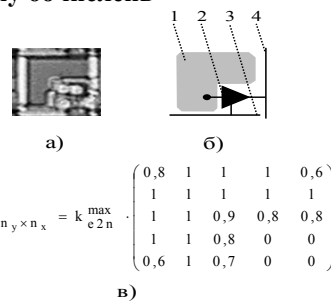


Рис. 6. Неоднорідний розподіл значення квантової ефективності в межах елемента ФЕП за технологією CMOS: а) збільшене зображення елемента; б) схема структури елемента: 1 – активна ділянка, 2 – підсилювач, 3 та 4 – електроди вибірки за стовпцями/строками; в) варіант матриці-коефіцієнта k_{e2n}

$$(k_{e2n})_{n_y \times n_x} = k_{e2n}^{\max} \cdot \begin{pmatrix} 0,8 & 1 & 1 & 1 & 0,6 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0,9 & 0,8 & 0,8 \\ 1 & 1 & 0,8 & 0 & 0 \\ 0,6 & 1 & 0,7 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

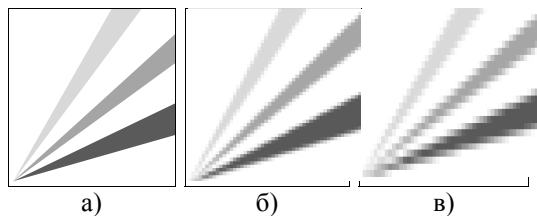


Рис. 7. Результати перевірки удосконаленої моделі реєстрації оптичного випромінювання:
 а) еталонне (векторне) зображення; б) результати моделювання при $d_y / (\Delta T \cdot V_y) = 1$; в) результати моделювання при $d_y / (\Delta T \cdot V_y) = 0,5$

Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким, чином в статті представлені результати удосконалення моделі реєстрації оптичного випромінювання, яка, на відміну від існуючих, базується на методі дискретизації енергії

Література

1. Колобродов В. Г. Визначення просторового розділення космічного сканера / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – №1. – С. 109–113. 2. Система. Описание информационной технологии. Расчет отношения сигнал / шум изображений, получаемых космической системой оптико-электронного наблюдения Земли EGYPTSAT-1. EGS YZH MAN 129 00. – 2008, – 24 с. 3. Почкін С. Оцінка радіометрії аерокосмічних зображень з використанням лінійної моделі з ваговими характеристиками / С. Почкін // Геодезія, картографія і аерофотознімання, Вип. 72, 2009 – С. 75–82. 4. Гнатушенко В. В. Геометричні моделі формування та попередньої обробки цифрових фотограмметричних зображень високого просторового розрізнення: автореф. дис. докт. техн. наук: спец. 05.01.01 “Прикладна геометрія, інженерна графіка” / Гнатушенко Володимир Володимирович; Київський національний університет будівництва і архітектури. – Київ, 2009, – 24 с. 5. Перл И. А. Направления оптимизации ФПЗС сенсоров линейного типа / И. А. Перл // Вестник ИТМО (Информационных технологий, механики и оптики). – №04 (74) – 2011 – С. 1–6. 6. Михеенко Л. А.

випромінювання від району знімання (еталонного зображення). Застосування удосконаленої моделі дозволяє:

врахувати різний час накопичення випромінювання, що надходить від різних ділянок сцени внаслідок руху носія апаратури та маневру кута сканування;

прогнозувати якість матеріалів зйомки з використанням аналітичної або дискретної моделі фоновий обстановки в районі знімання;

комплексно досліджувати вплив параметрів системи, характеристик оптико-електронної апаратури та параметрів управління процесом реєстрації оптичного випромінювання на якість отримуваних зображень.

Для обмеження обчислювальної складності при забезпеченні необхідної достовірності результатів в подальшому необхідно провести дослідження впливу параметрів моделі C , n_x та n_y на точність результатів моделювання.

Энергетическая модель цифровой видеокамеры / Л. А. Михеенко, С. А. Нечипорук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – №1, – 2011. – С. 150–157. 7. Денисов А. В. Виртуальный полигон для исследования систем дистанционного зондирования в реальных условиях эксплуатации: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.13.18 “Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ” / Денисов Андрей Васильевич; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. – Санкт-Петербург, 2012. – 24 с. 8. Горелов Ю.Н. Оптимальное управление сканированием маршрутов съемки для КА дистанционного зондирования Земли / Ю.Н. Горелов, С.Б. Данилов, А.И. Мантуров, А.В. Пермяков // Общерос. научно-технический журнал “Полет”. – № 11. – 2009. – С. 49–55. 9. Василейский А. С. Исследование методов совмещения видеоданных дистанционного зондирования: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: спец. 01.04.01 “Приборы и методы экспериментальной физики” / Василейский Александр Сергеевич; Институт космических исследований. – М., 2012, – 24 с.

МОДЕЛЬ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРОЙ НА ПОДВИЖНОМ НОСИТЕЛЕ

Олег Александрович Белобородов (канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела)¹

Андрей Николаевич Маланчук (научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории)¹

Владимир Ильич Присяжный (канд. техн. наук, с.н.с., профессор кафедры)²

Дмитрий Станиславович Завадский (научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории)¹

¹Воинская часть А4566, Киев, Украина

²Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

Существующие модели регистрации оптического излучения не учитывают динамику движения носителя оптико-электронной аппаратуры, могут использоваться для анализа съемки только определенных (тестовых) сцен и ограничены для описания процесса съемки реальных районов съемки. В статье представлены результаты усовершенствования модели регистрации оптического излучения, которая, в отличие от существующих, базируется на методе дискретизации энергии излучения от района съемки. Применение усовершенствованной модели позволяет учитывать при расчетах различное время накопления энергии излучения от различных участков сцены вследствие движения носителя аппаратуры и маневра угла сканирования, а также исследовать комплексное влияние параметров системы, характеристик аппаратуры и параметров управления процессом регистрации излучения на качество получаемых изображений.

Ключевые слова: оптическое излучение; модель регистрации; численный метод интеграции.

RADIATION RECORDING MODEL OF ELECTROOPTICAL EQUIPMENT ON MOBILE CARRIER

Oleg O. Biloborodov (Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow of a Research Section)¹

Andrii M. Malanchuk (Research Fellow of a Research Laboratory)¹

Volodymyr I. Prysiashnyi (Candidate of Technical Sciences, Senior Research Fellow, Professor of a Department)²

Dmytro S. Zavadskyi (Research Fellow of a Research Laboratory)¹

¹*Military Unit A4566, Kyiv, Ukraine*

²*National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine*

Due to the inhomogeneous luminance distribution in the area of removal and movement of sensing equipment energy lighting in the picture plane of the optical receiver is also changing in space-time dimension.

Existing registration process optical radiation do not include the time variable storing energy coming from different parts of the region removal. They allow you to determine the properties of real images descramble their usefulness is limited by varying the parameters of the equipment, conditions of removal and more. Limitations of existing models of the registration process of the optical radiation leads to a decrease in accuracy of the results justify the tactical and technical requirements for equipment of various items of security equipment and subsystems.

In order to address the deficiencies of existing models of the registration process of the optical radiation integral is suggested implementation method to calculate multidimensional rectangles in the range of simulations.

The article presents the results of model improvement registration of optical radiation, which, unlike existing ones, based on the method of sampling energy radiation from the removal area (reference image). The use of advanced models allow for the different times of radiation accumulation coming from different parts of the scene because the movement of sensing equipment; predict the quality of sensing data using analytical or discrete model luminance distribution in the removal area; comprehensively investigate the influence of system parameters and characteristics of optoelectronic devices and parameters control the registration of optical radiation on the quality of the resulting images.

References

- Kolobrodov V.G., Liholit M.I.** (2009), Determination of spatial resolution of the space scanner. [Vyznachennia prostorovoho rozdilennia kosmichnoho skanera], Naukovi visti NTUU "KPI", Kyiv, pp. 109–113.
- System.** Description of information technology. Calculation of signal / noise ratio images obtained space system optoelectronic Earth observation EGYPTSAT-1. [Sistema. Opisanie informatsionnoy tehnologii. Raschet otnosheniya signal / shum izobrazheniy, poluchaemykh kosmicheskoy sistemoy optiko-elektronnoy nablyudeniya Zemli EGYPTSAT-1], EGS YZH MAN 129 00. (2008), Dnipropetrovsk, 24 p.
- Pochkin S.** (2009), Evaluation radiometry aerospace images using linear models with weight characteristics. [Otsinka radiometrii aerokosmichnykh zobrazhen z vykorystanniam liniinoi modeli z vahovymy kharakterystykamy], Heodeziia, kartografiia i aerofotoznimannia, No. 72, pp. 75–82.
- Gnatushenko V.V.** (2009), Geometric model of preliminary processing and digital photogrammetric images of high spatial differentiation: Author's thesis [Heometrychni modeli formuvannia ta poperednoi obrobky tsyfrovnykh fohogrammnykh zobrazhen vysokoho prostorovoho rozrznennia: avtoref. dys. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.01.01 "Prykladna heometriia, inzhenerna hrafika], Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury, Kyiv, 24 p.
- Perl I.A.** (2011), Optimization direction CCD sensors linear type. [Napravleniia optimizatsii FPZS sensorov lineynogo tipa], Vestnik ITMO (Informatsionnykh tekhnologiy, mehaniki i optiki). No. 04 (74), pp. 1–6.
- Mikheenko L.A., Nechiporuk S.A.** (2011), Energy model of digital camcorder. [Energeticheskaya model tsifrovoy videokameryi] Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, No. 1, pp. 150–157.
- Denisov A.V.** (2012), Virtual ground for research of remote sensing systems in actual use: Author's thesis [Virtualnyiye poligon dlya issledovaniya sistem distantsionnogo zondirovaniya v realnykh usloviyah ekspluatatsii: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: spets. 05.13.18 "Matematicheskoe modelirovanie, chislennyye metody i kompleksyi programm"], Sankt-Peterburgskiy natsionalnyy issledovatel'skiy universitet informatsionnykh tekhnologiy, mehaniki i optiki, Sankt-Peterburg, 24 p.
- Gorelov Y.N., Danilov S.B., Manturov A.I., Permyaks A.V.** (2009), Optimal scanning control routes taken for Earth remote sensing satellite, Russia scientific and technical magazine "Flight". [Optimal'noe upravlenie skanirovaniem marshrutov s'emki dlya KA distantsionnogo zondirovaniya Zemli, Obscheros. nauchno-tehnicheskii jurnal "Polet"], Moscow, No. 11, p. 49–55.
- Vasilevsky A.S.** (2012), Investigation methods of combining remote sensing video: Author's thesis. [Issledovanie metodov sovmescheniya videodannykh distantsionnogo zondirovaniya: avtoref. dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: spets. 01.04.01 "Pribory i metody eksperimental'noy fiziki"], Moscow, 24 p.

O.O. Biloborodov: bredly@pisem.net **A.M. Malanchuk:** andry@ukr.net **V.I. Prisiagniy:** pris.vip@ukr.net

D.S. Zavadsky: zavadsky@ukr.net

Отримано: 17.07.2014 p.