

УДК 629.785

Марченко В. О., магістр (Тел.: +38 063 627 27 29. E-mail : soundhamster@ukr.net)
(Національний технічний університет України «КПІ», м. Київ)

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ЧАСТОТИ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ СИГНАЛУ ЛІНІЙНИХ ПРИЙМАЧІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРОСТОРОВУ РОЗДІЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Марченко В. О. Моделювання впливу зміни частоти дискретизації сигналу лінійних приймачів випромінювання на просторову роздільну здатність оптико-електронних систем дистанційного зондування Землі. Представлено метод підвищення просторової роздільної здатності авіаційних і космічних цифрових оптико-електронних систем (ОЕС) із технологією зйомки сканування вздовж траси типу «Pushbroom» та проведена кількісна оцінка покращення якості зображення бортових знімків. Моделювання впливу зміни частоти дискретизації сигналу на просторову роздільну здатність систем дистанційного зондування Землі за допомогою рівняння GIQUE, а також проведені дослідження залежності рівня NIIRS зображення від коефіцієнту дискретизації показали, що максимальне підвищення якості бортових знімків за допомогою методу субпіксельного зміщення сягає 1.15 NIIRS при збільшенні частоти дискретизації ПВ удвічі. Подальше збільшення частоти дискретизації не є ефективним через обмеження, які вносить модуляційна передавальна функція (МПФ) ОЕС. Перспективним напрямком наступних досліджень є застосування методів цифрового відновлення бортових зображень на базі МПФ.

Ключові слова: фотограмметрія, зондування Землі, роздільна здатність, приймач випромінювання, частота Найквіста, Pushbroom, Національна шкала оцінок інтерпретації зображень, NIIRS

Марченко В. А. Моделирование влияния изменения частоты дискретизации сигнала линейных приемников излучения на пространственную разрешающую способность оптико-электронных систем дистанционного зондирования Земли. Представлен метод повышения пространственной разрешающей способности авиационных и космических цифровых оптико-электронных систем (ОЭС) с технологией съёмки сканирование вдоль трассы типа «Pushbroom» и проведена количественная оценка улучшения качества изображения бортовых снимков. Моделирование влияния изменения частоты дискретизации сигнала на пространственную разрешающую способность систем дистанционного зондирования Земли при помощи уравнения GIQUE, а также проведенные исследования зависимости уровня NIIRS изображения от коэффициента дискретизации, показали, что максимальное повышение качества бортовых снимков при использовании метода субпиксельного смещения достигает 1.15 NIIRS при увеличении частоты дискретизации ПВ в два раза. Дальнейшее увеличение частоты дискретизации не является эффективным из-за ограничений, которые вносит модуляционная передаточная функция (МПФ) ОЭС. Перспективным направлением последующих исследований является применение методов цифрового восстановления бортовых изображений на базе МПФ.

Ключевые слова: фотограмметрия, зондирование Земли, разрешающая способность, приемник излучения, частота Найквиста, Pushbroom, Национальная шкала оценок интерпретации изображений, NIIRS

Marchenko V. O. Influence simulation of the digital signal resampling in staggered arrays on the spatial resolution of optoelectronic remote sensing systems. The current article presents a method of increasing the spatial resolution of airborne and space digital optoelectronic systems (OES) with the «Pushbroom» scanning technology, and the quantitative estimation of onboard image quality improvement. Considering the design features of Earth remote sensing (ERS) OES and parameters of photography, a general equation of image quality as a means of quantitative determination of NIIRS level was derived. Influence simulation of the digital signal resampling in staggered arrays on the spatial resolution of the ERS systems by means of the GIQUE equation, as well as undergoing research on the dependence of the image NIIRS level from the sampling coefficient, showed, that the maximum improvement of the onboard images quality due to the shifted CCD linear sensor staggering is 1.15 NIIRS providing that the linear sensors' sample rate frequency is doubled. Additional increase of the sampling frequency is not effective by the reason of limitations that the modulation transfer function (MTF) of the OES introduces. Applying methods of digital image restoration of onboard aircraft or satellites images on the basis of the MTF is a possible direction of further investigations.

Keywords: photogrammetry, Earth remote sensing, spatial resolution, staggered ccd-line arrays, Nyquist frequency, pushbroom, the National imagery interpretability rating scale, NIIRS

1. Постановка проблеми. Розвиток космічної техніки, наук про Землю та навколосемний простір, зростаючі вимоги різних галузей науки і промисловості до якісного

складу матеріалів зйомок із космосу забезпечують актуальність створення більш досконалих систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). В теперішній час найбільш активного розвитку набуває напрямок малих (вагою до 1000 кг) космічних апаратів (КА) оперативного спостереження, так як розробка і виведення таких КА на орбіту є доцільною з комерційної точки зору. Сучасні програми по ДЗЗ суттєвим чином зорієнтовані на підвищення ефективності використання космічних засобів для отримання високоякісних зображень земної поверхні. Тому одним із важливих напрямів розвитку інформаційних іконічних оптико-електронних систем (ОЕС) ДЗЗ є підвищення їх просторової роздільної здатності.

Просторова роздільна здатність зображень ДЗЗ визначається рядом параметрів і характеристик ОЕС КА, зокрема параметрами електронного тракту. В статті досліджується метод, ефективний з точки зору підвищення просторової роздільної здатності космічних цифрових ОЕС ДЗЗ із технологією зйомки сканування вздовж траси типу «Pushbroom».

Метою даної статті є дослідження та кількісна оцінка покращення якості зображення ОЕС ДЗЗ за допомогою методу субпіксельного зміщення лінійних приймачів випромінювання (ПВ). Для досягнення поставленої цілі необхідно розв'язати задачі моделювання впливу субпіксельного зміщення ПВ на просторову роздільну здатність систем ДЗЗ. Моделювання та кількісна оцінка ефективності запропонованого методу в даній статті проводиться із застосуванням Національної шкали оцінок інтерпретації зображень NIRS.

2. Матеріали і методи дослідження.

2.1. Математичне описання методу субпіксельного зміщення. Зіставлення різних систем сканування земної поверхні інформаційними іконічними ОЕС показує, що технологія зйомки сканування вздовж траси типу «Pushbroom» [1] характеризується такими перевагами як можливість неперервної побудови зображення з одночасним зменшенням маси, розмірів та енергоспоживання ОЕС КА, оскільки розкладання зображення по другій координаті здійснюється за рахунок власного руху супутника.

На Рис. 1 показана схема сканування земної поверхні за допомогою технології типу «Pushbroom» із застосуванням методу субпіксельного зміщення лінійних ПВ. Однак, використання даної системи на борту КА для задач фотограмметрії потребує забезпечення високої просторової роздільної здатності при широкому куті поля зору. Сучасні технологічні розробки надають можливість виконання цих умов шляхом використання таких широкоформатних ПВ як лінійні або матричні.

Для підвищення просторової роздільної здатності космічних цифрових ОЕС ДЗЗ із технологією зйомки типу «Pushbroom» пропонується метод позиціонування лінійних ПВ, який полягає у їх субпіксельному зміщенні перпендикулярно напрямку сканування. У лінійних ПВ іконічних ОЕС період розміщення чутливих елементів Δ_{pix} визначає частоту дискретизації зображення (Рис. 2). Величина дискретного сигналу пікселя на виході лінійного ПВ у загальному вигляді представляє собою інтеграл згортки [2] випромінювання від об'єкту та функції розсіювання точки (ФРТ) пікселя:

$$I'(x_i, y_j) = \iint I(x', y') \cdot H_{pix}(x_i - x', y_j - y') dx' dy' + \xi(x_i, y_j)$$

де $I(x', y')$ – область випромінювання від об'єкту; $H_{pix}(x, y)$ – просторова ФРТ пікселя; $\xi(x_i, y_i)$ – шуми системи зображення, тобто некорельовані випадкові числа з нульовим математичним очікуванням. Відновлення зображення полягає у визначенні яскравості об'єкту $I'(x_i, y_j)$ в межах $x_i = i \cdot \Delta_{pix}$, $y_i = j \cdot \Delta_{pix}$, $i, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

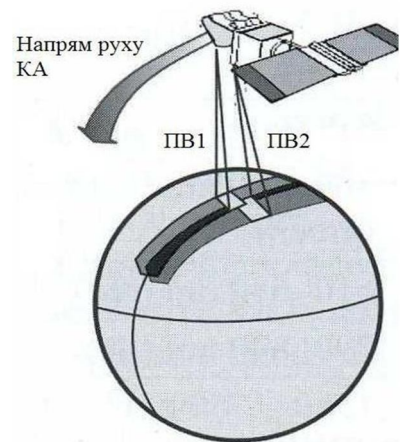


Рис. 1. Схема сканування земної поверхні

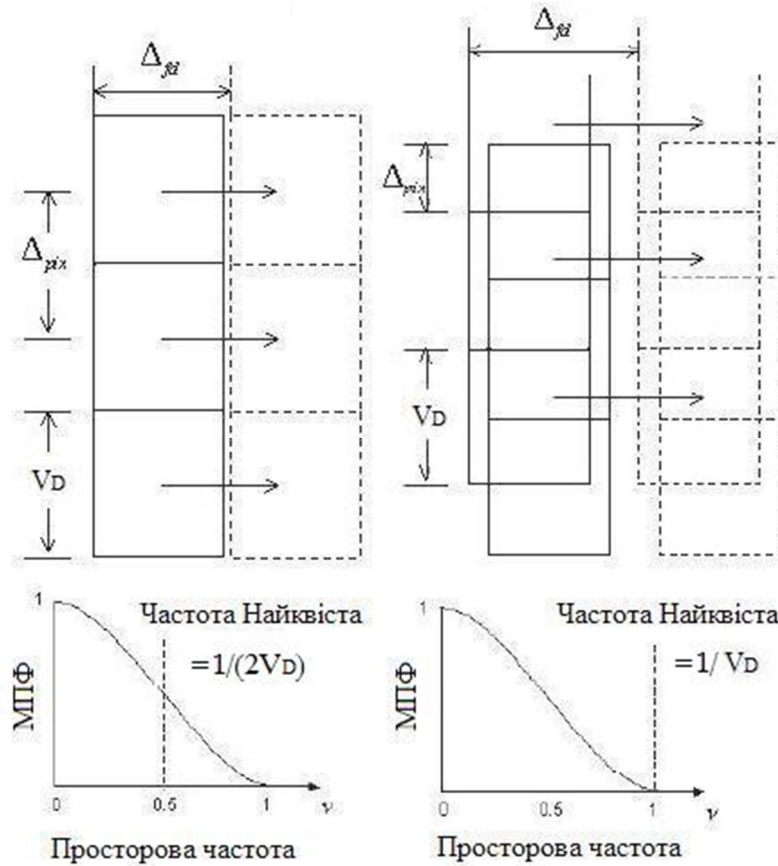


Рис. 2. Дискретизація зображення і частота Найквіста для незміщених і субпіксельно зміщених лінійних ПВ

Ефективність даного методу визначається теоремою Котельникова-Шенона [3], яка дозволяє проводити дискретизацію без втрат інформації. Згідно теореми, максимальна відтворювана частота для цифрового пристрою складає половину частоти дискретизації, тобто збільшення частоти дискретизації лінійних ПВ методом субпіксельного зміщення забезпечує можливість підвищення частоти Найквіста та відношення сигнал/шум. При цьому просторова ФРТ пікселя у загальному випадку (постійна чутливість, відсутність впливу дифузії) має вигляд:

$$H_{pix}(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{V_D} & \text{якщо } -\frac{V_D}{2} \leq (x, y) \leq \frac{V_D}{2} \\ 0, & \text{в решті випадків,} \end{cases} \quad (1)$$

де V_D – розмір пікселя ПВ.

Із графіків модуляційної передавальної функції (МПФ) пікселя (Рис. 2) та із рівняння (1) видно, що при застосуванні методу субпіксельного зміщення підвищується частота дискретизації сигналу, отже розширюються можливості передачі частот, що дозволяє ОЕС відтворювати навіть високі частоти зображення досить точно. Поновлене зображення не спотворюється низькочастотними складовими, що виникають за рахунок складання спектрів.

2.2. Моделювання підвищення просторової роздільної здатності ОЕС ДЗЗ методом субпіксельного зміщення. Моделювання й оцінку просторової роздільної здатності ОЕС ДЗЗ доцільно проводити із застосуванням Національної шкали оцінок інтерпретації

зображень NIIRS (The National Imagery Interpretability Rating Scale) [4], оскільки отриманий в результаті розрахунків коефіцієнт інтерпретації NIIRS надає можливість досить точного визначення якості зображення. Очікуваний рівень NIIRS для систем ДЗЗ визначає головне рівняння якості зображення GIQUE (General Image Quality Equation) як функцію масштабу, різкості зображення або просторового розділення та відношення сигнал/шум. Для ОЕС видимого діапазону GIQUE-модель описується рівнянням:

$$NIIRS = 10.251 - a \cdot \log_{10} GSD_{GM} + b \cdot \log_{10} RER_{GM} - 0.656 \cdot H_{GM} - 0.344 \cdot \frac{G}{SNR} \quad (2)$$

де GSD_{GM} – середнє геометричне ширини миттєвого поля зору; RER_{GM} – середнє геометричне відношення граничного відгуку; H_{GM} – середнє геометричне перерегулювання, викликане підвищенням граничної різкості; G – підвищення результуючого шуму, зумовленого граничною різкістю; SNR – відношення сигнал/шум; a і b – коефіцієнти, які визначаються як $a = 3.32$ і $b = 1.559$, якщо $RER_{GM} \geq 0.9$; $a = 3.16$ і $b = 2.817$, якщо $RER_{GM} < 0.9$. З рівняння (2) видно, що рівень NIIRS суттєво залежить від параметру GSD_{GM}

2.3. Середнє геометричне ширини миттєвого поля зору GSD_{GM} визначається шляхом усереднення розміру миттєвого поля зору GSD у двох напрямках площини об'єкту, яка знаходиться на відстані H від ОЕС [3].

$$GSD_{GM} = \sqrt{GSD_x \cdot GSD_y \cdot \sin \alpha} \quad (3)$$

де α – кут між повздовжнім і поперечним напрямками сканування. Розмір миттєвого поля зору у поперечному напрямі GSD_x (Рис. 3) визначається як

$$GSD_x = \frac{V_D}{f'} \cdot H, \quad \text{де } f' \text{ – фокусна відстань оптичної системи.}$$

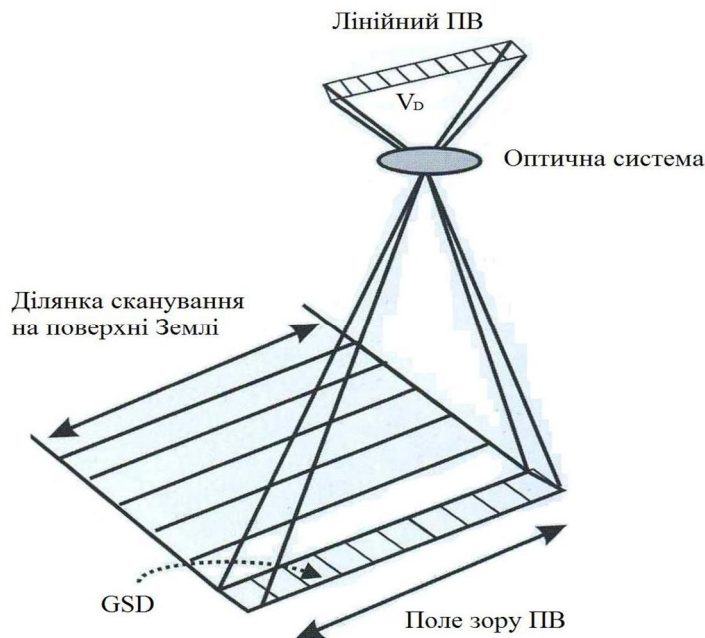


Рис. 3. Проекція розміру пікселя ПБ через оптичну систему на площину об'єкта

Для ОЕС ДЗЗ відстань H до об'єкту на земній поверхні визначається з урахуванням нахилу висоти КА:

$$H = \left[(R + h)^2 - R^2 \cdot \cos^2(ISEL) \right]^{1/2} - R \cdot \sin(ISEL) \quad (4)$$

де R – середній радіус Землі [5]; h – висота КА; $ISEL$ (кут висоти КА) – кут між прямою від об'єкту на поверхні Землі до КА та дотичної до Землі в точці розміщення об'єкту.

Отже, рівняння для визначення GSD_{GM} :

$$GSD_{GM} = \sqrt{GSD_x \cdot GSD_y} = \frac{V_D \cdot H}{f'} \cdot \sqrt{\cos^2(\beta) + \left[\frac{\sin(\beta)}{\sin(ISEL)} \right]^2} \cdot \sqrt{\sin^2(\beta) + \left[\frac{\cos(\beta)}{\sin(ISEL)} \right]^2} \quad (5)$$

де β – кут між напрямом лінійного ПВ та перпендикуляром до лінії візування.

Із формул (1) і (5) видно, що при застосуванні методу субпіксельного зміщення лінійних ПВ, зі збільшенням частоти дискретизації у два рази, зменшиться значення V_D і, відповідно, значення GSD_{GM} , що вплине на підвищення рівня NIIRS, а отже, на покращення просторової роздільної здатності ОЕС ДЗЗ.

2.4. Приклад розрахунку просторової роздільної здатності ОЕС ДЗЗ за GIQUE. Для кількісної оцінки покращення якості зображення ОЕС ДЗЗ за допомогою методу субпіксельного зміщення лінійних ПВ, був проведений розрахунок рівня NIIRS за моделлю GIQUE. Для розрахунку прийняті такі початкові умови: робочий спектральний діапазон $\lambda_1.. \lambda_2 = 0.4..0.78 \mu\text{км}$; висота орбіти КА $h = 650 \text{ км}$; кут висоти КА $ISEL = 90^\circ$ (зйомка в надир); кут візування $\beta = 0$; фокусна відстань оптичної системи $f' = 1800 \text{ мм}$; середнє геометричне відношення граничного відгуку $RER_{GM} \approx 0.6$; середнє геометричне перерегулювання $H_{GM} = 1.1$; в якості ПВ використовується ПЗЗ-лінійка Dalsa IL-P3-2048 з кількістю елементів $N = 2048$, коефіцієнтом заповнення майже 100% і розмірами пікселів $V_D \times W_D = 14 \times 14 \mu\text{км}^2$.

Відповідно до сказаного вище:

1. Відстань до об'єкту на земній поверхні знаходимо за формулою (4):

$$H = \left[(6371.032 + 650)^2 - 6371.032^2 \cdot \cos^2(90^\circ) \right]^{\frac{1}{2}} - 6371.032 \cdot \sin(90^\circ) = 650 \text{ км}.$$

2. Розрахуємо за формулою (5) середнє геометричне ширини миттєвого поля зору GSD_{GM} :

$$GSD_{GM} = \frac{14 \cdot 650}{1800} \cdot \sqrt{\cos^2(0) + \left[\frac{\sin(0)}{\sin(90^\circ)} \right]^2} \cdot \sqrt{\sin^2(0) + \left[\frac{\cos(0)}{\sin(90^\circ)} \right]^2} = 5 \text{ м}.$$

3. Підставляючи дані у рівняння (2), отримуємо значення рівня NIIRS ОЕС ДЗЗ при заданих умовах роботи. Прийmemo до уваги, що на великих відстанях параметр $\frac{G}{SNR}$ близький до нуля. Коефіцієнти обрані відповідно до умови, що $RER_{GM} < 0.9$.

$$NIIRS_1 = 10.251 - 3.16 \cdot \log_{10} 5 + 2.817 \cdot \log_{10} 0.6 - 0.656 \cdot 1.1 = 6.7.$$

4. Із рівняння (5) видно, що при застосуванні методу субпіксельного зміщення з коефіцієнтом дискретизації 2, розмір чутливого елемента ПВ становитиме $V_D / 2 = 7 \mu\text{км}$, і середнє геометричне ширини миттєвого поля зору GSD_{GM} , відповідно, зменшиться вдвічі. Отже, в даному випадку, за умови застосування методу субпіксельного зміщення ПВ, рівень NIIRS збільшується в 1.15 разу:

$$NIIRS_2 = 10.251 - 3.16 \cdot \log_{10} 2.5 + 2.817 \cdot \log_{10} 0.6 - 0.656 \cdot 1.1 = 7.7.$$

Результати чисельного моделювання представлені на Рис. 4а. Зі зменшенням значення GSD_{GM} , підвищується рівень NIIRS, а отже, покращується просторова роздільна здатність.

З Рис. 4б видно, що можливість підвищення рівня NIIRS зростає зі збільшенням обраного коефіцієнту дискретизації при застосуванні методу субпіксельного зміщення.

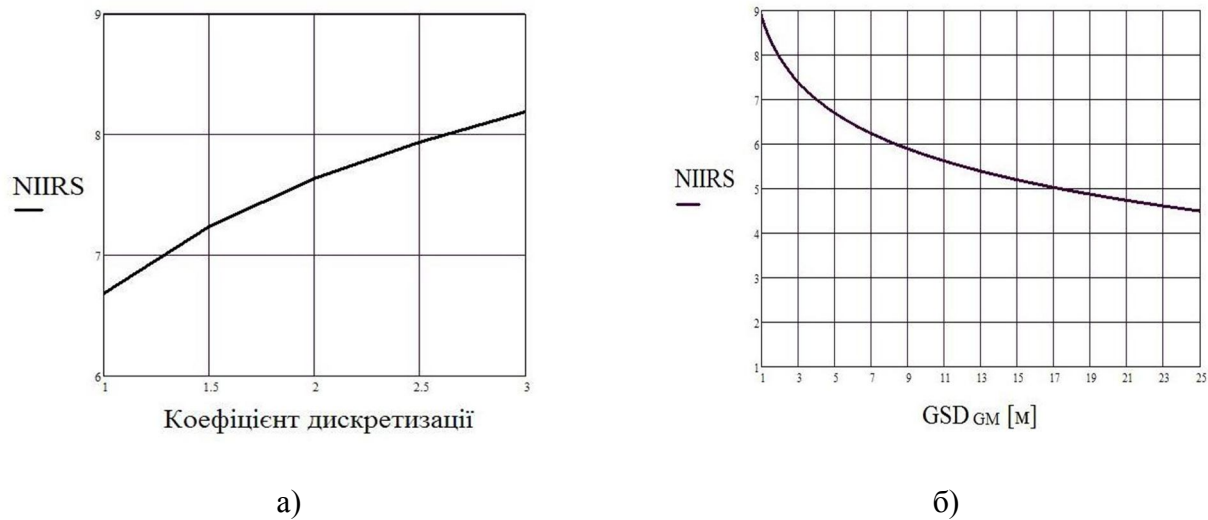


Рис. 4. Результати чисельного моделювання
 а) – залежність рівня NIIRS ОЕС ДЗЗ від ширини миттєвого поля зору
 б) – оцінка підвищення рівня NIIRS методом субпіксельного зміщення

3. Висновки. Проведені дослідження показали, що збільшення частоти дискретизації сигналу ОЕС ДЗЗ за допомогою методу субпіксельного зміщення лінійних ПВ надає можливість підвищення просторової роздільної здатності, а отже, покращення якості зображення. Це здійснюється завдяки розширенню можливостей передачі високих просторових частот сигналу, в результаті чого поновлене зображення не спотворюється низькочастотними складовими, що виникають за рахунок складання спектрів. Проведене моделювання за допомогою рівняння GIQUE і розрахунки залежності рівня NIIRS зображення від коефіцієнту дискретизації надали можливість кількісної оцінки підвищення просторової роздільної здатності ОЕС в залежності від розміру миттєвого поля зору у площині об'єкта. Наведені розрахунки показали, що за допомогою запропонованого методу, при збільшенні дискретизації ПВ удвічі, відбувається покращення зображення у 1.15 разу. Подальше збільшення дискретизації не є ефективним через обмеження, які вносить МПФ ОЕС і її вплив на складові рівняння.

Перспективним напрямком наступних досліджень із підвищення якості бортових знімків є застосування методів цифрового відновлення отриманих зображень на базі МПФ.

Література

1. Remote sensing from air and space / by R. C. Olsen p. см. – (SPIE Press Monograph; 162) G70.4.O47 2006.
2. Прэрт У. Цифровая обработка изображений. Кн. 1 / У. Прэрт ; пер. с англ. – Москва : Мир, 1982. – 312 с.
3. Encyclopedia of Optical Engineering / By Ronald G. Driggers. – Vol. 1. – Adelphi, Maryland, U.S.A. : U.S. Army Research Laboratory.
4. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – Київ : НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.
5. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. – Москва : Советская энциклопедия, 1988.