

УДК 621: 681.7

**ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ  
ЗЕМЛІ НАДВИСОКОЇ РОЗДІЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ**

Тягур В. М.

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського”, м. Київ, Україна**E-mail: tyagurvm@ukr.net*

*В роботі розглянуті існуючі оптико-електронні системи дистанційного зондування Землі з космосу надвисокої роздільної здатності. Проаналізовані схеми побудови об'єктивів, їх переваги і недоліки.*

**Ключові слова:** оптико-електронні системи дистанційного зондування Землі надвисокої роздільної здатності, тридзеркальний анастигмат, об'єктив Корша.

**Вступ**

За останні 10-15 років оптико-електронні системи (ОЕС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) надвисокої роздільної здатності стали основними джерелами отримання детальної інформації з космосу. Зазвичай, супутники ДЗЗ літають на сонячно-синхронних кругових орбітах висотою 600-800 км і нахилом площини орбіти до площини екватора приблизно  $98^\circ$ . Така орбіта дозволяє пролітати над тім ж самим об'єктом на поверхні Землі в один і той же сонячний час, що створює однакові умови освітлення об'єкта при різних проходах супутника над об'єктом. Просторова розрізненість таких систем складає менше 1 м [1]. Іноді таку просторову розрізненість досягають зменшенням висоти орбіти, але такий шлях має певні труднощі в реалізації і використовується не так часто. Однією з важливих тенденцій розвитку КА ДЗЗ є зменшення їх габаритів і ваги без погіршення характеристик системи. Це значно скорочує строки і ціну створення та запуску таких малих апаратів.

**Огляд існуючих ОЕС ДЗЗ надвисокої роздільної здатності**

Комерційний супутник “Ikonos-2”, який було запущено у 1999 р., відкрив нову еру в цивільному комерційному спостереженні Землі з просторовою розрізненістю 1 м. Його було запущено на сонячно-синхронну кругову орбіту висотою 681 км, нахил якої складає  $98,1^\circ$ . При гарантійному терміні експлуатації 7 років він уже понад 15 років працює на орбіті. ОЕС для нього була сконструйована і виготовлена компанією «Kodak Co.». Вона забезпечує проєкцію пікселя на Землі (GSD – ground sampling distance)  $P=0,82$  м в панхроматичному спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$  мкм, та  $P=3,2$  м в чотирьох спектральних діапазонах ( $\Delta\lambda_1=0,45-0,53$  мкм;  $\Delta\lambda_2=0,52-0,61$  мкм;  $\Delta\lambda_3=0,64-0,72$  мкм;  $\Delta\lambda_4=0,76-0,86$  мкм) при ширині смуги захвату 11 км.

Оптичну схему було побудовано на базі тридзеркального анастигматичного об'єктива Корша з фокусною відстанню 10000 мм, світловою апертурою головного дзеркала 700 мм, відносним отвором 1:14,3 і полем зору  $2\omega=0,93^\circ$ . ОЕС працює як «push-broom» сканер і в якості фотоприймачів використовуються ПЗЗ-лінійка з 13500 пікселями розміром  $12\times 12$  мкм і можливістю часової затримки накопичування (TDI – time delay integration) для панхроматичного каналу і ПЗЗ-лінійка з 3375 пікселями розміром  $48\times 48$  мкм для чотирьох спектральних каналів, конструктивно розмішених в одному корпусі. Вага ОЕС складає 171 кг, габарити  $\varnothing 0,8\times 1,53$  м, а споживана потужність 350 W. [2]

В 2001 р. на сонячно-синхронну орбіту висотою 450 км було запущено супутник ДЗЗ “Quick Bird-2” американської компанії “Digital Globe”. ОЕС VHRC-60 (Ball's High Resolution Camera) американської компанії «Ball Aerospace & Technologies Corp.» при висоті орбіти 681 км забезпечувала б  $P=0,93$  м в панхроматичному спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$  мкм, та  $P=3,7$  м в чотирьох спектральних діапазонах ( $\Delta\lambda_1=0,45-0,53$  мкм;  $\Delta\lambda_2=0,52-0,6$  мкм;  $\Delta\lambda_3=0,63-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_4=0,76-0,9$  мкм) при ширині смуги захвату 25 км. Об'єктив VHRC-60 представляє собою позаосьовий тридзеркальний анастигматичний об'єктив без екранування вхідної зіниці з фокусною відстанню 8800 мм, світловою апертурою головного дзеркала 600 мм, відносним отвором 1:14,7 і полем зору  $2\omega=2,12^\circ$ . Вузол фокальної площини (ВФП) складають ПЗЗ-лінійки аналогічні тим, що застосовуються в “Ikonos-2”, і складають довжину 27000 пікселів для панхроматичного каналу і 6700 пікселів для спектральних каналів. Вага ОЕС складає 380 кг, габарити  $1,15\times 1,41\times 1,95$  м, а споживана потужність 430 W [3].

Компанія “Digital Globe” є комерційним оператором декількох супутників ДЗЗ надвисокої роздільної здатності. Крім супутників “Quick Bird-2” та “Ikonos-2” вона запустила на орбіту ще ряд супутників з дуже високими характеристиками. Це і “WorldView-1”, який використовує той самий об’єктив, що було встановлено на “Quick Bird-2” але тільки з одним панхроматичним спектральним каналом, “WorldView-2”, “WorldView-3” та “GeoEye”. “WorldView-2” було запущено в 2009 р. на орбіту висотою 770 км. Цей супутник відкрив нову еру в комерційних системах ДЗЗ своєю здатністю робити знімки з просторовим розрізненням менш ніж 0,5 м. При висоті орбіти 681 км він забезпечував би  $P=0,41$  м в панхроматичному спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,8$  мкм, та  $P=1,64$  м в восьми спектральних діапазонах ( $\Delta\lambda_1=0,40-0,45$  мкм;  $\Delta\lambda_2=0,45-0,51$  мкм;  $\Delta\lambda_3=0,51-0,58$  мкм;  $\Delta\lambda_4=0,585-0,625$  мкм;  $\Delta\lambda_5=0,63-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_6=0,705-0,745$  мкм;  $\Delta\lambda_7=0,77-0,895$  мкм;  $\Delta\lambda_8=0,86-1,04$  мкм;) при ширині смуги захвату 16,4 км. Об’єктив було розроблено і виготовлено компанією “ITT Corporation's Space Systems” по схемі Корша з фокусною відстанню 13300 мм, світловою апертурою головного дзеркала 1100 мм, відносним отвором 1:12 і полем зору  $2\omega=1,28^\circ$ . В фокальній площині розміщені TDI ПЗЗ-лінійки з розміром пікселя  $8\times 8$  мкм для панхроматичного каналу і  $32\times 32$  мкм для спектральних каналів. Висота об’єктива складає 3 м [4]. В 2014 р. компанія запустила ще один супутник “WorldView-3” на орбіту висотою 617 км. На супутнику встановлено той самий об’єктив, що і на “WorldView-2”, але завдяки меншій висоті супутник має просторове розрізнення  $P=0,31$  м в панхроматичному каналі і  $P=1,24$  м в восьми спектральних каналах. Крім того сканер має додатково вісім короткохвильових інфрачервоних каналів від 1,2 мкм до 2,4 мкм з просторовим розрізненням  $P=3,7$  м [5].

В 2006 р. на сонячно-синхронну орбіту висотою 500 км було запущено супутник “EROS-B”, який розроблено ізраїльською компанією “Israel Aircraft Industries”. При висоті орбіти 681 км він забезпечував би  $P=0,91$  м в панхроматичному спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_{PAN}=0,5-0,9$  мкм при ширині смуги захвату 9 км. Телескоп для ОЕС розроблено фірмою “EIOp” (Electro Optical Industries) по схемі об’єктива Річі-Кретьєна, Він має фокусну відстань 8250 мм, світлову апертуру головного дзеркала 500 мм, відносний отвір 1:16,5 і поле зору  $2\omega=0,8^\circ$ . Поле зору формують дві TDI ПЗЗ-лінійки по 10151 пікселю розміром  $11\times 11$  мкм [6].

Супутник “GeoEye-1”, відомий також як «Orb View-5», компанії “GeoEye” було запущено в 2007 р. на сонячно-синхронну орбіту висотою 684 км. Сканер для нього розроблено і виготовлено компанією «ITT Space Systems Division», яка була відокремлена від «Kodak Co.».

Він забезпечує  $P=0,41$  м в панхроматичному спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$  мкм, та  $P=1,64$  м в чотирьох спектральних діапазонах ( $\Delta\lambda_1=0,45-0,51$  мкм;  $\Delta\lambda_2=0,52-0,58$  мкм;  $\Delta\lambda_3=0,655-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_4=0,78-0,92$  мкм) при ширині смуги захвату 15,2 км. Оптична схема об’єктива побудована на базі тридзеркального анастигматичного об’єктива Корша з фокусною відстанню 13300 мм, світловою апертурою головного дзеркала 1100 мм, відносним отвором 1:12,1 і полем зору  $2\omega=1,28^\circ$ . Необхідну смугу захвату формують ПЗЗ-лінійки з сумарною кількістю пікселів 35000 розміром  $8\times 8$  мкм в панхроматичному каналі, та по 9300 пікселів розміром  $32\times 32$  мкм в кожному спектральному каналі. ПЗЗ-лінійки, як для панхроматичного, так і для спектральних каналів виконані по технології TDI, а, крім того, ПЗЗ-лінійки спектральних каналів розташовані в одному корпусі. Вага ОЕС складає 452 кг, габарити  $\varnothing 1,5\times 3$  м [7].

В 2007, 2008 та 2010 роках було запущено серію індійських супутників ДЗЗ “CartoSat-2”, “CartoSat-2A” і “CartoSat-2B”. Висота орбіти складає 635 км. З висоти орбіти 680 км вони забезпечують проекцію пікселя на Землі  $P=0,85$  м в панхроматичному спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,85$  мкм при ширині смуги захвату 9,6 км. В сканері використовується об’єктив Річі-Кретьєна з фокусною відстанню 5600 мм, світловою апертурою головного дзеркала 700 мм, відносним отвором 1:8 і полем зору  $2\omega=0,87^\circ$ . В якості фотоприймача використовується ПЗЗ-лінійка з 12288 пікселями розміром  $7\times 7$  мкм. Вага ОЕС складає 120 кг, габарити  $\varnothing 0,76\times 1,6$  м, а споживана потужність 60 W. [8]

Корейський супутник ДЗЗ “Kompsat-2”, який було розроблено “Korea Aerospace Research Institute”, було запущено в 2006 р. на орбіту висотою 685 км. Він забезпечує проекцію пікселя  $P=1$  м в панхроматичному каналі  $\Delta\lambda_{PAN}=0,5-0,9$  мкм і  $P=4$  м в чотирьох спектральних діапазонах ( $\Delta\lambda_1=0,45-0,52$  мкм;  $\Delta\lambda_2=0,52-0,6$  мкм;  $\Delta\lambda_3=0,63-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_4=0,76-0,9$  мкм) при ширині смуги захвату 15 км. Багатоспектральний сканер було розроблено “Korea Aerospace Research Institute” спільно з ізраїльською компанією «EIOp» і німецькою «ОНВ-System». Об’єктив розроблено по схемі Річі-Кретьєна з фокусною відстанню 9000 мм для панхроматичного каналу і 2250 мм для спектральних каналів. Він має головне дзеркало діаметром 600 мм, відносний отвір 1:15 для панхроматичного каналу та 1:3,75 для спектральних каналів і поле зору  $1,25^\circ$ . Різниця фокусних відстаней для панхроматичного і спектральних каналів досягається використанням різних лінзових систем, які розташовані перед фокальною площиною двох дзеркального об’єктива. У панхроматичному каналі

використовуються 3 ПЗЗ-лінійки по 5200 пікселів розміром  $13 \times 13$  мкм, виконаних по технології TDI і чотири ПЗЗ-лінійки по 5200 пікселів розміром  $13 \times 13$  мкм для спектральних каналів. Вага сканеру 350 кг, споживана потужність 350 W. [9, 10]

В 2011 р. і в 2012 р. на орбіту висотою 694 км було запущено французькі космічні апарати ДЗЗ «Pleiades-1A» та «Pleiades-1B». Вони забезпечують  $P=0,7$  м в панхроматичному спектральному діапазоні  $\Delta\lambda_{PAN} = 0,48-0,82$  мкм, та  $P = 2,8$  м в чотирьох спектральних діапазонах ( $\Delta\lambda_1 = 0,45-0,53$  мкм;  $\Delta\lambda_2 = 0,51-0,59$  мкм;  $\Delta\lambda_3 = 0,62-0,7$  мкм;  $\Delta\lambda_4 = 0,775-0,915$  мкм) при ширині смуги захвату 20 км. Телескоп, який було розроблено фірмою «Alcatel Alenia Space» по схемі Корша, має фокусну відстань 12905 мм, світлову апертуру головного дзеркала 650 мм, відносний отвір 1:20 і поле зору  $1,65^\circ$ . Вузол фокальної площини містить п'ять TDI ПЗЗ-лінійок e2v CCD98-50s по 6000 пікселів розміром  $13 \times 13$  мкм для панхроматичного каналу і п'ять чотирьох спектральних ПЗЗ-лінійок AT71554 по 1500 пікселів розміром  $52 \times 52$  мкм. Вага ОЕС складає 195 кг, габарити  $2,24 \times 1,6 \times 0,98$  м, а споживана потужність 400 W [11].

В 2012 р. було запущено корейський супутник «Kompasat-3», а в 2015 р. його двійник «Kompasat-3A». Висота орбіти «Kompasat-3» 685 км, а «Kompasat-3A» – 528 км. «Kompasat-3» забезпечує проєкцію пікселя  $P = 0,7$  м в панхроматичному каналі  $\Delta\lambda_{PAN} = 0,45-0,9$  мкм і  $P = 2,8$  м в чотирьох спектральних каналах ( $\Delta\lambda_1 = 0,45-0,52$  мкм;  $\Delta\lambda_2 = 0,52-0,6$  мкм;  $\Delta\lambda_3 = 0,63-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_4 = 0,76-0,9$  мкм) при ширині смуги захвату 15 км. Об'єктив сканера побудовано на базі об'єктива Корша з допоміжним вигнутим асферичним четвертим дзеркалом. Об'єктив має фокусну відстань 8600 мм, світлову апертуру головного дзеркала 750 мм, відносний отвір 1:11,5 та поле зору  $1,25^\circ$ . Поле зору панхроматичного каналу формують дві TDI ПЗЗ-лінійки CCD10121 по 12288 пікселів розміром  $8,75 \times 8,75$  мкм, а поле зору спектральних каналів формують 8 TDI ПЗЗ-лінійок по 6000 пікселів розміром  $2 \times 17,5$  мкм. Вага сканера складає 80 кг а габарити  $\varnothing 1,3 \times 2,1$  м [12].

Японія має два супутника ДЗЗ з апаратурою надвисокої роздільної здатності. Це супутник «ASNARO», який було запущено в 2014 р. та «ALOS-3», який буде запущено в 2016 році. «ASNARO» запущено на орбіту висотою 504 км і з цієї висоти він забезпечує проєкцію пікселя  $P=0,5$  м в панхроматичному каналі і  $P=2$  м в шістьох спектральних каналах при ширині смуги захвату 10 км. Сканер з об'єктивом Корша було виготовлено фірмою NEC and NTSpace (NEC Toshiba Space Systems Ltd.). Вага ОЕС складає 97 кг, а споживана потужність 140 W [13].

Висота орбіти супутника «ALOS-3» буде 618 км. ОЕС «PRISM-2» (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping-2) забезпечує

просторове розрізнення в пан хроматичному каналі  $\Delta\lambda_{PAN}=0,52-0,77$  мкм  $P=0,8$  м при ширині смуги захвату 50 км. В фокальній площині тридзеркального позаосьового об'єктива встановлено вісім TDI ПЗЗ-лінійок, які разом складають смугу з 65000 пікселів. Головне дзеркало об'єктива має розміри  $0,9 \text{ м} \times 0,6 \text{ м}$  [14].

В 2006 р. Росія запустила супутник ДЗЗ «Ресурс-ДК». Його особливістю є еліптична орбіта з висотами від 350 км до 610 км. З висоти 350 км лінзовий об'єктив з фокусною відстанню 4000 мм і діаметром 500 мм забезпечує в панхроматичному каналі просторове розрізнення  $P=1$  м і  $P=3$  м в трьох спектральних каналах при ширині смуги захвату 28 км. Маса сканера складає 310 кг [15].

В 2014 р. Китай теж вивів на орбіту висотою 631 км супутник «Gaofen-2» з ОЕС надвисокого просторового розрізнення. На супутнику встановлено два сканера для збільшення смуги захвату до 45 км, кожен з яких забезпечує в панхроматичному каналі  $\Delta\lambda_{PAN} = 0,45-0,9$  мкм просторове розрізнення  $P = 0,81$  м і  $P = 3,24$  м в чотирьох спектральних каналах ( $\Delta\lambda_1 = 0,45-0,52$  мкм;  $\Delta\lambda_2 = 0,52-0,59$  мкм;  $\Delta\lambda_3 = 0,63-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_4 = 0,77-0,89$  мкм) при ширині смуги захвату 22,5 км. Об'єктив побудовано по схемі осьового трилінзового анастигматичного об'єктива ТМА (Three Mirror Anastigmatic) з фокусною відстанню 7800 мм, світловим діаметром головного дзеркала 520 мм, відносним отвором 1:15 і кутом поля зору  $2\omega=2,1^\circ$ . Габаритні розміри двох камер складають  $1500 \times 700 \times 1000$  мм, вага 300 кг, а споживана потужність 280 W [16].

ОЕС HiRAIS (High Resolution Advanced Imaging System), що була розроблена в SI (Satrec Initiative) Daejeon, Korea, була встановлена на супутнику «DubaiSat-2» Об'єднаних Арабських Еміратів, який було запущено в 2013 р. [17], та на іспанському супутнику «Deimos-2», який було запущено в 2014 р. [18]. ОЕС HiRAIS забезпечує з висоти орбіти 600 км просторове розрізнення  $P=1$  м в панхроматичному каналі  $\Delta\lambda_{PAN}=0,55-0,9$  мкм та  $P=4$  м в чотирьох спектральних діапазонах ( $\Delta\lambda_1=0,45-0,52$  мкм;  $\Delta\lambda_2=0,52-0,59$  мкм;  $\Delta\lambda_3=0,63-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_4=0,77-0,89$  мкм). Об'єктив побудовано по удосконаленій схемі Корша з фокусною відстанню 5700 мм, світловим діаметром головного дзеркала 420 мм, відносним отвором 1:14,25, кутом поля зору  $2\omega=1,2^\circ$  та шириною смуги захвату 12 км.

В 2009 р. четверо студентів з Стенфордського університету створили компанію Skybox Imaging Inc. та розробили та запустили серію комерційних мікросупутників «SkySat» для комерційного дистанційного спостереження Землі. КА «SkySat-4, 5, 6, 7» було запущено на орбіту висотою 695 км в 2016 р. ОЕС забезпечує в панхроматичному каналі  $\Delta\lambda_{PAN}=0,45-0,9$  мкм просторове розрізнення  $P=0,9$

м і  $P=2$  м в чотирьох спектральних каналах ( $\Delta\lambda_1=0,45-0,52$  мкм;  $\Delta\lambda_2=0,52-0,59$  мкм;  $\Delta\lambda_3=0,61-0,69$  мкм;  $\Delta\lambda_4=0,74-0,9$  мкм) при ширині смуги захвату 8 км. Об'єкти побудовано по схемі Річі-Кретьєна з фокусною відстанню 3600 мм в фокальній площині якого розташовано три CMOS матриці розміром  $2560 \times 2160$  і розміром пікселя 6,5 мкм. Верхні половинки матриць працюють в панхроматичному спектральному діапазоні, а нижні половинки покриті чотирма стрічковими фільтрами для роботи в спектральних каналах [19].

### **Об'єкти систем ДЗЗ надвисокої роздільної здатності**

Оптичні схеми об'єктів ОЕС дистанційного зондування Землі надвисокої роздільної здатності можна поділити на лінзові, дзеркальні і дзеркально-лінзові.

#### **Лінзові об'єктиви**

Для забезпечення розрізнення на поверхні Землі менше 1 метра фокусна відстань об'єктива повинна бути від 5 метрів до 9 метрів в залежності від розміру пікселя ПЗЗ-лінійки. Це накладає певні труднощі при створенні лінзового об'єктива. По-перше, лінзовий телеоб'єктив має довжину більш ніж 0,6 фокусної відстані, тобто його довжина буде від 3 метрів до 5,5 метрів. По-друге, діаметр лінз об'єктива досягає від 500 мм до 800 мм, що робить дуже складним отримання заготовки з скла необхідної якості, а також виготовлення самих лінз. Крім того вага лінзового об'єктива набагато більша за дзеркальний об'єктив. По-третє, в довгофокусних лінзових об'єктивах майже неможливо повністю виправити хроматичні аберації, що приводить до зниження контрасту в зображенні і якості знімків. По-четверте, лінзові об'єктиви дуже чутливі до умов експлуатації і потребують особливо жорстких вимог до забезпечення теплового режиму [20]. Саме тому лінзовий об'єктив використано тільки в російському супутнику ДЗЗ "Ресурс-ДК".

#### **Дзеркально-лінзові об'єктиви**

Довгофокусні дзеркально-лінзові об'єктиви зазвичай будують по схемі об'єктива Річі-Кретьєна з лінзовим компенсатором поля зору. Об'єктиви Річі-Кретьєна встановлено на ізраїльському супутнику "EROS-B" і корейському супутнику "Kompasat-2". Оптична схема об'єктива складається з дзеркальної часті (головного і вторинного асферичних дзеркал), за допомогою яких виправляється сферична аберация і кома, і лінзового коректору поля зору, за допомогою якого виправляють астигматизм і кривизну поля зору. До переваг об'єктива можна віднести віссиметричність, що значно спрощує виготовлення його елементів і юстування об'єктива і значно меншу довжину в порівнянні з

лінзовими об'єктивами. [20]. До недоліків об'єктива Річі-Кретьєна можна віднести значне центральне екранування світлового потоку вторинним дзеркалом, що знижує модуляційну передавальну функцію (МПФ) об'єктива, особливо на робочих середніх просторових частотах. Об'єктив не має проміжного зображення, тому при полях поля зору  $2\omega \geq 1^\circ$  лінійне поле зору стає достатньо великим, що приводить до збільшення діаметру лінзового коректору поля зору і збільшенню світлового пучка між вторинним дзеркалом і лінзовим коректором, в наслідок чого ускладнюється проектування захисних бленд і їх ефективність при захисту фокальної площини від "паразитних" світлових променів, які попадають на світлоприймач, не відбиваючись від головного і вторинного дзеркал.

При роботі ОЕС ДЗЗ в панхроматичному і декількох спектральних каналах їх просторова розрізненість повинна відрізнятися в 2-4 рази. Зазвичай це досягається використанням в об'єктиві ПЗЗ-лінійок з різним розміром пікселів фоточутливих елементів. Якщо в системі використовується один і той же тип ПЗЗ-лінійки для панхроматичного і спектральних каналів необхідно, щоб фокусна відстань об'єктів в каналах була різною.

В об'єктиві корейського супутника "Kompasat-2" для "панхроматичного" і спектральних каналів застосовується єдиний дзеркальний об'єктив, який складається з головного дзеркала 1 і вторинного дзеркала 2 (рис. 1).

Лінзовий компенсатор 5 "панхроматичного" каналу збільшує фокусну відстань дзеркального об'єктива в 2 рази, а лінзовий компенсатор 3 спектральних каналів зменшує фокусну відстань дзеркального об'єктива в 2 рази, чим і досягається необхідне просторове розрізнення для різних каналів [10]. Фокусна відстань об'єктива "панхроматичного" каналу досягає 9000 мм при світловій апертурі головного дзеркала 600 мм і полі зору  $2\omega = 1^\circ 16'$ .

#### **Дзеркальні об'єктиви**

Розвиток сучасних оптико-електронних приладів іде в напрямку збільшення роздільної здатності ОЕС, що потребує збільшення фокусної відстані об'єктива. В той же час основною вимогою до об'єктів стає зменшення його ваги і габаритів при дифракційній якості зображення в широкому полі зору.

Особливу увагу при проектуванні приділяють дзеркальним об'єктивам, тому що вони мають низку переваг: можливість роботи в широкому спектральному діапазоні; можливість створення довгофокусних систем з невеликими габаритами; невелика маса за рахунок зменшення кількості оптичних елементів і застосування полегшених

конструкцій дзеркал; зручність юстування незалежно від робочого спектрального діапазону.

Для об'єктивів ОЕС ДЗЗ надвисокої роздільної здатності використовують два типа дзеркальних об'єктивів: 1) дзеркальний аналог

триплету Кука, або тридзеркальний анастигматичний об'єктив з позаосьовим полем зору (TMA- *three-mirror anastigmatic*); 2) тридзеркальний анастигматичний об'єктив Корша.

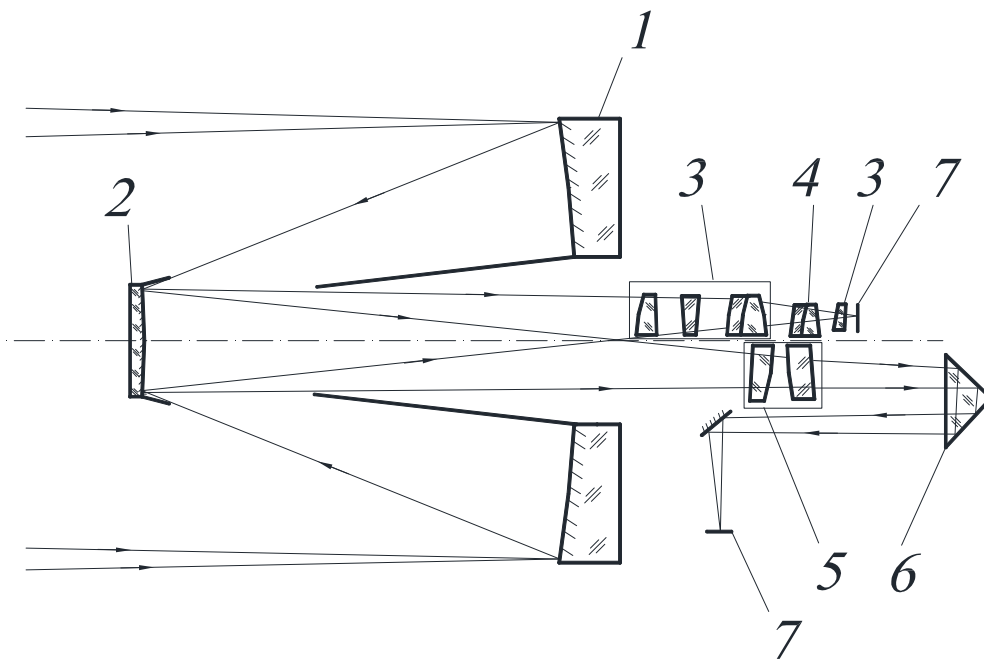


Рис. 1. Оптична схема об'єктива КА "Kompas-2", де: 1 – головне дзеркало; 2 – вторинне дзеркало; 3 – лінзовий компенсатор MS каналу; 4 – фокусуючий елемент MS каналу; 5 – лінзовий компенсатор "панхроматичного" каналу; 6 – фокусуючий елемент "панхроматичного" каналу; 7 – ПЗЗ-лінійки.

### Тридзеркальний анастигматичний об'єктив з позаосьовим полем зору

В тридзеркальному об'єктиві використовується позаосьове щілинне поле зору, що дозволяє побудувати оптичну систему без центрального екранування, яке зазвичай має місце в дзеркальних об'єктивах [21]. Щілинне поле зору добре узгоджується з лінійками приладів зарядового зв'язку (ПЗЗ-лінійками), які застосовуються для одержання зображення у сканерах з "Push-broom" скануванням. Всі три дзеркала знаходяться на єдиній оптичній вісі, але внаслідок великого позаосьового поля головне дзеркало 1 і третинне дзеркало 2 працюють позаосьовими сегментами (рис. 2). Це означає, що ці дзеркала стануть позаосьовими при їх виготовленні. Світловий потік від об'єктів на Землі потрапляє на головне дзеркало 1 під кутом  $\sigma_y$  до оптичної осі об'єктива. Відбившись від головного дзеркала випромінювання потрапляє на вторинне дзеркало 2, на якому також розташована апертурна діафрагма 3. Після відбиття від вторинного дзеркала випромінювання потрапляє на третинне дзеркало 4, яке формує зображення

поверхні Землі в фокальній площині 5, де розташовують ПЗЗ-лінійки. Вхідна зіниця 6 об'єктива розташована далеко за головним дзеркалом, що і призводить до того, що світловий потік падає на головне дзеркало тільки з однієї сторони від оптичної осі.

Основною перевагою такого об'єктива в порівнянні з класичними вісесиметричними дзеркальними системами з центральним екрануванням є значне підвищення МПФ, особливо на середніх просторових частотах [22]. Об'єктив має невелике щілинне поле зору  $\Delta\sigma_y$  по осі Y і може мати значне поле зору по осі X, що забезпечує велику смугу захвату для системи. Такий об'єктив в ОЕС "PRISM-2" японського супутника "ALOS-3" забезпечує смугу захвату 50 км. Схожі об'єктиви встановлено на космічних апаратах "Quick Bird-2", "WorldView-1" і "Gaofen-2"

В об'єктивах з трьома асферичними дзеркалами можуть бути виправлені всі аберації, крім дисторсії [23]. Дисторсія, яка в об'єктиві може досягати 2% викликає труднощі при його застосуванні, особливо в апаратурі для картографічних зйомок.

Для виправлення в об'єктиві усіх аберацій в тридзеркальному об'єктиві з позаосьовим полем

зору необхідно, щоб радіус третинного дзеркала  $R_3$  і задній відрізок  $S'$  мали певні значення залежності від значення середньої нормованої відстані між дзеркалами  $d_{CP} = \frac{|d_1| + d_2}{2f'_o}$  та відношення

$$R_3 = -(0,99 \dots 1,01) \frac{2f'_o}{41,9d_{CP}^4 - 81,8d_{CP}^3 + 55,1d_{CP}^2 - 15,45d_{CP} + 3,6 + \frac{0,1^b}{b} + 0,3(1-b)};$$

$$|S'/d_{CP}| \gg 81d_{CP}^4 - 189,5d_{CP}^3 + 169,3d_{CP}^2 - 69,5d_{CP} + 12,38 - 0,6d_{CP}(1-b).$$

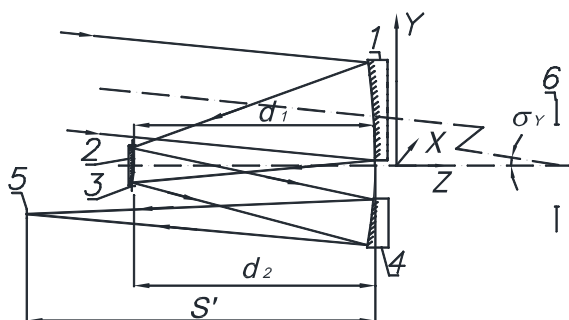


Рис. 2. Оптична схема об'єктива ТМА з позаосьовим полем зору, де: 1 – головне дзеркало; 2 – вторинне дзеркало; 3 – апертурна діафрагма; 4 – третинне дзеркало; 5 – фокальна площина; 6 – вхідна зіниця.

Довжина об'єктива (середня відстань між дзеркалами) при зміні відносного отвору об'єктива від 1:12 до 1:3 може змінюватися в межах  $d_{CP} = (0,2-0,7)f'_o$ .

### Тризеркальний анастигматичний об'єктив Корша

Широко відомий тризеркальний анастигматичний об'єктив Корша, який містить перше ввігнуте еліптичне дзеркало 1, друге опукле гіперболічне дзеркало 2 і третє ввігнуте еліптичне дзеркало 3 (рис. 3). Перше та друге дзеркала утворюють об'єктив Кассегрена, який створює дійсне зображення за першим дзеркалом. Третє дзеркало формує це зображення зі збільшенням в фокальній площині 5 всього об'єктива. За площиною проміжного зображення в площині вихідної зіниці тризеркального об'єктива під кутом  $45^\circ$  розташовано пласке дзеркало 4, яке розділяє випромінювання, що йде від другого дзеркала до третього, від випромінювання, що йде від третього дзеркала до фокальної площини об'єктива. Допоміжне пласке дзеркало дозволяє скоротити габарити об'єктива, але значно ускладнює юстування третього еліптичного дзеркала, яке розташовано під кутом  $90^\circ$  до оптичної осі першого і другого дзеркал [25]. Основною перевагою об'єктива Корша є можливість побудови високоапертурного

відстаней між другим і третім, та першим і другим дзеркалами  $b = \frac{d_2}{|d_1|}$  [24]:

об'єктиву з довжиною об'єктива  $l$  від вторинного дзеркала до фокальної площини в межах  $l = (0,1-0,2)f'_o$ . Головне дзеркало зазвичай має діаметр більш ніж 500 мм, тому його виробляють з конструктивним полегшенням для зменшення ваги об'єктива. Для відокремлення проходження світлових променів, які прямують до третинного дзеркала від тих, що відбиваються від нього, об'єктив працює щільним позаосьовим полем зору. Поле зору об'єктива обмежено розміром центрального отвору головного дзеркала і, як правило, не перевищує  $2\omega \leq 1^\circ 30'$ . Наявність в об'єктиві проміжного зображення значно спрощує завдання захисту фокальної площини об'єктива від "паразитних" світлових променів і не потребує встановлення складних світлозахисних бленд. До переваг об'єктиву можна також віднести можливість роботи в широкому спектральному діапазоні і спрощення процесу юстування першої частини об'єктива, яка складається з головного і вторинного дзеркал і уявляє собою центрований об'єктив Кассегрена.

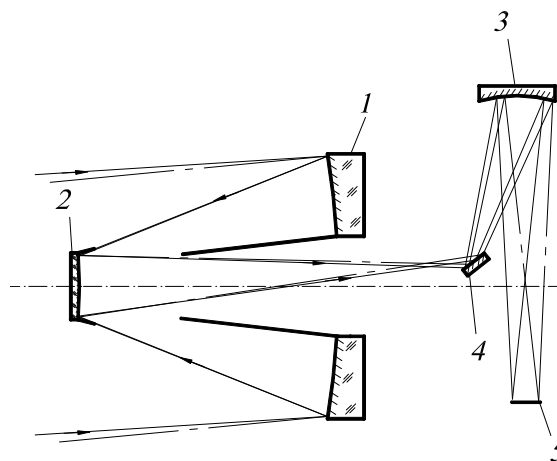


Рис. 3. Тризеркальний анастигматичний об'єктив Корша, де: 1 – головне еліптичне дзеркало; 2 – вторинне гіперболічне дзеркало; 3 – позаосьове еліптичне третинне дзеркало; 4 – допоміжне відхиляюче пласке дзеркало; 5 – фокальна площина об'єктива

Основним недоліком тризеркального об'єктива Корша з щільним полем зору є те, що за допомогою трьох асферичних дзеркал звичайно

вдається виправити тільки чотири аберації: сферичну аберацію, кому, астигматизм і кривизну поля зору. Присутня в даних об'єктивах дисторсія, що досягає 2%, визиває труднощі щодо їхнього застосування в апаратурі дистанційного зондування Землі, в яких потрібно одержання якісного зображення без спотворення. Крім того, для зменшення габаритів, третє позаосьове дзеркало розташовують під кутом  $90^\circ$  до оптичної осі першого і другого дзеркал, що значно ускладнює юстування всього об'єктива. Така схема об'єктива використовується в більшості

сучасних ОЕС ДЗЗ надвисокої роздільної здатності.

Цих недоліків позбавлена удосконалена схема об'єктива Корша, в якій нахилене плоске дзеркало виготовлено з щілинним отвором, через яке проходить випромінювання від першого і другого дзеркала в напрямку до третього дзеркала. Розташовано плоске дзеркало в площині проміжного зображення і воно розділяє випромінювання, яке іде від другого дзеркала до третього дзеркала, від випромінювання, яке іде від третього дзеркала в напрямку фокальної площини всього об'єктива (рис. 4).

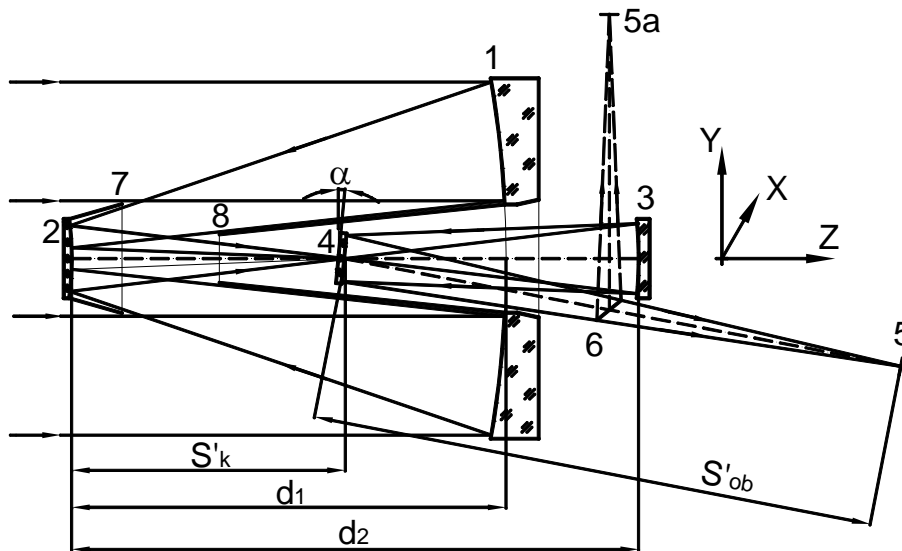


Рис. 4. Тридзеркальний удосконалений об'єктив Корша, де: 1 – головне еліптичне дзеркало; 2 – вторинне гіперболічне дзеркало; 3 – осьове еліптичне третинне дзеркало; 4 – допоміжне відхиляюче плоске дзеркало з щілинним отвором; 5 – фокальна площина об'єктива; 6 – допоміжне відхиляюче плоске дзеркало; 7, 8 – бленди

Визначення конструктивних параметрів першого, другого і третього дзеркал в залежності від вибраних нормованих відстаней між дзеркалами відповідно до наведених формул,

дозволяє виправити в об'єктиві, крім сферичної аберації, кому, астигматизму та кривизни поля зору, ще і дисторсію [26]:

$$R_1 = (0,96...1,04) \left( 0,24 |d_{2H}| + 0,355 \sqrt{\frac{d_{1H}}{0,068}} - 0,215 \right) f'_{ob};$$

$$R_2 = (0,97...1,03) \left( -0,4d_{2H}^2 + 0,483 \sqrt{\frac{d_{1H}}{0,084}} |d_{2H}| + 0,011 \right) f'_{ob};$$

$$R_3 = (0,97...1,03) \left( \frac{0,0213}{d_{1H}} d_{2H}^2 + 0,65 \sqrt{\frac{d_{1H}}{0,087}} |d_{2H}| + 0,01 \right) f'_{ob};$$

$$k_1 = (0,97...1,03) \left( 0,173 \sqrt{\frac{d_{1H}}{0,085}} |d_{2H}| - 0,994 \right);$$



$$k_2 = (0,98...1,02) \left( -6,3\sqrt[3]{\frac{d_{1H}}{0,085}} d_{2H}^2 + 7,3\sqrt[3]{\frac{d_{1H}}{0,085}} |d_{2H}| - 4,57\sqrt[3]{\frac{d_{1H}}{0,085}} \right);$$

$$k_3 = (0,98...1,02) \left( -0,7d_{2H}^2 + \frac{0,88}{\sqrt[4]{\frac{d_{1H}}{0,082}}} |d_{2H}| - \frac{0,63}{\sqrt[3]{\frac{d_{1H}}{0,084}}} \right).$$

**Висновки**

Всі відомі сучасні оптико-електронні системи дистанційного зондування Землі надвисокої роздільної здатності використовують три типи об'єктів: 1) дзеркально-лінзовий об'єктив Річі-Кретьєна; 2) тридзеркальний анастигматичний об'єктив з позаосьовим полем зору та 3) тридзеркальний анастигматичний об'єктив Корша.

Об'єктиви Річі-Кретьєна і Корша мають центральне екранування, що приводить до падіння МПФ об'єктива.

Тридзеркальний анастигматичний об'єктив з позаосьовим полем зору може мати поле зору в декілька разів більше (до  $2\omega \approx 10^\circ$ ), ніж інші об'єктиви, але має значні габарити  $l = (0,25-0,7) f'_o$ .

Найменшу довжину ( $l = (0,1-0,2) f'_o$ ) має тридзеркальний анастигматичний об'єктив Корша, тому його найчастіше використовують для створення ОЕС надвисокої роздільної здатності.

У сканерах надвисокого просторового розрізнення для збільшення радіометричного розрізнення в основному застосовуються ПЗЗ-лінійки з часовою затримкою накопичення.

Фокусна відстань об'єктивів залежно від розміру пікселя коливається від 5000 мм до 13000 мм.

В сканерах, в яких використовується ПЗЗ-лінійка з великим розміром пікселя, використовують об'єктиви з меншою світлосилою.

**Література**

1. Тягур В. М. Оптичні системи космічних багатоспектральних сканерів / В. М. Тягур, М. І. Лихоліт, В. Г. Колобродов // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2006. – №6. – С.125-132.
2. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/ikonos-2>
3. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/q/quickbird-2>
4. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2>
5. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-3>
6. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/eros-b>
7. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/geoeye-1>
8. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cartosat-2>

9. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-2>
10. Lee E. S., Lee D. G., Lee S. H. Opto-mechanical design and analysis of the MSC on the KOMPSAT-2 // 20<sup>th</sup> Congress of the International Commission for Optics. – Changchun, China – 2005.
11. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/pleiades>
12. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-3A>
13. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/asnaro>
14. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos-3>
15. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/resurs-dk1>
16. <https://eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaofen-2>
17. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/dubaisat-2>
18. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/d/deimos-2>
19. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/skysat>
20. Савицкий А. М. Оптические системы объективов для малых космических аппаратов / А. М. Савицкий, М. Н. Сокольский // Оптический журнал. – 2009. – Т.76. – №10. – С.83 – 88.
21. Лысенко А. И. Оптические схемы объективов космических телескопов / А. И. Лысенко, Е. Р. Маламед, М. Н. Сокольский и др. // Оптический журнал. – 2002. – Том 69. – №9. – С. 21 – 25.
22. Тягур В. М. Трехзеркальный анастигматический квазиортоскопический объектив с внеосевым полем зрения / В. М. Тягур, Н. И. Лихолит // Космічна наука і техніка. – 2015. – Т. 21. – №2. – С. 27-33.
23. Патент России № 2327194. Трехзеркальная оптическая система без экранирования / Грамматин А. П., Грязнов Г. М., Стариченкова В. Д.. Оpubл. 2006.
24. Патент Украины № 94303. Трехзеркальный анастигматический квазиортоскопический объектив / Тягур В. М., Лихолит Н. И., Гринюк И. Е. Оpubл. 2011.



25. Korsch D. Anastigmatic three-mirror telescope // Appl. Opt. – 1977. – V. 8. – P. 2074-2077.
26. Патент України № 113104. Трिждзеркальний анастигматичний бездисторсійний об'єктив / Тягур В. М., Лихолит Н. И. Опубл. 2016.

УДК 621: 681.7

**В. М. Тягур**

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», г. Київ, Україна*

### ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ СВЕРХВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Современные оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) сверхвысокой разрешающей способности стали основными источниками получения детальной информации из космоса.

В работе подробно рассмотрены существующие оптико-электронные системы ДЗЗ сверхвысокой разрешающей способности с размером проекции пикселя на поверхности Земли менее 1 метра, произведен обзор основных характеристик систем и их объективов.

На основе классификации объективов на линзовые, зеркально-линзовые и зеркальные, в результате их анализа приведены преимущества и недостатки объективов каждой из категорий, а также подкатегорий. Приведены аналитические выражения, связывающие параметры зеркальных объективов, которые позволяют разработать объективы с исправленными аберрациями/

**Ключевые слова:** оптико-электронные системы дистанционного зондирования Земли сверхвысокой разрешающей способности, трехзеркальный анастигмат, объектив Корша.

**V. M. Tiagur**

*National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*

### OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEMS OF EARTH'S REMOTE SENSING WITH ULTRA-HIGH RESOLUTION

Modern optical-electronic systems of Earth's remote sensing with ultra-high resolution have become the main source of detailed information from the space.

Existing optical-electronic systems of Earth's remote sensing with ultra-high resolution and ground sampling distance below 1 meter are examined in detail in the research. A review of main systems' characteristics and objectives' characteristics was performed.

On the basis of classification of objectives by lens objectives, catadioptric objectives and mirror objectives as a result of their analysis advantages and disadvantages of every objective category and subcategory are given. The main objective types to provide ultra-high resolution for remote sensing systems, such as Ritchey–Chrétien catadioptric objective, three-mirror anastigmatic objective with off-axis field of view and Korsh three-mirror anastigmatic objective, were analyzed and improved Korsh three-mirror anastigmatic objective were proposed. Analytic expressions interconnecting mirror objectives' parameters, which allow to design objectives with corrected aberrations are provided.

**Keywords:** optical-electronic systems of Earth remote sensing of ultra-high resolution, three-mirror anastigmat, Korsh objective.

*Надійшла до редакції  
16 травня 2017 року*

*Рецензовано  
25 травня 2017 року*

© Тягур В. М., 2017