

## МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ СВІТЛОЗАХИСТНОЇ БЛЕНДИ ЗІРКОВИХ ДАТЧИКІВ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

К.т.н. О.М.Замірець, В.А.Лебідь, М.В. Долженко, Державне підприємство Науково-дослідний технологічний інститут приладобудування, м. Харків

У статті розглянуто основні характеристики та розрахунки бленди зіркового датчика, як одного з найвідповідальніших вузлів.

В статье рассмотрены основные характеристики и расчеты бленды звездного датчика, как одного из важнейших узлов.

The main characteristics and the calculations of star tracker's lens hood, as one of the most important units, have been considered in the article.

**Ключові слова:** оптико-електронні прилади, навігація, астроорієнтація, зірковий датчик, бленда.

### Вступ

Розвиток космічної техніки багато в чому пов'язав з вдосконаленням систем керування космічного апарату (КА). У зв'язку з високими і постійно зростаючими вимогами до точності таких систем, з необхідністю забезпечення автономності їх функціонування в якості датчиків первинної інформації використовуються оптико-електронні прилади (ОЕП) або астродатчики, що визначають кутове положення апарата щодо астрономічних джерел випромінювання (астроорієнтирів) - зірок, Сонця, планет (у тому числі Землі). Ці прилади на сучасних КА можуть забезпечувати у складі системи управління рішення чотирьох основних завдань: астроорієнтації, астрокорекції, астронавігації і визначення положення (індикації) осей КА.

### Конструктивні особливості астродатчиків

Принципи функціонування і використання інформації астродатчиків засновані на порівнянні картини зоряного неба, що потрапляє в напрямку осі приладу, з картою відповідної ділянки зоряного неба.



Рис. 1. Основні елементи астродатчика

Основу датчика (рис.1) складають: оптична частина (об'єктив, світлозахисна бленда), фото чутлива частина (фотоприймач) та електронна частина (електроніка фотоприймача, електроніка обробки даних, пам'ять, блок живлення).

Характеристики датчика істотно залежать від його чутливості, тобто від здатності реєструвати слабке випромінювання дуже віддалених зірок при малому часу експозиції. Чутливість датчика визначається світлосилою оптичної частини (безпосередньо пов'язаної з масогабаритними характеристиками), а також чутливістю і шумовими характеристиками фоточутливої частини (як правило це ПЗС матриці або КМОП сенсори) і сервісної аналогової електроніки. Нагадаємо, що ПЗС матриця (ПЗС - прилад із зарядним зв'язком) являє собою спеціалізовану аналогову інтегральну мікросхему, що складається з світлочутливих фотодіодів на основі кремнію. ПЗС матриці збирають всю картину в аналоговій версії, і тільки потім оцифровують. На відміну від ПЗС матриць, КМОП матриці (комплементарна логіка на транзисторах метал-оксид-напівпровідник, КМОП) оцифровують кожен піксель на місці.

### Характеристики світлозахисних бленд

Зіркові і сонячні датчики, застосовувані на космічних апаратах для визначення своєї просторової орієнтації, в якості первинного каналу прийому інформації використовують оптичний канал, який повинен забезпечити необхідну чутливість пеленгації зірок або Сонця, високу контрастність об'єкта з фоном; гарну роздільну здатність і низький рівень шумів.

Істотний вплив на рівень шумів в приладах, а також на якість одержуваного зображення надають бічні засвічення, які виникають внаслідок попадання в оптичну систему світлового випромінювання від Сонця, Місяця або Землі під кутами, що перевищують межі поля зору приладу. Багаторазові відображення такого випромінювання від внутрішніх поверхонь корпусу об'єктива, що потрапляють на вихід об'єктива, призводять до фонового засвітлення світлочутливого елемента приладу.

Для боротьби з бічними перешкодами видимого діапазону використовуються спеціальні світлозахисні бленди, призначені для зниження яскравості розсіяного світла і відблисків від побічних перешкод.

Найпростіша кругова бленда (рис. 2) являє собою непрозорий конус (1), встановлений перед входною зіницею (2) об'єктива (3). Світло від бічної перешкоди (4), пройшовши вхідне вікно бленди, потрапляє на внутрішню її поверхню, яка повинна мати світлопоглинаюче покриття. При цьому частина світла поглинається її внутрішньою поверхнею, а частина дзеркально відбивається (дзеркальна складова віддзеркалення) і розсіюється (дифузна складова віддзеркалення) від внутрішньої поверхні бленди [1, 2]

Частина відбитого і розсіяного світла через вихідне вікно бленди потрапляють на вхід оптичної системи приладу через об'єктив (3), тим самим створюючи сторонній шумовий сигнал на чутливому елементі приладу. У простій круглій бленді промені першого відбиття від променя бічної перешкоди можуть потрапляти на об'єктив системи астроорієнтації. Зрозуміло, що матеріал внутрішнього покриття найпростішої кругової бленди повинен у максимально можливій мірі зменшувати рівень відбитого і розсіяного світла, що потрапляє в об'єктив (3) системи астроорієнтації.

Співвідношення між падаючим потоком світла  $\Phi_{пад}$  і відбитим потоком світла  $\Phi_{отр}$  визначається коефіцієнтом альbedo  $\alpha$  матеріалу покриття  $\Phi_{отр} = \alpha \times \Phi_{пад}$ . Для світлопоглинаючого покриття бленди необхідно використовувати матеріал з мінімально можливим коефіцієнтом альbedo  $\alpha$  в робочому діапазоні хвиль. Наприклад, для сажі у видимому діапазоні хвиль коефіцієнт альbedo  $\alpha \approx 1\%$ , для оксамиту  $\alpha \approx 0,2 \div 1\%$ , для платинової чорні  $\alpha \approx 0,1\%$ .

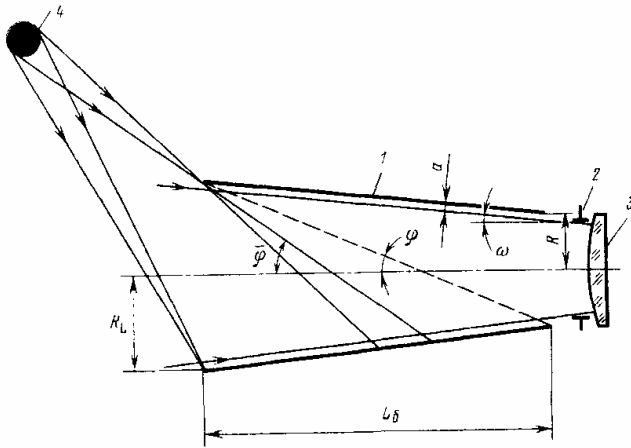


Рис. 2. Найпростіша кругова бленда

Щоб виключити вин'єтування (затінення країв зображення) пучків світла, що йдуть від об'єктів, що знаходяться в полі зору об'єктива, кут конуса такої бленди вибирають рівним куту поля зору приладу ( $2\omega$ ). Зрозуміло, що чим більше відносна довжина бленди  $L_б/R$ , тим менше мінімальний кут засвічення  $\varphi$  від бічної перешкоди.

У практиці космічного приладобудування [3] застосовуються більш складні конструкції бленд, що виключають потрапляння на об'єктив астросистеми променів першого відображення бічної перешкоди від внутрішніх поверхонь бленди. Окремі конструкції бленд мінімізують (а при деяких кутах  $\varphi$  взагалі виключають) потрапляння на об'єктив променів і другого порядку відображення.

Одним з основних параметрів бленд є коефіцієнт ослаблення  $K_{осл}$  відношення освітленості від бічної перешкоди на вході бленди до освітленості, створюваної розсіяним світлом на її виході. На практиці застосовуються різні конструкції бленд - кругові ( $K_{осл} \leq 0,5 \cdot 10^6$ ), подвійні ( $K_{осл} \leq 5 \cdot 10^8$ ), кільцеві ( $K_{осл} \leq 10^5$ ), стільникові ( $K_{осл} \leq 10^3$ ) (рис. 3) [1].

Ступінь придушення оптичних перешкод залежить не тільки від конструкції бленди, але і від поглинаючих

властивостей світлопоглинаючих покриттів внутрішніх поверхонь бленд в робочому діапазоні довжин хвиль. Бленди з великим  $K_{осл}$  мають, як правило, більші поздовжні габарити. При цьому кільцеві і стільникові бленди додатково створюють вин'єтування вхідної зіниці [1].

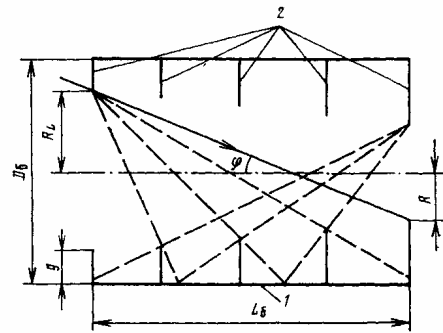


Рис. 3. Кругова бленда

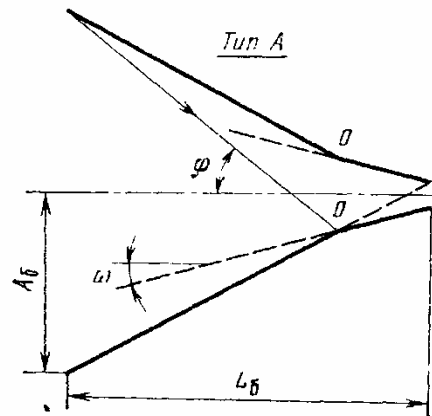


Рис. 4. Подвійна конічна бленда

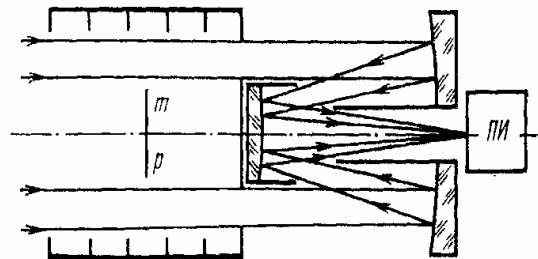


Рис. 5. Кільцева бленда

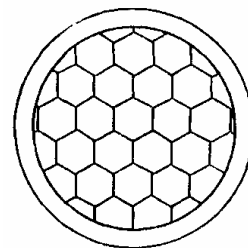


Рис. 6. Стільникова бленда

На рис. 7 наведено приклад подвійної малогабаритної бленди, в якій для підвищення коефіцієнта ослаблення  $K_{осл}$  використана складна система концентричних циліндричних діафрагм, встановлених на внутрішній стороні вхідного фланця. На вхідному фланці також встановлена конічна дзеркальна діафрагма. Дана бленда має коефіцієнт ослаблення не менше  $K_{осл} \leq 5 \cdot 10^6$ , однак її конструкція складна у виготовленні.

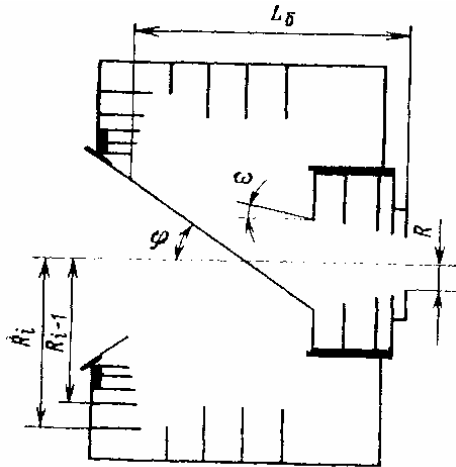


Рис. 7. Подвійна малогабаритна бленда з системою циліндричних діафрагм

### Вибір конструкції і конструктивних розмірів бленд

Для конструкції бленди, що використовується в складі системи астроорієнтації КА, доцільно застосування бленди, яка не створює вин'єтування вхідної зони об'єктива. В якості такої бленди можливе використання кругової бленди (рис. 2, 3).

Розрахунок конструктивно-габаритних розмірів бленди проводиться за умови, що на об'єктив не повинні потрапляти прямі промені бічної перешкоди (для найпростішої кругової бленди) і промені першого відображення бічної перешкоди від внутрішніх поверхонь бленди (для кругової бленди з внутрішніми діафрагмами). Для кругової бленди з внутрішніми діафрагмами при розрахунку також визначається кількість діафрагм і їх розташування.

В якості вихідних даних для вибору конструкції і розрахунку конструктивних розмірів бленди задаються:

- радіус  $R$  вихідного вікна бленди (діаметр вхідної зони об'єктива оптичної системи);
- кут  $2\omega$  поля зору бленди (при розрахунках габаритних розмірів бленди значення кута  $\omega$  для об'єктивів систем астроорієнтації може перебувати в діапазоні від  $2^\circ$  до  $10 \div 12^\circ$ );
- мінімальний кут  $\varphi$  прямого засвічення об'єктива оптичної системи;
- необхідний коефіцієнт ослаблення  $K_{осл}$  бленди.

У подальшому, при викладі матеріалу цієї методики, використовуються позначення, що відповідають наведеному на рис. 2 і 3.

Для найпростішої кругової бленди, яка може використовуватися в складі системи астроорієнтації КА, коефіцієнт ослаблення можна оцінити значенням  $K_{осл} \leq 10^3 \div 10^4$ .

Виходячи з принципу подібності, габаритні розміри  $L_б$  і  $R_L$  і інші геометричні розміри бленди зручно визначати щодо величини діаметра вхідної зони об'єктива оптичної системи, тобто визначенню підлягають відносна довжина бленди  $L_б/2R$  і відносний діаметр вхідного отвору бленди  $2R_L/2R$ .

З рис. 2 і 3 випливає, що  $\text{tg}(\varphi) = (2R + L_б \times \text{tg}(\omega)) / L_б$ , звідки отримуємо вираз для відносної довжини бленди  $L_б/2R$ :

$$L_б/2R = 1 / (\text{tg}(\varphi) \text{tg}(\omega)) \quad (1)$$

З виразу  $\text{tg}(\omega) = (R_б - R) / L_б$  можна отримати вираз для відносного діаметра бленди  $2R_L/2R$ :

$$2R_L/2R = (\text{tg}(\varphi) + \text{tg}(\omega)) / (\text{tg}(\varphi) \text{tg}(\omega)) \quad (2)$$

З формул 1 та 2 видно, що позитивні значення  $L_б$  і  $R_L$  можуть мати місце тільки при виконанні умови  $\varphi > \omega$ .

Додатково, з урахуванням того, що  $D_б = 2R_L$ , отримуємо вираз для відношення довжини бленди  $L_б$  до її діаметра  $2R_L$ .

$$L_б/D_б = L_б/2R_L = 1 / (\text{tg}(\varphi) + \text{tg}(\omega)). \quad (3)$$

Розрахунок проведено за допомогою програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel.

Розрахунки за визначенням залежності відносної довжини бленди  $L_б/2R_L$ , відносного діаметра вхідного отвору бленди  $2R_L/2R$  і відношення довжини бленди  $L_б$  до її діаметра  $2R_L$  від кута засвічення  $\varphi$  проведені для кутів  $\omega$ , приймаючих значення  $2^\circ, 2.5^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ, 8^\circ, 10^\circ$  і  $12^\circ$ . За отриманими результатами для обраного кута  $2\omega$  поля зору бленди і необхідного мінімального кута засвічення  $\varphi$  визначені відносні (по відношенню до діаметру окуляра  $2R$ ) геометричні розміри  $L_б/2R_L$ ,  $2R_L/2R$  і  $L_б/D_б$  найпростішої кругової конічної бленди. Збільшення коефіцієнта ослаблення розрахованої найпростішої кругової конічної бленди може досягатися її трансформацією в кругову бленду з внутрішніми діафрагмами, які не допускають потрапляння в об'єктив променів від першого відображення бічної перешкоди (рис. 3).

Трансформація (при заданому куті  $2\omega$  поля зору бленди і вибраному мінімальному куті засвічення  $\varphi$ ) може бути досягнута збільшенням діаметру бленди  $D_б$  із збереженням значення відносної довжини бленди  $L_б$  і зміною конструктивного виконання бленди з конічного на циліндричне (рис. 3). Оптимальними розмірами кругової бленди вважаються такі, при яких відношення  $GG' / 2R \approx 0,3 \div 0,5$ . При цьому діаметри вхідних отворів діафрагм обирають такими, щоб внутрішні краї діафрагм були на рівні конуса, що утворює поле зору бленди  $2\omega$ .

Кількість, розміри і місце розташування внутрішніх діафрагм повинні бути такими, щоб промені від першого відображення бічної перешкоди не

потрапляли до об'єктиву астросистеми. Кількість внутрішніх діафрагм, їх геометричні розміри і розстановка визначаються графічно шляхом геометричних побудов. (приклад побудов наведено на рис. 8).

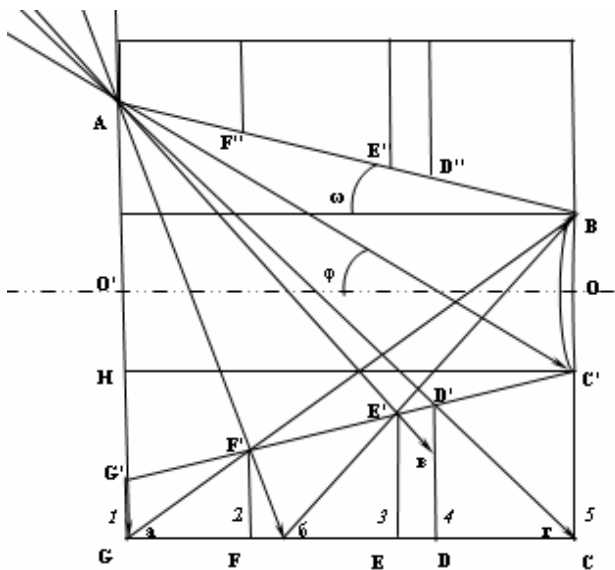


Рис. 8. Схема визначення кількості діафрагм, їх геометричних розмірів і розстановки

У прикладі побудов, наведеному на рис. 8, визначаються розміри і місце розташування діафрагм 2, 3 і 4, тому що розмір і місце розташування крайніх діафрагм 1 і 5 очевидні.

Послідовність геометричних побудов наступна:

- спочатку визначається місце розташування діафрагми 2. Воно вибирається таким, щоб промінь GB від першого відображення, який може виникнути в точці а (крайня ліва точка ділянки GF зовнішнього твірного корпусу бленди), не потрапив на об'єktiv астросистеми BC. Точка F' визначається як точка перетину променя GB і твірного конуса сектора огляду бленди G'C'. При цьому одночасно визначається розмір внутрішнього отвору F'F'' діафрагми 2 і величина проміжку GF до діафрагми 2 від вхідного отвору бленди;

- далі визначається місце розташування діафрагми 4. Воно вибирається таким, щоб промінь AC бічного засвічення не попадав на зовнішнє утворення корпусу бленди на ділянці DC. При виконанні цієї умови промені від першого віддзеркалення з точки г не потрапляють на об'єktiv астросистеми. Точка D' визначається як точка перетину променя AC і твірного конуса сектора огляду бленди G'C'. При цьому одночасно визначається розмір внутрішнього отвору D'D'' діафрагми 4 і величина проміжку GD до діафрагми 4 від вхідного отвору бленди;

- потім аналогічним чином визначаються розміри та місця розміщення внутрішніх діафрагм бленди (у прикладі, зображеному на рис. 8, діафрагма (3)).

При цьому більш оптимальними варіантами розміщення діафрагм можуть вважатися варіанти, що задовольняють таким умовам:

1. Кількість діафрагм бленди не повинно перевищувати 6-ти, тому що більша їх кількість істотно збільшує частку світла від бічної перешкоди, відбиту від країв діафрагм в бік об'єктиву (для зменшення цієї частки світла внутрішні кромки діафрагм повинні мати товщину не більше декількох мікрон). Також велика кількість діафрагм бленди призводить до збільшення ваги бленди.

2. Відстані між діафрагмами не повинні сильно відрізнятися один від одного.

При розрахунку розмірів бленд для конкретного застосування доцільно, з урахуванням вимог до бленди конкретного зразка системи астроорієнтації, прорахувати кілька варіантів, враховуючи конструктивні особливості конкретного зразка КА та умови розміщення на ньому об'єктиву і бленди системи астроорієнтації.

### **Заключення**

Розроблена методика розрахунку світлозахисної бленди зіркового датчика дозволяє нівелювати вплив рівня шумів в приладах, а також підвищити якість одержуваного зображення за рахунок зменшення бічних засвічень, які виникають внаслідок попадання в оптичну систему світлового випромінювання від Сонця, Місяця або Землі під кутами, що перевищують межі поля зору приладу.

Для досягнення найвагомішого результату при створенні конструкції бленд з високим коефіцієнтом ослаблення рівня бокової перешкоди, доцільно :

- використання для покриття внутрішніх поверхонь бленди матеріалів з мінімально можливим коефіцієнтом альbedo  $\alpha$  в необхідному діапазоні хвиль, наприклад платинова чорнь;
- зменшення товщини кромки діафрагм до мінімально технологічно досяжної;
- збільшення висоти діафрагмам і зменшення відстані між ними з метою збільшення кількості внутрішніх відображень променів бокової перешкоди до потрапляння їх на об'єktiv системи астроорієнтації. Збільшення кількості внутрішніх відображень може також досягатися застосуванням діафрагм спеціальної форми (не плоска);
- забезпечення співвідношення між довжиною і діаметром бленди, як  $(1,5 \div 2,5):1$ . При цьому ширина вхідної діафрагми не повинна перевищувати  $30 \div 50\%$  від діаметра об'єктиву зіркового датчика.

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Якушенко Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. Под ред. Ю.Г. Якушенкова. - М: Логос. - 2000. - 488 с.
2. Якушенко Ю.Г. и др. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. - М.: Радио и связь, 1981.- 180 с.Ивандикое
3. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. — МЛ: Логос, 2004. - 472с.