

УДК 612.37:621.391

О.П. Литюга

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИЯВЛЕННЯ ОПТИЧНИХ СИГНАЛІВ В ТЕЛЕВІЗІЙНИХ СИСТЕМАХ ПРИ СПОСТЕРЕЖЕННІ НИЗЬКООРБІТАЛЬНИХ КОСМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В ДЕННИЙ ЧАС

Розглянута просторова структура сигнальної складової в площині реєстрації астрономічної телевізійної системи при реєстрації оптичних сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів в денний час. Проведена оцінка ефективності алгоритмів енергетичного виявлення сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів в режимі первинного виявлення в денних умовах по критерію величини відношення сигнал/шум.

Ключові слова: оптичний сигнал, телевізійна система, низькоорбітальний космічний об'єкт.

Вступ

Збільшення кількості космічних об'єктів у навколоземному просторі, включаючи космічне сміття та об'єкти природного походження – метеороїдів та ін., викликало появу відомих проблем космічного сміття та безпеки орбітальних місій. Розвиток наземних засобів астрономічних спостережень призвів до повсюдного використання астрономічних телевізійно-вимірювальних систем для отримання інформації про космічні об'єкти при вирішенні актуальних задач вивчення малих тіл Сонячної системи та штучних небесних тіл техногенного походження.

Для здійснення прогнозу та оцінки ступеня небезпеки взаємного зближення низькоорбітальних космічних апаратів та елементів космічного сміття необхідно проводити сеанси пошуку та виявлення невідомих об'єктів на орбітах, що цікавлять. При проведенні моніторингу навколоземного космічного простору виникає задача первинного виявлення невідомих раніше об'єктів [1].

Тривалість сеансу спостереження обмежена часом сутінків, коли світлотіньові умови дозволяють спостерігати низькоорбітальні космічні об'єкти. Необхідність підвищення ефективності контролю навколоземних орбіт вимагає розширення можливостей астрономічних телевізійних систем, у тому числі і збільшення сукупної добової тривалості сеансу спостереження за рахунок використання денного часу доби. У денний час відмінювані оптичні властивості атмосфери та рівень світіння неба обмежують можливості телевізійних систем з реєстрації сигналів від космічних об'єктів.

Постановка задачі. В роботі [2] наведено математичний опис сигналів в площині реєстрації астрономічної телевізійної системи, побудований для системи, що функціонує в денний час в режимі супроводження об'єкту, тобто коли використання апріорної інформації про рух об'єкту дозволяє забезпечити нерухомість зображення космічного об'єкту в телевізійній системі координат впродовж часу ре-

єстрації. Просторовий розподіл сигнальної складової в площині фотоприймача зумовлений параметрами оптичної системи та оптичними властивостями атмосфери, зокрема радіусом кореляції атмосферних неоднорідностей ρ_0 , зменшення якого у денних умовах призводить до змін розмірів плями розсіяння і, як наслідок, зміни щільності потоку фотонів від космічного об'єкту в площині реєстрації.

При реєстрації оптичних сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів необхідно враховувати, що власна швидкість руху об'єкту, що спостерігається, на орбіті призводить до змін просторового розподілу сигнальної складової в площині фотоприймача. Зображення низькоорбітальних космічних об'єктів, отримане в режимі компенсації добового обертання Землі, має форму сліду, сформованого за час експозиції.

В загальному випадку, при відсутності повної апріорної інформації про об'єкт, що спостерігається, положення сліду зображення космічного об'єкту в площині фотоприймача можна вважати довільним. Координати початкової точки сліду в системі координат світлочутливої поверхні фотоприймача (телевізійна система координат) зумовлені взаємним розташуванням оптичної вісі астрономічної телевізійної системи та об'єкту, що спостерігається, і при потраплянні об'єкту в поле зору відповідають положенню зображення об'єкту в момент часу, що відповідає початку часового періоду формування телевізійного кадру.

Зміна просторового розподілу сигнальної складової в площині фотоприймача, що викликана рухом об'єкту, що спостерігається, вимагає адекватного математичного опису сигналів та вдосконалення алгоритмів виявлення оптичних сигналів в астрономічних телевізійних системах.

Метою даної статті є аналіз просторової структури оптичних сигналів в площині реєстрації астрономічної телевізійної системи при виявленні низькоорбітальних космічних об'єктів у денний час

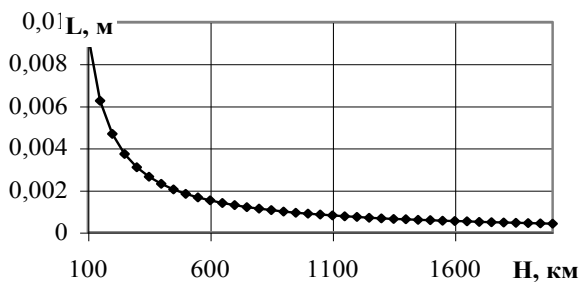
при відсутності апріорної інформації про параметри руху об'єкту, що спостерігається, а також з'ясування ступеню впливу власного руху об'єкта на ефективність традиційних алгоритмів виявлення оптичних сигналів.

Основний розділ

Просторова структура сигнальної складової в площині реєстрації в режимі виявлення космічних об'єктів. Висока швидкість руху об'єкту, що спостерігається, відносно точки розташування астрономічної телевізійної системи призводить до того, що зображення низькоорбітальних космічних об'єктів, яке отримання у режимі компенсації добового обертання Землі, має форму сліду, сформованого за час експозиції. Розмір сліду залежить від висоти орбіти космічного об'єкту (лінійної швидкості орбітального руху), взаємного розташування площини орбіти об'єкту та точки розташування системи, а також від зенітного кута, під яким спостерігається космічний об'єкт. Максимальним розмір сліду буде у випадку, коли реєстрація зображення об'єкту відбувається в момент його проходження через зеніт. У цьому випадку лінійна швидкість орбітального руху космічного об'єкту, що спостерігається дається згідно [3], у відповідності до виразу:

$$V = \sqrt{\frac{\mu_3}{R_3 + H}}, \quad (1)$$

де $\mu_3 = f M + m$ – гравітаційний параметр задачі двох тіл; f – універсальна гравітаційна стала;



а

M – маса Землі; m – маса космічного об'єкту; R_3 – радіус Землі; H – висота орбіти космічного об'єкту.

Залежність лінійної швидкості космічного об'єкту від висоти кругової орбіти наведено на рис. 1.

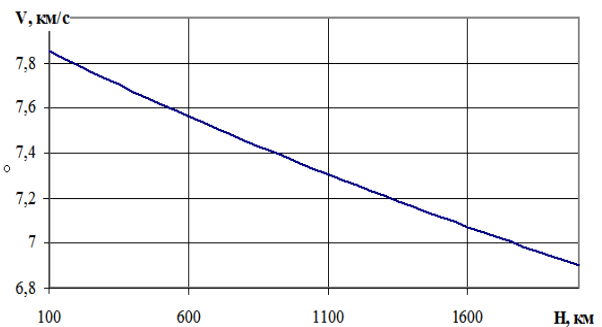


Рис. 1. Залежність лінійної швидкості космічного об'єкту від висоти кругової орбіти

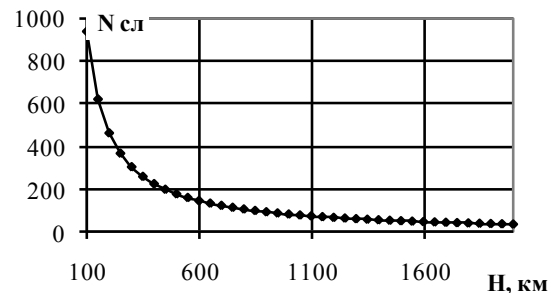
Для випадку проходження об'єкту через зеніт, розмір сліду L , сформованого зображення космічного об'єкту в площині фотоприймача за час реєстрації, можна оцінити у відповідності з виразом:

$$L = Fs/H, \quad (2)$$

де F – фокусна відстань оптичної системи;

s – шлях, що пройдений космічним об'єктом по орбіті за час реєстрації.

Залежність розміру сліду, сформованому у телевізійному кадрі (час формування телевізійного кадру $T_k = 0,04$ с), від висоти орбіти космічного об'єкту наведено на рис. 2, а.



б

Рис. 2. Залежність довжини сліду зображення космічного об'єкту, що спостерігається в зеніті, в одному кадрі від висоти орбіти: а – в метрах; б – в елементах розділення

З аналізу рис. 2 витікає, що при первинному виявленні сигналів від космічних об'єктів в астрономічній телевізійній системі, розмір сліду зображення космічного об'єкту, що знаходиться на низькій орбіті (якщо зображення реєструється у режимі компенсації добового обертання Землі), при часі реєстрації, що дорівнює стандартному для телевізійних систем часу накопичення $T_k = 0,04$ с, може сягати декількох міліметрів. Лінійний розмір $l_{ел}$

елементу розрізнення сучасних фотоприймачів на основі ПЗЗ складає величину порядку 10^{-5} м. Отже, лінійний розмір відмітки (сліду) від низькоорбітального космічного об'єкту в телевізійному кадрі може в описаних умовах складати сотні елементів розрізнення (рис. 2, б).

Таким чином, просторовий розподіл сигналів, що реєструються астрономічними телевізійними системами в режимі первинного виявлення косміч-

ного об'єкту, мають у телевізійному кадрі протяжну просторову структуру, тобто характерний просторовий розподіл енергії сигнальної складової в площині фотоприймача (рис. 3). Площина зображення космічного об'єкту збільшується (у порівнянні з режимом стеження [3]) з-за переміщення об'єкту, що спостерігається, за час реєстрації телевізійного кадру. Збільшення площини зображення космічного об'єкту на світлочутливій поверхні фотоприймача призводить до суттєвого зниження амплітуди сигналу, що формується елементами розподілення фотоприймача під дією оптичного випромінювання від космічного об'єкту.

Наслідком зміни просторового розподілу сигнальної складової є те, що якість виявлення сигналу в астрономічній телевізійній системі в режимі первинного виявлення буде нижчою, ніж в режимі супроводження, в однакових умовах спостереження.

Наведені міркування повинні бути враховані при вирішенні задачі виявлення сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів в астрономічних телевізійних системах.

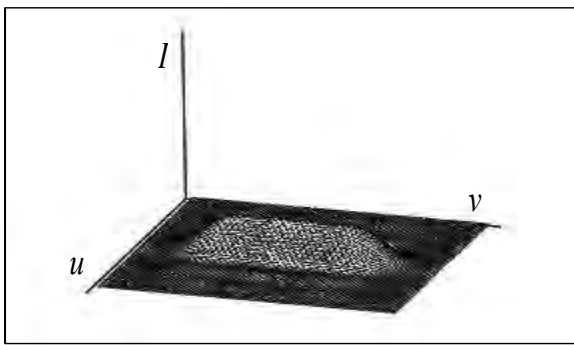


Рис. 3. Просторовий розподіл сигнальної складової у фокальній площині при реєстрації сигналу від космічного об'єкту в режимі первинного виявлення

Проведемо оцінку ефективності традиційних алгоритмів виявлення сигналів в астрономічних телевізійних системах у сутінкових та денних умовах при спостереженні космічних об'єктів у режимі первинного виявлення.

Оцінка ефективності традиційних алгоритмів виявлення сигналів у сутінкових та денних умовах для режиму первинного виявлення об'єктів. В роботі [4] було проведено оцінку ефективності традиційних алгоритмів виявлення, основаних на пороговій обробці сигналів, в денних умовах спостереження космічних об'єктів при використанні апріорної інформації про параметри руху об'єктів (для режиму супроводження).

Проведемо аналогічні міркування і для оцінки кількості фотонів, що реєструються елементом розрізнення матриці в режимі первинного виявлення в денних умовах. Просторовий розподіл сигнальної складової в площині матриці фотоприймача наведено на рис. 3. Площину сліду об'єкту у кадрі S_{tr} можна виразити з урахуванням розмірів сліду космічного об'єкту в телевізійному кадрі, як

$$S_{tr} = \frac{\pi}{4} d_{кр}^2 + d_{кр}L, \quad (3)$$

де $d_{кр}$ – розмір кружку розсіювання, наведений в [4]; L – довжина сліду космічного об'єкту у телевізійному кадрі (2).

Для випадку, що розглядається, розрахункові дані середньої кількості фотонів, які реєструються одним елементом розрізнення для значень $\rho_0 = 0,01$ м, $\rho_0 = 0,05$ м, $\rho_0 = 0,15$ м та різних значень блиску космічних об'єктів m у залежності від висоти його орбіти H наведені на рис. 4, рис. 5 та рис. 6 відповідно.

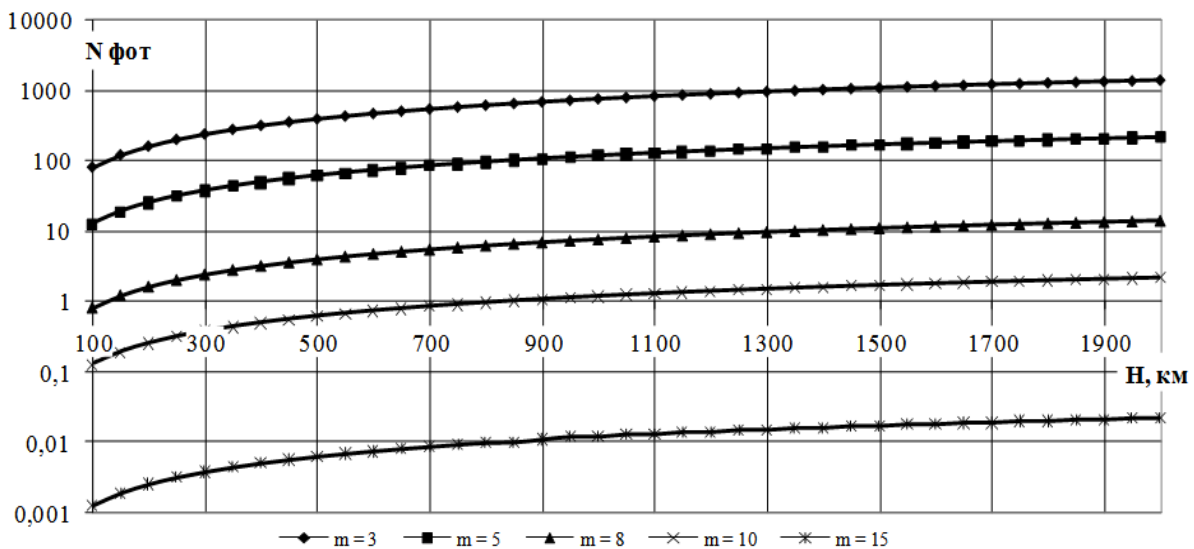


Рис. 4. Середня кількість сигнальних фотонів, що реєструються одним елементом розрізнення в денних умовах в режимі первинного виявлення, для $\rho_0 = 0,01$ м

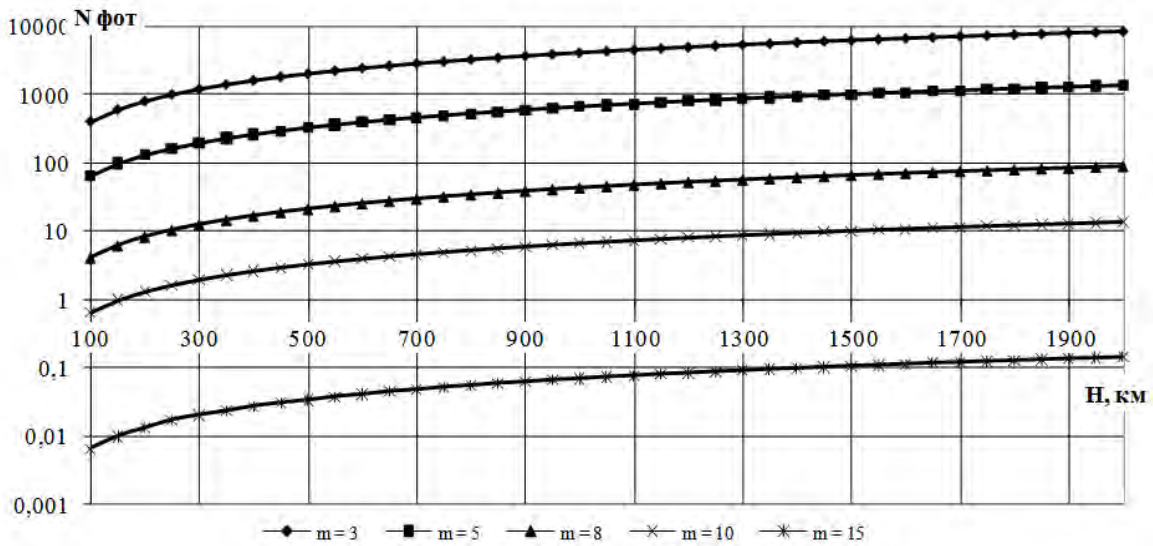


Рис. 5. Середня кількість сигнальних фотонів, що реєструються одним елементом розрізнення в денних умовах в режимі первинного виявлення, для $\rho_0 = 0,05$ м

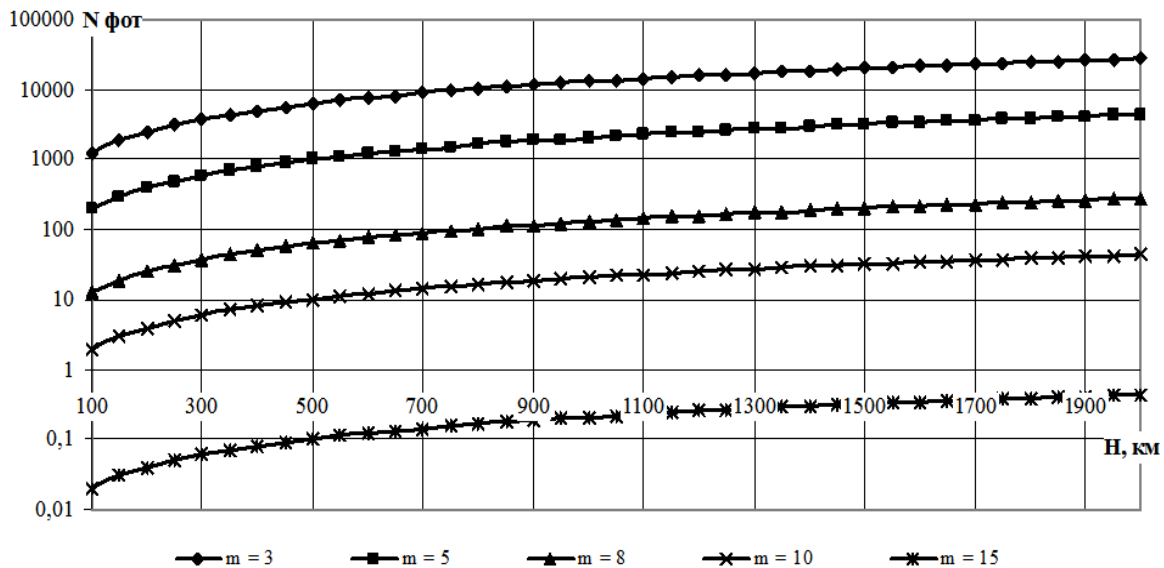


Рис. 6. Середня кількість сигнальних фотонів, що реєструються одним елементом розрізнення в денних умовах в режимі первинного виявлення, для $\rho_0 = 0,15$ м

Аналіз даних рис. 4 – 6 показує, що при реєстрації сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів в денних умовах у режимі первинного виявлення, енергія оптичного сигналу, що реєструється одним елементом розрізнення за час телевізійного кадру, значно знижується зі зменшенням параметру ρ_0 та зі зменшенням висоти орбіти об'єкту, що спостерігається. Чисельно зниження кількості фотонів може сягати 10^4 разів у порівнянні з кількістю фотонів, що реєструються у режимі супроводження у нічних умовах.

Зниження амплітуди відгуку елемента розрізнення на вплив сигнальної складової є наслідком зміни просторової структури сигнальної складової в

площині матриці фотоприймача під впливом мультиплікативних перекручень, що суттєво знижує виявительну здатність астрономічної телевізійної системи при реєстрації оптичних сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів у сутінкових та денних умовах.

Розрахункові значення $N_{\text{ф}}$ – середньої кількості квантів випромінювання фону неба у видимому діапазоні, що реєструються одним елементом розрізнення матриці фотоприймача за час формування телевізійного кадру у залежності від блиску однієї квадратної кутової секунди фону $m_{\text{ф}}$ наведені на рис. 7.

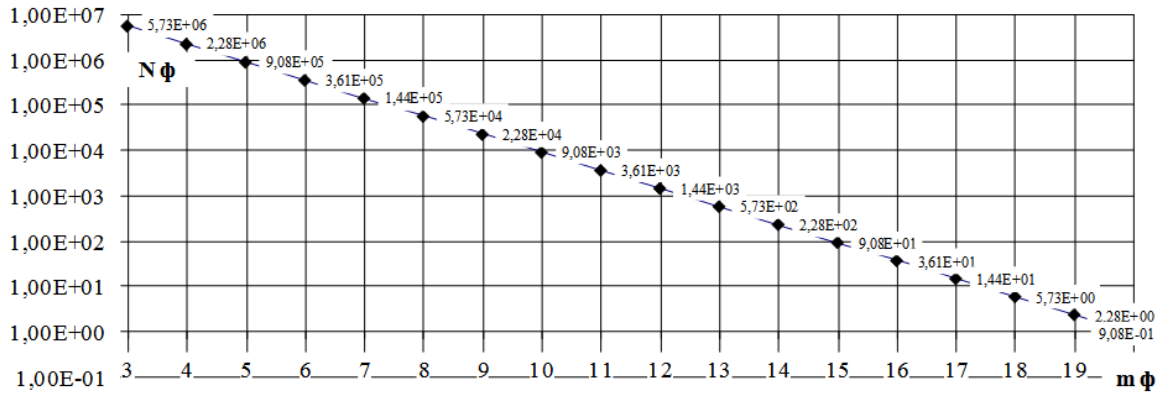


Рис. 7. Середня кількість фотонів фонового випромінювання видимого діапазону, що реєструються одним елементом розрізнення, в залежності від блиску однієї квадратної кутової секунди

Розрахунок середньої кількості фотонів для даних, наведених на рис. 4 – 7 проведено для поля зору астрономічної телевізійної системи 20"×20", діаметру об'єктиву $D_0 = 0,5 \text{ м}$, площини матриці фотоприймача $S_m = 16 \times 16 \text{ мм}^2$, розміру елементу розрізнення $l_{\text{ед}} = 16 \text{ мкм}$, часу накопичення $T_K = 0.04 \text{ с}$, загальної кількості елементів розрізнення матриці фотоприймачів $n = 10^6$, коефіцієнти прозорості атмосфери та пропускання оптичного тракту прийняті рівними одиниці.

Аналогічно [4] проведемо аналіз ефективності порогового виявителя сигналів в астрономічних телевізійних системах у денних умовах для режиму первинного виявлення, використовуючи наступний вираз для величини відношення сигнал/шум ϕ [5 – 7].

$$\phi = N_C / \sqrt{N_C + N_\Phi}, \quad (4)$$

де N_C – середня кількість фотонів від об'єкту, що виявляється (сигнальних); N_Φ – середня кількість фотонів фонового випромінювання. Розрахункові значення величини відношення сигнал/шум для режиму первинного виявлення наведені на рис. 8 та 9.

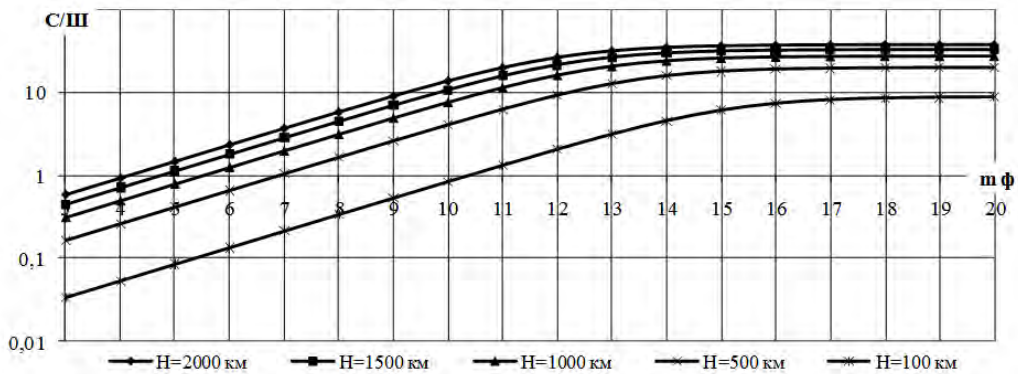


Рис. 8. Залежність величини відношення сигнал/шум від m_ϕ для різних висот орбіти H для $m = 3$, $\rho_0 = 0,01 \text{ м}$

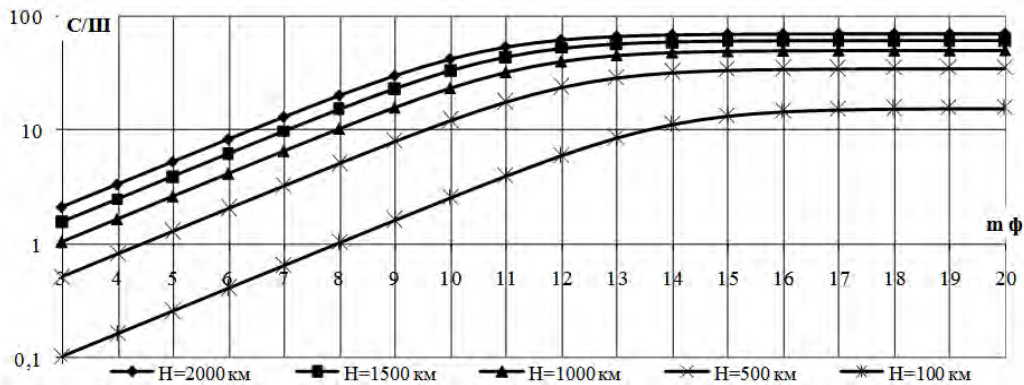


Рис. 9. Залежність величини відношення сигнал/шум від m_ϕ для різних висот орбіти H для $m = 3$, $\rho_0 = 0,03 \text{ м}$

Висновки

Аналіз даних, які наведено на рис. 8 та 9, дозволяє зробити наступний висновок: величина відношення сигнал/шум на виході виявителя, що реалізує метод енергетичного виявлення, основного на пороговій обробці сигналу, сформованого одним елементом розрізнення матриці фотоприймача, у денних умовах при реєстрації сигналів від низькоорбітальних космічних об'єктів суттєво залежить від стану турбулентної атмосфери (параметру ρ_0) та висоти орбіти об'єкту, що спостерігається.

В режимі первинного виявлення розрахункові значення величини відношення сигнал/шум на виході порогового виявителя для об'єктів блиском слабше 3^m в денній завадовій обстановці (сукупність адитивних перешкод та мультиплікативних перекручень), не перевищують значення $\phi = 5$.

Для покращення якості виявлення оптичних сигналів в астрономічних телевізійних системах при спостереженні низькоорбітальних космічних об'єктів у сутінковий та денний час при відсутності апріорної інформації про об'єкт, що спостерігається, необхідно скласти математичну модель сигналів, яка враховує зміни просторової структури сигнальної складової в режимі первинного виявлення об'єкту (коли зображення об'єкту в телевізійному кадрі має форму сліду).

Список літератури

1. Наблюдение низкоорбитальных КО с телевизионной ПЗС-камерой / Н. Бурлак, В. Драгомерецкий, Н. Кошкин, А. Рябов, Л. Шакун // Наблюдение околоземных космических объектов: междунар. науч. конф. 23 – 25 января 2007. – Звенигород, 2007. – [Електрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://lfn.astronomer.ru/report/0000018/Od/index1.htm>.
2. Стрелков А.И. Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах контроля космического пространства / А.И. Стрелков, Т.А. Стрелкова, А.П. Лытюга // Радиотехника: всеукр. межвед. науч. техн. сб. – Х.: ХНУРЕ, 2003. – Вып. 132. – С. 7-13.
3. Механика космического полета / М.С. Константинов, Е.Ф. Каменков, Б.П. Перельгин, В.К. Безвербий / под ред. В.П. Мишина. – М.: Машиностроение, 1989. – 408 с.
4. Лытюга А.П. Эффективность обнаружения сигналов от космических объектов в астрономических телевизионных системах в дневное время / А.П. Лытюга // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ навігації і управління, 2007. – Вып. 3. – С. 42-46.
5. Москвитин С.В. Теоретические основы оптической локации / С.В. Москвитин, А.И. Стрелков. – Х.: МО Украины, 1992. – 369 с.
6. Эклз М. Детекторы слабого излучения в астрономии / М. Эклз, Э. Сим, К. Триттон: пер. с англ. – М.: «Мир», 1986. – 200 с.
7. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи / А.Г. Шереметьев. – М.: Связь, 1971. – 264 с.

Надійшла до редколегії 8.11.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ДНЕВНОЕ ВРЕМЯ

О.П. Литюга

Рассмотрена пространственная структура сигнальной составляющей в плоскости регистрации астрономической телевизионной системы при регистрации оптических сигналов от низкоорбитальных космических объектов в дневное время. Проведена оценка эффективности алгоритмов энергетического обнаружения сигналов от низкоорбитальных космических объектов в режиме первичного обнаружения в дневных условиях по критерию величины отношения сигнал/шум.

Ключевые слова: оптический сигнал, телевизионная система, низкоорбитальный космический объект.

OPTICAL SIGNALS DETECTION EFFICIENCY IN ASTRONOMICAL TELEVISION SYSTEMS WITH LOW-ORBITING COSMIC OBJECTS OBSERVATION IN DAYLIGHT CONDITIONS

O.P. Lityuga

Signals spatial structure in registration plane of astronomical television system with registration of optical signals from low-orbiting cosmic objects in daylight conditions is considered. Efficiency evaluation of signal threshold detection algorithm with observation of low-orbiting cosmic objects in primary detection mode in daylight conditions is carried out by criterion of signal/noise ratio value.

Keywords: a visual signal, the televisional systems, low-orbiting space object.