

УДК 629.78

С.П. Фриз, ст. викл.

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ УМОВ ОСВІТЛЕНOSTІ ЗАДАНОГО РАЙОНУ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

В статті пропонується алгоритм розрахунку умов освітленості заданого району земної поверхні через побічні параметри – азимут і кут місця Сонця в абсолютній геоцентричній системі координат. Основою для розрахунку координат Сонця обрано метод фундаментальних аргументів. Подано результати експерименту з оцінювання точності розрахунку кута місця Сонця за допомогою розробленого алгоритму. Запропоновано використовувати цей алгоритм для підвищення ефективності функціонування систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

Відомо, що однією з основних задач програмно-командного забезпечення управління космічними апаратами (КА) типу "Січ" є оперативне планування роботи бортового спеціального комплексу (БСК), який, власне, формує цільову інформацію космічної системи ДЗЗ. Одним із суттєвих недоліків сучасної технології цього планування є відсутність в складі штатного спеціального програмного забезпечення "Луч-Е" програми для розрахунків умов освітленості заданого району зйомки [1].

Необхідність таких розрахунків на етапі планування роботи БСК пояснюється декількома причинами.

По-перше, при плануванні роботи оптико-електронних засобів БСК необхідно, щоб заданий район спостереження був освітлений сонячним промінням і над районом не було хмарності. Проблема прогнозування хмарності над районом зйомки виходить за рамки цієї статті.

По-друге, для отримання якісного зображення залежно від типу апаратури БСК кут падіння сонячних променів відносно лінії місцевого горизонту α_s повинен бути не менше від заданого.

Наприклад, для отримання якісного зображення сканувальним пристроєм малого розрізнення МСУ-М космічного апарата КА "Січ-1" необхідно, щоб виконувалась умова $\alpha_s \geq 5^\circ$, а при зйомці пристроєм середнього розрізнення МСУ-С – $\alpha_s \geq 30^\circ$ [1]. Проте на практиці вказані вимоги виконуються не завжди.

Так, незадовільні умови освітлення в північній півкулі припадають на осінньо-зимовий період. При цьому для районів з широтами від 45° до 55° , де знаходиться Україна та інші європейські держави, в зазначений період Сонце підіймається над горизонтом не вище ніж на 25° .

Найгірші умови освітлення припадають на день зимового сонцестояння. В цей день в місцевий полудень максимальний кут місця Сонця визначається за виразом [2]

$$\alpha_s = 90^\circ - b - \varepsilon, \quad (1)$$

де b – геодезична широта району спостереження;

$\varepsilon \approx 23,5^\circ$ – кут нахилу площини екліптики до площини небесного екватора.

З формули (1) можна знайти, що наприклад, на широті Києва ($b \approx 40^\circ$) в цей день максимальне значення кута місця становить $\alpha_s \approx 16^\circ,5$.

Таким чином, враховуючи зазначені астрономічні умови, здійснювати зйомку цього району за допомогою пристрою МСУ-С з листопада до лютого недоцільно.

При використанні існуючої технології планування такі розрахунки проводяться приблизними методами, що не завжди дає прийнятні результати. Крім того, при використанні виразу (1) можливо розрахувати значення α_s над районом спостереження тільки в місцевий полудень, а якщо зйомка проводиться в іншу частину доби, то потрібно проводити розрахунки іншими методами.

Другим параметром, що характеризує умови освітленості району зйомки, є азимут падіння сонячних променів β_s . Як покаже досвід обробки інформації ДЗЗ, значення β_s необхідні для визначення висоти об'єктів зображення і в деяких інших випадках. Тому задача точного розрахунку умов освітленості будь-якого району земної поверхні є актуальною і для вдосконалення процесу обробки інформації ДЗЗ.

Можливий підхід до розв'язання цієї задачі подано в монографії [3]. Однак, як показала експериментальна перевірка запропонованого в них алгоритму, похибка розрахунків значення α_S іноді перебільшує декілька градусів при вимогах не більше одного градуса. Така похибка не припустима для раціонального планування роботи КА.

Таким чином, задача розробки алгоритму розрахунку умов освітленості заданого району земної поверхні з похибками, що не перебільшують одного градуса, є актуальною.

Для її розв'язання початковими даними доцільно обрати геодезичні довготу l та широту b заданої точки земної поверхні, а також київський час t_k потрібної календарної дати, на який необхідно знати умови освітлення. Якщо район має невеликі розміри відносно смуги огляду КА, то розрахунки можна проводити один раз, обравши за параметри l і b значення, що відповідають середині району. При великих відносних розмірах заданого району доцільно провести розрахунки для його граничних точок.

Шуканими величинами є кут місця α_S та азимут β_S центра Сонця в заданий момент часу в топоцентричній пунктової сферичній системі координат (ТПССК) [4].

У такому разі пропонується такий алгоритм розрахунків:

1. Визначити координати центра Сонця X_S, Y_S, Z_S в абсолютній (інерціальній) геоцентричній системі координат (АСК) на заданий час t_k потрібної календарної дати. Ці координати можна визначити безпосередньо з Астрономічного щорічника [5]. Однак це потребує:

– по-перше, наявності такого видання на потрібний рік (в Україні такий щорічник не видається, а в Астрономічному календарі [6] такі дані не наводяться);

– по-друге, якщо необхідно спрогнозувати умови освітленості на наступний рік, такі дані отримати в принципі неможливо;

– по-третє, під час роботи з архівами інформації ДЗЗ, у разі виникнення необхідності визначення умов освітленості за минулі роки, необхідно мати доступ до Астрономічних щорічників за ці роки, що дуже проблематично.

І, нарешті, при розробці програмно-алгоритмічних засобів для досягнення їх універсальності доцільно проводити розрахунки без залучення довідкових даних з друкованих видань. Тому в статті запропоновано методику розрахунку координат Сонця в АСК без залучення даних Астрономічного щорічника.

2. Провести перерахунок координат центра Сонця з АСК в гринвіцьку геоцентричну прямокутну систему координат (ГрПСК).

3. Перерахувати координати центра Сонця з ГрПСК в топоцентричну пунктово прямокутну систему координат (ТППСК).

4. Визначити значення кутів α_S та β_S шляхом перерахунку координат центра Сонця з ТППСК в ТПССК.

Послідовність перерахунків відповідно до пунктів 2–4 детально розглянута в [7]. Слід лише відмітити, що для повної автоматизації розрахунків всесвітній зоряний час \mathcal{S}_0 на нуль годин гринвіцького часу заданої дати доцільно розраховувати за допомогою методики, що подана в монографії [8], а не визначати з астрономічного календаря, як пропонується в статті [7].

Розрахунки відповідно до пункту 1 пропонується проводити за такою методикою. Координати Сонця в АСК визначаються за виразом [9]

$$\begin{aligned} X_S &= R \cos \Theta; \\ Y_S &= R \sin \Theta \cos \varepsilon; \\ Z_S &= R \sin \Theta \sin \varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

де R – радіус-вектор Сонця, виражений в астрономічних одиницях;

Θ – істинна геометрична довгота Сонця, яка віднесена до середньої точки рівнодення заданої дати.

Значення радіус-вектора Сонця можна знайти з рівняння орбіти Землі [4]:

$$R = \frac{1,0000002(1 - e^2)}{1 + e \cos \vartheta}, \quad (3)$$

де e – ексцентриситет навколосонячної орбіти Землі;

ϑ – істинна аномалія Землі на цій орбіті.

Як відомо [9], параметри e , ϑ , Θ , та ε є функцією часу. Тому слід визначити епоху, від якої проводитиметься відлік всіх цих параметрів. Пропонується вибрати за початок епохи гринвіцький полудень 01 січня 1900 року. Такий вибір пояснюється необхідністю визначати умови освітленості не тільки для прогнозування вперед (тоді доцільно відлічувати епоху від 2000 року), а й прогнозувати умови освітленості назад для аналізу архівної інформації, яка накопичена, наприклад, в XX сторіччі.

Тоді для всіх подальших розрахунків потрібно визначити інтервал часу T , що пройшов від початку обраної епохи до заданого часу t_k потрібної календарної дати. Для цього, користуючись наведеною в монографії [8] методикою, слід розрахувати юліанську дату JD , що відповідає часу t_k . При цьому точність розрахунків повинна бути не нижче за 10 значущих цифр після коми. В такому разі умови освітленості будуть визначатися з точністю в декілька часових секунд. Далі для визначення інтервалу T слід скористатися виразом

$$T = \frac{JD - 2415020,0}{36525}.$$

В основу подальших розрахунків доцільно покласти метод фундаментальних аргументів [3]. При цьому для підвищення точності розрахунків параметр ε пропонується розраховувати також методом фундаментальних аргументів. Крім того, для визначення значення ϑ слід використовувати не приблизний метод, як в роботі [3], а розв'язувати так зване рівняння центра Сонця [10].

Тоді подальші розрахунки проводяться таким чином. Визначається поточне значення ексцентриситету

$$e = 0,01675104 - 0,0000418T - 0,000000126T^2. \quad (4)$$

Для знаходження кута ϑ розраховується середня аномалія Сонця

$$M = 358^\circ,47583 + 35999^\circ,04975T - 0^\circ,000150T^2 - 0^\circ,0000033T^3$$

і розв'язується рівняння центра Сонця

$$C = (1^\circ,919460 - 0^\circ,004789T - 0^\circ,000014T^2) \sin M + \\ + (0^\circ,020094 - 0^\circ,000100T) \sin 2M + 0^\circ,000293 \sin 3M. \quad (5)$$

Далі після переведення значення C в градуси знаходиться істинна аномалія

$$\vartheta = M + C. \quad (6)$$

Таким чином, після підстановки (4) і (6) в (3) буде знайдена величина R для виразу (2). Для знаходження значення Θ і підстановки у вираз (2) слід скористатися рівнянням (5), а також знайти середню геометричну довготу Сонця L , що обчислюється від середньої точки рівнодення на задану дату за формулою

$$\Theta = L + C; \quad (7)$$

$$L = 279^\circ,69668 + 36000^\circ,76892T + 0^\circ,0003025T^2.$$

Останнім невідомим у виразі (2) є нахилення екліптики ε . Його поточне значення можна знайти за виразом [9]

$$\varepsilon = 23^\circ,452294 - 0^\circ,0130125T - 0^\circ,00000164T^2 + 0^\circ,000000503T^3.$$

Особливістю запропонованої математичної моделі, яка впливає на точність результатів розрахунків R і Θ , є врахування системи лише двох небесних тіл – Сонця та Землі. В разі ж необхідності підвищення точності потрібно врахувати збурювальний вплив інших тіл Сонячної системи. Одним з можливих варіантів переходу до моделі збуреного руху є розрахунок поправок і врахування їх при визначенні значень збуреного радіус-вектора [10]

$$R_{зБ} = R + 0,00000543 \sin A + 0,00001575 \sin B + \\ + 0,00001627 \sin C + 0,00003076 \cos D + 0,00000927 \sin H \quad (8)$$

та збуреної істинної геометричної довготи

$$\Theta_{зБ} = \Theta + 0^\circ,00134 \cos A + 0^\circ,00154 \cos B + \\ + 0^\circ,00200 \cos C + 0^\circ,00179 \sin D + 0^\circ,00178 \sin E. \quad (9)$$

У формулах (8), (9) за допомогою поправок A і B враховується збурювальний вплив Венери, C – Юпітера, D – Місяця. Поправки E та H пов'язані з довгоперіодичними коливаннями інших збурювальних факторів.

Кожна з поправок є функцією часу і розраховується за виразами [10]

$$A = 153^{\circ},23 + 22518^{\circ},7541T ;$$

$$B = 216^{\circ},57 + 45037^{\circ},5082T ;$$

$$C = 312^{\circ},69 + 32964^{\circ},3577T ;$$

$$D = 350^{\circ},74 + 445267^{\circ},1142T - 0^{\circ},00144T^2 ;$$

$$E = 231^{\circ},19 + 20^{\circ},20T ;$$

$$H = 353^{\circ},40 + 65928^{\circ},7155T .$$

Таким чином, для підвищення точності розрахунків координат центра Сонця у вираз (2) потрібно підставити уточнене значення (8) замість (3), а також (9) замість (7).

Для перевірки працездатності алгоритму розроблено програмне забезпечення [11]. Воно дозволяє розраховувати значення α_S та β_S на будь-який інтервал часу з мінімальною дискретністю 1 с. Для оцінки точності розрахунків запропоновано порівняти розраховані значення α_S^P з вимірними α_S^B за допомогою штатного геодезичного теодоліта Т10В. Виміри за допомогою теодоліта можна вважати за еталонні, тому що середньоквадратична помилка виміру кутів становить $10''$, а необхідна точність розрахунків кута $\alpha_S^P \leq 1^{\circ}$.

Для проведення вимірів теодоліт встановлювався поблизу пункту першого класу Державної опорної геодезичної мережі. Проводилось 5 циклів вимірювань в різні пори року. Кожний цикл вимірювань продовжувався близько трьох годин. Для оцінки точності розрахунків використовувались тільки виміри кута місця Сонця. Виміри азимуту також проводились, однак вони не використовувались для оцінки, оскільки не вдалось виявити точну поправку магнітного схилення для юстирування теодоліта на північ.

Для прикладу в табл. 1 подано декілька результатів вимірних і розрахованих значень кута місця Сонця.

Таблиця 1

Дата	t_k	α_S^P	α_S^B	α_{II}	$\alpha_{II} - \alpha_S^P$
16.11.02	13 ^h 36 ^m	17° 10'	16° 50'	17° 00'	10,0'
16.11.02	13 ^h 45 ^m	16° 48'	16° 37'	16° 42,5'	5,5'
16.11.02	13 ^h 58 ^m	14° 42'	15° 10'	14° 56'	14'
16.11.02	14 ^h 10 ^m	14° 09'	14° 31'	14° 20'	11'
16.11.02	14 ^h 19 ^m	13° 33'	13° 40'	13° 36,5'	3,5'

Для оцінки точності розрахунку кута місця Сонця за допомогою розробленого алгоритму пропонується такий підхід. Припустимо, що всі виміри теодолітом рівноточні. Тоді приблизне значення кута місця Сонця α_{II} для кожного моменту (табл. 1) часу визначається за формулою [12]:

$$\alpha_{II} = \frac{\alpha_S^P + \alpha_S^B}{2} .$$

Спочатку для приблизної оцінки точності розрахунку кута місця Сонця визначається різниця між приблизним значенням та розрахованим ($\alpha_{II} - \alpha_S^P$). Як показав аналіз, для всіх проведених експериментів граничні значення різниці знаходяться в межах від $(\alpha_{II} - \alpha_S^P)_{\min} = 1'$ до $(\alpha_{II} - \alpha_S^P)_{\max} = 57'$. Цей факт дозволяє зробити попередній висновок про прийнятну точність розрахунків за допомогою розробленого алгоритму.

Проте для більш точної оцінки пропонується визначати середньоквадратичне відхилення [12]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_{II} - \alpha_S^P)^2} ,$$

де n – кількість проведених вимірів, що для різних задач знаходиться в межах від 40 до 60.

Для проведених експериментів розрахункові значення становлять $\sigma = 16',17$. При цьому слід відзначити, що σ є точковою оцінкою параметрів розподілу, яка не завжди повно характеризує результати експерименту. Тому слід визначити інтервал, який покриває σ з

довірчою ймовірністю $\gamma = 0,95$. При цьому можна використовувати табульовану функцію $q = q(\gamma, n)$ [12]. Тоді межі інтервалу визначаються як

$$\sigma(1 - q) \leq \sigma \leq \sigma(1 + q).$$

Розрахунки за цією методикою показують, що параметр $\sigma = 16',17$ знаходиться в середині інтервалу $11',8 \leq \sigma \leq 20',52$ з довірчою ймовірністю $\gamma = 0,95$. Таким чином, похибки розрахунків значення α_S^p за допомогою розробленого алгоритму не перебільшує 1° , що відповідає висунутим вимогам.

Розроблений алгоритм розрахунку умов освітленості заданого району земної поверхні пропонується використовувати в установах Національного центру управління та випробувань космічних засобів для вдосконалення технології планування роботи БСК космічних апаратів ДЗЗ. Крім того, він може застосовуватись установами, що займаються обробкою даних ДЗЗ, а також у навчальному процесі у ВНЗ, які готують фахівців для розробки та експлуатації космічних систем.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Космічний апарат "Січ-1". Бортова апаратура, компоновка і конструкція: Довідкові матеріали / О.В. Андреев, П.Ю. Керницький, В.Г. Парфенюк, С.П. Фриз / Под ред. В.Г. Парфенюка. – Житомир: ЖВІРЕ, 2001. – 116 с.
2. Бакулин П.И., Кононович Э.В., Мороз В.И. Курс общей астрономии. – М.: Наука, 1983. – 560 с.
3. Попович П.Р., Скребушевский Б.С. Баллистическое проектирование космических систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 240 с.
4. Основы теории полета космических аппаратов / В.С. Авдеевский, Б.М. Антонов, Н.А. Анфимов и др. / Под ред. М.К. Нариманова и Г.С. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1972. – 608 с.
5. Астрономический ежегодник. – М.: Наука, 1989. – 480 с.
6. Астрономічний календар на 2000 р. Випуск 46 / Відп. редактор Д.П. Дума. – К.: Сфера, 1999. – 240 с.
7. Фриз С.П. Результаты разработки алгоритму розрахунків цілевказівок для прийому метеорологічної інформації з космічних апаратів // Збірник наукових праць. – Житомир: ЖВІРЕ. – № 4. – 2002. – С. 38–46.
8. Теоретичні основи польоту космічних апаратів: Навчальний посібник / В.Є. Бажан, І.Д. Варламов, П.В. Фриз, С.П. Фриз / Під ред. Д.В. П'яковського. – Житомир: ЖВІРЕ, 2000. – 180 с.
9. Астрономический календарь. Постоянная часть / Под. ред. В.К. Абалакина. Изд. 7-е переработанное. – М.: Наука, 1981. – 704 с.
10. Меес Ж. Астрономические формулы для калькуляторов / Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 168 с.
11. Фриз С.П., Коряк Д.А. Програма розрахунку умов освітлення району спостереження з метою вдосконалення процесу планування роботи БСК КА / Фонд алгоритмів та програм. – ЖВІРЕ, 2002.
12. Гуреев М.А. Теория вероятностей и элементы математической статистики. – М.: Воениздат, 1980. – 400 с.

ФРИЗ Сергій Петрович – старший викладач кафедри Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

– ефективність функціонування космічних систем.

Подано 18.04.2003