

УДК 004.986

<https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2020.1.1.5>

Я.О. ПОВОД

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0001-8403-5945

В.Г. ШЕРСТЮК

Херсонський національний технічний університет

ORCID: 0000-0002-9096-2582

РОЗРАХУНОК СОНЯЧНОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ЗА МЕЖАМИ АТМОСФЕРИ ЗЕМЛІ

У даній роботі для розробки еталонного алгоритму розрахунку сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі було використано найточніші на даний момент значення сонячної сталої, яке було прийняте космічною спільнотою. Було зроблено порівняльний аналіз з іншими алгоритмами, та розглянуті різні способи отримання потужності сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі. В процесі дослідження визначено які похибки має кожен з розглянутих способів, також досліджено споживання кількості процесорного часу кожним з цих способів. Було розроблено тести для кожного з розглянутих алгоритмів в рівних умовах для порівняння їх ефективності та точності. Отримані дані зведено до таблиці, за допомогою якої можна буде обрати оптимальний алгоритм для певної задачі.

Використовуючи теорію VSOP87 було проведено розрахунки для визначення точної відстані від Землі до Сонця, так як це один з основних параметрів, що впливає на сонячну інсоляцію поблизу Землі за межами її атмосфери. Спираючись на те, що зміни сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі мають періодичний характер, було використано функцію Фур'є для апроксимації еталонного алгоритму. За допомогою порівняння існуючих алгоритмів розрахунку сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі, визначення їх переваг і недоліків було розроблено даний еталонний алгоритм. Задля наочності було побудовано графіки: графік сонячної інсоляції з даних типового метеорологічного року; графік похибки апроксимації даних типового метеорологічного року за функцією першого порядку; графік похибки апроксимації даних типового метеорологічного року за функцією другого порядку; графік похибки апроксимації еталонного алгоритму за функцією першого порядку; графік похибки апроксимації еталонного алгоритму за функцією другого порядку.

Практичне значення розробленого алгоритму полягає в використанні його в програмному забезпеченні, яке допоможе в розрахунках потужності сонячного випромінювання для геліоцентричних, фотоелектричних станцій та для можливого використання в інших галузях де потрібні прогнозовані данні сонячної інсоляції.

Ключові слова: алгоритм, похибка, орбіта, графік, потужність, інсоляція, аналіз, апроксимація.

Я.А. ПОВОД

Херсонский национальный технический университет

ORCID: 0000-0001-8403-5945

В.Г. ШЕРСТЮК

Херсонский национальный технический университет

ORCID: 0000-0002-9096-2582

РАСЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ ИНСОЛЯЦИИ ЗА ПРЕДЕЛАМИ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

В данной работе для разработки эталонного алгоритма расчета солнечной инсоляции за пределами атмосферы Земли были использованы самые точные на данный момент значение солнечной постоянной, которое были приняты космическим сообществом. Было сделано сравнительный анализ с другими методами, и рассмотрены различные способы получения мощности солнечной инсоляции за пределами атмосферы Земли. В процессе исследования определены какие погрешности имеет каждый из рассмотренных способов, также исследовано потребления количества процессорного времени каждым из этих способов. Был разработан тесты для каждого из рассмотренных алгоритмов в равных условиях для сравнения их эффективности и точности. Полученные данные сведены в таблицу, с помощью которой можно будет выбрать оптимальный алгоритм для определенной задачи.

Используя теорию VSOP87 было проведены расчеты для определения точного расстояния от Земли до Солнца, так как это один из основных параметров, влияет на солнечную инсоляцию вблизи Земли за пределами ее атмосферы. Опираясь на то, что изменения солнечной инсоляции за пределами атмосферы Земли имеют периодический характер, было использовано функцию Фурье для аппроксимации эталонного алгоритма. С помощью сравнения существующих алгоритмов расчета

солнечной инсоляции за пределами атмосферы Земли, определение их преимуществ и недостатков был разработан данный эталонный алгоритм. Для наглядности были построены графики: график солнечной инсоляции по данным типового метеорологического года; график погрешности аппроксимации данных типичного метеорологического года по функции первого порядка; график погрешности аппроксимации данных типичного метеорологического года за функцией второго порядка; график погрешности аппроксимации эталонного алгоритма с функцией первого порядка; график погрешности аппроксимации эталонного алгоритма с функцией второго порядка.

Практическое значение разработанного алгоритма заключается в использовании его в программном обеспечении, которое поможет в расчетах мощности солнечного излучения для гелиоцентрических, фотоэлектрических станций и для возможного использования в других отраслях где нужны прогнозируемые данные солнечной инсоляции.

Ключевые слова: алгоритм, погрешность, орбита, график, мощность, инсоляция, анализ, аппроксимация.

Y.O. POVOD

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0001-8403-5945

V.G. SHERSTIUK

Kherson National Technical University

ORCID: 0000-0002-9096-2582

CALCULATION OF SOLAR INSOLATION OUTSIDE THE EARTH ATMOSPHERE

In this work, to develop a reference algorithm for calculating solar insolation outside the Earth's atmosphere, the most accurate solar constant value adopted by the cosmic community has been used at this time. A comparative analysis was made with other algorithms and various ways of obtaining solar insolation power outside the Earth's atmosphere were considered. During the investigation, the errors were determined by each of the considered methods, and the consumption of CPU time by each of these methods. Tests were developed for each of the considered algorithms under equal conditions to compare their efficiency and accuracy. The data obtained is summarized in a table, by which we can choose the optimal algorithm for a particular task.

The VSOP87 theory were used to calculate the exact distance from Earth to the Sun, as this is one of the main parameters that affect solar insolation outside the Earth atmosphere. Because solar insolation changes outside the Earth's atmosphere are periodic, the Fourier function was used to approximate the reference algorithm. By comparing the existing algorithms for calculating solar radiation outside the Earth's atmosphere to determine their strengths and weaknesses was developed given the reference algorithm. For the sake of clarity, the following graphs were constructed: a graph of solar insolation from a typical meteorological year; a graph of the error of approximation of data of a typical meteorological year by function of the first order; a graph of error of approximation of data of a typical meteorological year by function of the second order; a graph of the error of approximation of the first-order reference algorithm; a graph of the error of approximation of the second-order reference algorithm.

The practical significance of the algorithm is to use it in software that helps in calculating power for heliocentric solar radiation, PV plants and for possible use in other industries that require predictable solar insolation data.

Keywords: algorithm, error, orbit, graph, power, insolation, analysis, approximation.

Постановка проблеми

Сонячна інсоляція за межами атмосфери Землі є однією із складових розрахунку сонячної інсоляції в певній точці. Значення потужності сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі можна отримати декількома способами. Проте кожен із способів має свою похибку а також споживає певну кількість процесорного часу. Для того, щоб полегшити вибір можна зробити тести цих алгоритмів в рівних умовах, та звести дані до таблиці за допомогою якої можна буде обрати оптимальний алгоритм для певної задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зазвичай в програмному забезпеченні, для якого точність не має критичного значення, використовується постійне значення. Найточнішим на даний момент є значення сонячної сталої, яке прийняте космічною спільнотою в 1366,1 Вт/м²[1]. Проте це значення є медіаною та не враховує рух Землі навколо Сонця.

В програмному забезпеченні з підвищеними вимогами до точності зазвичай використовують спрощену формулу сонячної інсоляції за певний день року.

Приклад спрощеної формули [2]:

$$\frac{H}{H_{const}} = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi(n-2)}{365}\right), \quad (1)$$

Де H_{const} - середнє значення потужності сонячного випромінювання, $H_{const} = 1353 \text{ Вт/м}^2$;
 n – порядковий номер дня в році.

Також нерідко використовуються данні типового метеорологічного року. Для прикладу були обрані дані ТМУЗ[3], які були розроблені національною лабораторією відновлюваної енергії США. На графіку ці данні мають наступний вигляд:

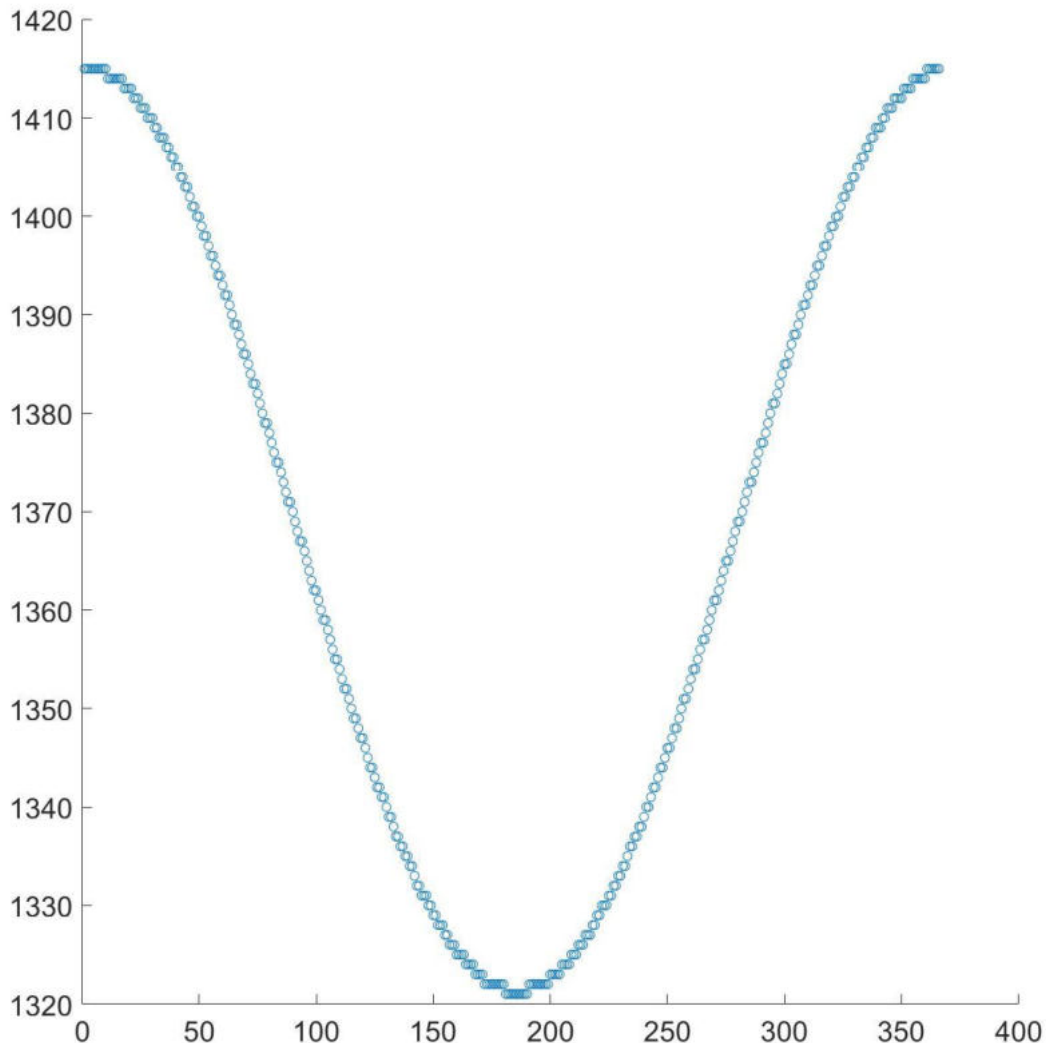


Рис. 1. Графік сонячної інсоляції з даних типового метеорологічного року

Медіана цього набору даних складає: 1366 Вт/м^2 ;
середнє значення: 1367.1 Вт/м^2 .

National Solar Radiation Data Base одержало данні за період 1991- 2005 р.р. з 1021 метеостанції. Серед цих даних було використано 219 метеостанцій з найвищим класом точності, всього отримано 79935 точок.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було порівняння існуючих алгоритмів розрахунку сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі та розробка еталонного алгоритму.

Викладення основного матеріалу дослідження

Використовувати базу даних сонячної інсоляції може бути не достатньо зручним рішенням. Ці дані округлені до цілого числа, та мають форму синусоїди. Для відображення цих даних у вигляді функції можна зробити апроксимацію. Так як ця функція має періодичний характер, має підійти функція Фур'є. При апроксимації функцією Фур'є першого порядку, було отримано наступну формулу:

$$H = 1368 + 47.5\cos(0.01676n) - 1.389\sin(0.01676n), \quad (2)$$

Коефіцієнт детермінації цієї функції дорівнює: 0.9998,

А середньоквадратична похибка складає 0.4085 Вт/м^2 .

Графік похибки має наступний вигляд:

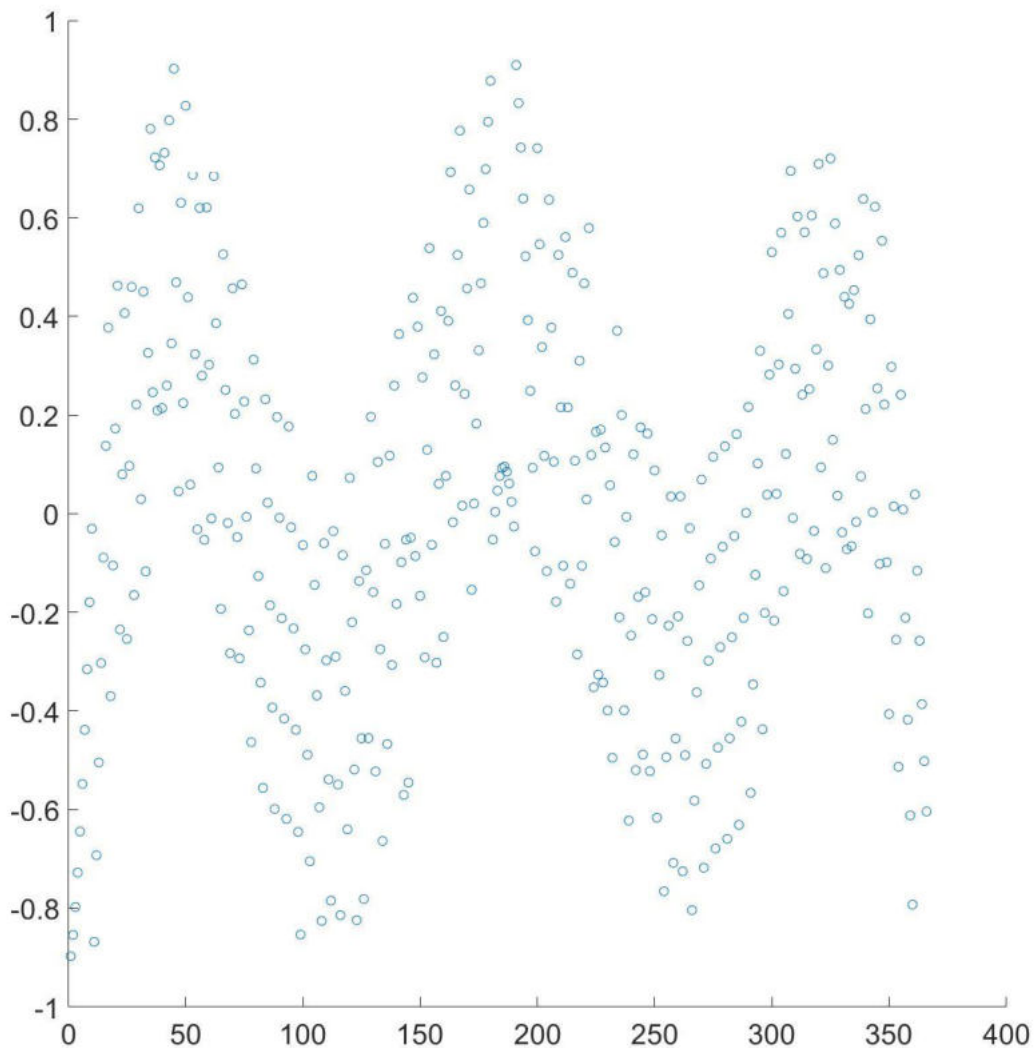


Рис. 2. Графік похибки апроксимації даних типового метеорологічного року за функцією першого порядку

Як можна зазначити графік похибки має періодичний характер, отже підвищення порядку функції може підвищити точність апроксимації.

Апроксимація функцією Фур'є другого порядку має наступний вигляд:

$$1367 + 46.8\cos(0.01719n) + 2.426\sin(0.01719n) + 0.9376\cos(2 \times 0.01719n) + 0.1315\sin(2 \times 0.01719n), \quad (3)$$

Коефіцієнт детермінації цієї функції дорівнює: 0.9999,
А середньоквадратична похибка складає 0.29 Вт/м².
Графік похибки має наступний вигляд:

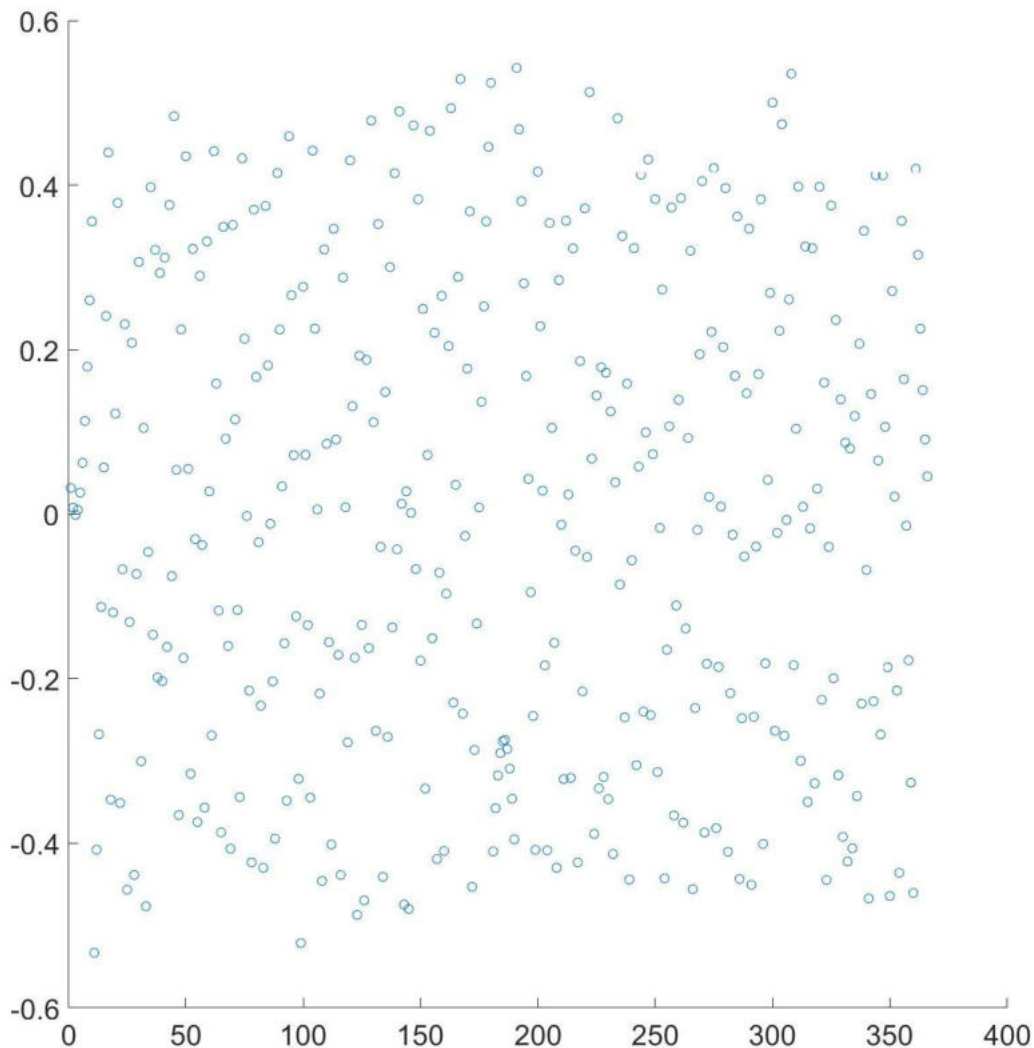


Рис. 3. Графік похибки апроксимації даних типового метеорологічного року за функцією другого порядку

Графік похибки має рівномірний характер, а враховуючи те, що дані округлені до цілих значень, можна вважати, що було досягнена функціональна залежність.

Точність розрахунків здебільшого залежить від точності розрахунку відстані від Сонця до Землі. Зазначені вище алгоритми використовують спрощену модель руху Землі навколо Сонця ці алгоритми можуть мати високу точність, але лише на певному інтервалі часу. Для більш точних розрахунків можливо скористатися більш точною моделлю руху Землі. Однією з найточніших математичних моделей розрахунку положення планет є теорія VSOP87[4] яка дозволяє розрахувати положення планет з точністю до однієї кутової секунди на часовому відрізку від 2000 років д. н. е. до 6000 років н. е.

Знаючи відстань від Сонця до Землі можна знайти потужність сонячного випромінювання за наступною формулою:

$$H = \frac{H_{Earth}}{D^2}, \quad (4)$$

Де D^2 відстань від Землі до Сонця в астрономічних одиницях

Хоча точний алгоритм дозволяє отримати найточніший результат, проте його виконання потребує значних ресурсів комп'ютера, тому було вирішено додатково розробити апроксимацію цього алгоритму. Характеристики орбіти Землі змінюються на великому проміжку часу, отже було вирішено робити апроксимацію для розрахунків за період з 2000 по 2100 роки. В якості функції апроксимації було використано функцію Фур'є.

Апроксимація за функцією першого порядку має наступний вигляд:

$$H = 1368 + 46.25 \cos(0.01675n) - 0.6233 \sin(0.01675n), \quad (5)$$

Графік похибки має наступний вигляд:

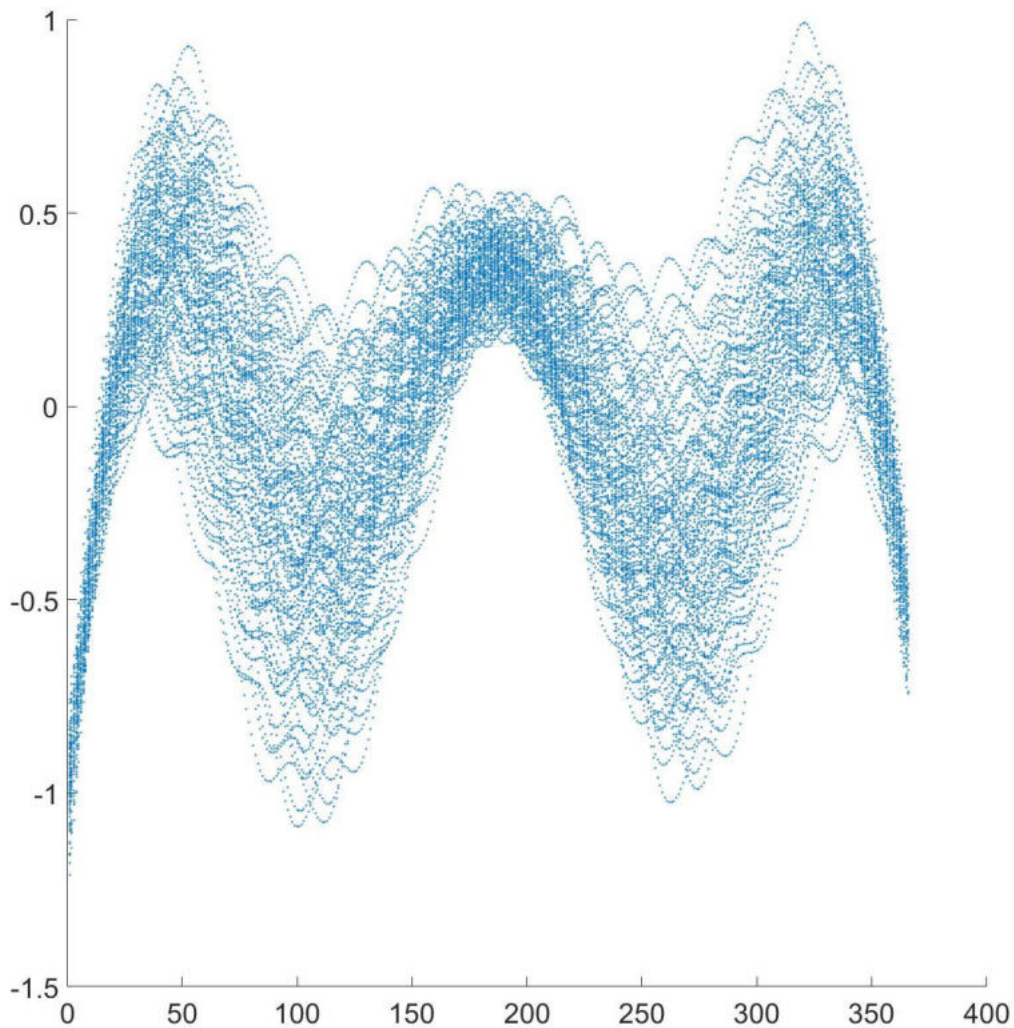


Рис. 4. Графік похибки апроксимації еталонного алгоритму за функцією першого порядку

Апроксимація за функцією другого порядку має наступний вигляд:

$$1366 + 45.52 \cos(0.01718n) + 3.072 \sin(0.01718n) + 0.911 \cos(2 \times 0.01718n) + 0.1239 \sin(2 \times 0.01718n), \quad (6)$$

Графік похибки має наступний вигляд:

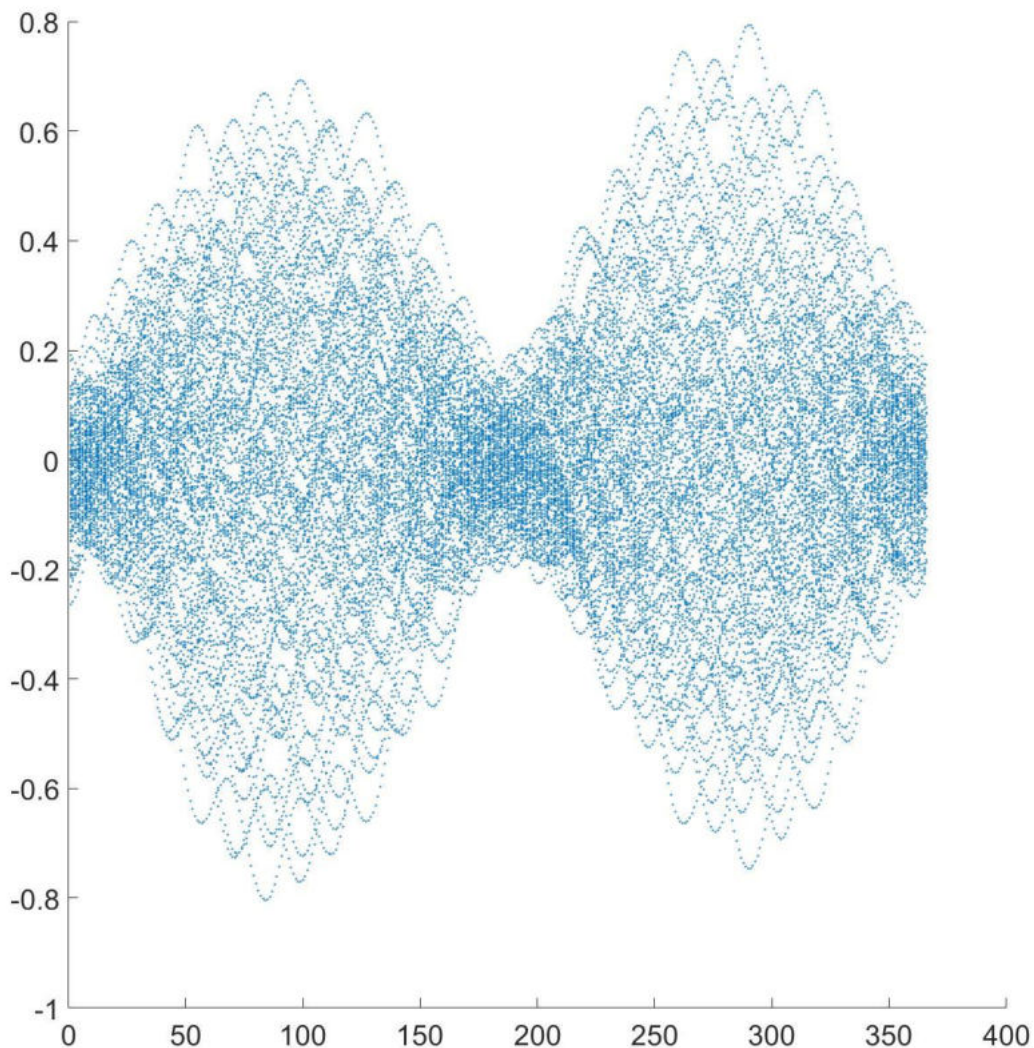


Рис. 5. Графік похибки апроксимації еталонного алгоритму за функцією другого порядку

Подальше підвищення порядку функції не призводить до підвищення точності апроксимації.

Для остаточного вибору алгоритму були порівняні всі алгоритми за швидкістю роботи та точністю. Всі алгоритми були реалізовані на мові програмуванні C#. Час роботи кожного алгоритму вимірювався за допомогою класу Stopwatch. Всі алгоритми робили розрахунки для заздалегідь підготовленого масиву з датами за період від 01.01.2000 до 01.01.2100. Було виконано декілька прогонів для масивів від 1 до 525600 елементів. Всі алгоритми мають близькі можливості по розділенню на багато поточне виконання, тому для більшої точності вимірювання всі алгоритми виконувалися в одному потоці з найвищим пріоритетом.

Апаратна частина на якій проводилися тести представляє з себе:

Центральний процесор - AMD Ryzen 3 1200, який працює на базовій частоті (3.1 ГГц).

Оперативна пам'ять працює в двоканальному режимі на частоті 3333 МГц

В результаті були отримані наступні дані:

Таблиця 1

Порівняння швидкості роботи алгоритмів

Алгоритм	Час розрахунку в мс.				
	1	12	365	8760	525600
Підстановка константи	0.0003	0.0003	0.0009	0.032	2.0344
Алгоритм G. D. Rai	0.142	0.1047	0.1625	0.8908	38.7256
Підстановка з масиву даних ТМУЗ	0.0895	0.1007	0.1506	0.3762	17.5563
Апроксимація даних ТМУЗ за першим порядком	0.1278	0.1142	0.1823	1.3163	72.8139
Апроксимація даних ТМУЗ за другим порядком	0.1311	0.1393	0.251	2.5137	139.0558
Точний розрахунок за допомогою повного алгоритму VSOP87	0.1397	0.4773	11.4612	270.1652	16349.2004
Використання лише першої гармоніки алгоритму VSOP87	0.1378	0.2077	6.1615	147.8361	8878.7557
Апроксимація алгоритму VSOP87 за першим порядком	0.0918	0.1562	0.1469	1.38	72.2877
Апроксимація алгоритму VSOP87 за другим порядком	0.1225	0.1995	0.2834	2.5269	140.7203

Для оцінки точності всі моделі були порівняні точним алгоритмом на базі алгоритму VSOP87.

Таблиця 2

Порівняння похибки алгоритмів

Алгоритм	Коефіцієнт детермінації	Середньоквадратична похибка, Вт/м ²
Підстановка константи	0	32,2487761611812
Алгоритм G. D. Rai	0,82859479365146	13,3511241844537
Підстановка з масиву даних ТМУЗ	0,996405524002744	1,93340850534399
Апроксимація даних ТМУЗ за першим порядком	0,998580898295569	1,21482184179058
Апроксимація даних ТМУЗ за другим порядком	0,998469897770687	1,2614384214661
Точний розрахунок за допомогою повного алгоритму VSOP87	1	0
Використання лише першої гармоніки алгоритму VSOP87	0,99998724766791	0,115159729952736
Апроксимація алгоритму VSOP87 за першим порядком	0,999662658897012	0,592298265902048
Апроксимація алгоритму VSOP87 за другим порядком	0,999829972313471	0,420499664545641

Для оцінки швидкості слід звернути увагу на те, що якщо час розрахунку менший ніж 17 мс. То розрахунок буде виконуватися між кадрами відображення, тобто буде повністю непомітним для користувача. В реальному програмному забезпеченні найвірогідніше буде розраховуватися щоденне значення на протязі одного року, тобто всього буде проводитись 365 розрахунків, а всі алгоритми виконують 365 розрахунків менше ніж за 17 мс.

Висновки

1. Для отримання мінімальної похибки результатів дослідження було використано найточніші на даний момент значення сонячної сталої, яке було прийняте космічною спільнотою. Це дало змогу зробити порівняльний аналіз розробленого алгоритму з іншими існуючими алгоритмами, та дослідити різні способи отримання потужності сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі. Для підвищення точності еталонного алгоритму було враховано, що характеристики орбіти Землі безперервно змінюються на великому проміжку часу, тому було зроблено апроксимацію для розрахунків за період з 2000 по 2100 роки за допомогою функції Фур'є. Проведене дослідження дало змогу побудувати математичну модель для прогнозування сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі на значному проміжку часу.

2. В процесі дослідження визначено які похибки має кожен з існуючих алгоритмів та розглянутих способів, також досліджено споживання кількості процесорного часу кожним з цих способів. Було розроблено тести для кожного з розглянутих алгоритмів в рівних умовах для порівняння їх ефективності та точності. Отримані дані зведено до таблиці, за допомогою якої можна буде обрати

оптимальний алгоритм для певної задачі, а також порівняно час виконання реалізацій цих алгоритмів. Враховуючи, що отриманий еталонний алгоритм має мінімальну похибку в порівнянні з існуючими, та споживає меншу кількість процесорного часу, його використання для розрахунків сонячної інсоляції за межами атмосфери Землі буде переважним перед розглянутими при порівнянні алгоритмами.

Список використаної літератури

1. ASTM E490-00a(2019). Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019.
2. G. D. Rai, Solar Energy Utilisation. Khanna Publishers, 1980. 44 с.
3. National Solar Radiation Data Base. URL: https://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2005/tmy3 (дата звернення: 08.12.2019)
4. Bretagnon, P.; Francou, G. Planetary Theories in rectangular and spherical variables: VSOP87 solution. Astronomy and Astrophysics, Vol. 202, 309 с.

References

1. ASTM E490-00a(2019), Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org. doi: 10.1520/E0490-00AR19
2. G. D. Rai, "Solar Energy Utilisation", Khanna Publishers, 1980, p. 44.
3. National Solar Radiation Data Base. Available at: https://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2005/tmy3 (accessed 08 December 2019).
4. Bretagnon, P.; Francou, G. (1988). "Planetary Theories in rectangular and spherical variables: VSOP87 solution". Astronomy and Astrophysics. 202: 309.