

О. В. Жила¹, В. В. Кошарський²

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

² Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна

РОЗРОБКА І АНАЛІЗ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ ОБЧИСЛЕННЯ ЯСКРАВИСНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ АТМОСФЕРИ В СЕРЕДОВИЩІ MAPLE НА ОСНОВІ РЕКОМЕНДАЦІЙ ITU-R

Анотація. Стаття присвячена розробці та аналізу імітаційної моделі для обчислення низхідної яскравісної температури, реалізованої в середовищі Maple на основі рекомендацій ITU-R. **Метою статті** є створення методології та імітаційної моделі для чисельного моделювання яскравісної температури, а також оцінка ефективності ітеративного та рекурсивного методів з урахуванням їх продуктивності та практичного застосування. **Завдання дослідження** включають розробку алгоритмів обчислення яскравісної температури, реалізацію моделі в Maple, аналіз залежності яскравісної температури від кутів місця та частот, порівняння ітеративного й рекурсивного підходів за ключовими параметрами та оцінку точності моделі відносно еталонних даних. **Отриманий результат** демонструє коректність моделі, підтверджену близькістю обчислених значень яскравісної температури до реальних даних. Ітеративний метод виявився швидшим, тоді як рекурсивний підхід краще ілюструє фізичну модель. Чисельне моделювання відображає залежність яскравісної температури від кутів місця, що узгоджується з фізичними принципами. **Галузь застосування:** охоплює метеорологію (аналіз атмосферного випромінювання), телекомунікації (оцінка затухання сигналів 5G/6G), дистанційне зондування Землі та освіту (демонстрація RTE і алгоритмів). Перспективи включають інтеграцію розсіювання та даних реального часу.

Ключові слова: яскравісна температура, імітаційна модель, радіометрія, мікрохвильове випромінювання.

Вступ

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Яскравісна температура є важливим параметром у радіофізиці та метеорології і використовується для описання випромінювання атмосфери Землі і космосу у різних діапазонах частот. Сучасні методи її обчислення спираються на розв'язання радіаційного трансферного рівняння, яке враховує поглинання, випромінювання та розсіювання електромагнітних хвиль у атмосфері. Існує багато моделей, що описують яскравісну температуру, кожна з яких має унікальні особливості. Серед таких моделей вирізняється Radiative Transfer for TOVS (RTTOV) – швидка модель прямого переносу випромінювання, що розроблена Європейським центром прогнозів погоди ECMWF. Ця модель інтегрує профілі температури, вологості та хмарності для аналізу даних супутникових сенсорів, а також використовується в асиміляції даних метеорологічних прогнозів. Також ця модель використовується для інтерпретації вимірювань мікрохвильових радіометрів завдяки своїй оптимізації для роботи в реальному часі [1–3]. Іншою цікавою розробкою є модель Atmospheric Radiative Transfer Simulator (ARTS), яка враховує розсіювання на дрібних частинках, таких як дощ, сніг та лід, що особливо важливо для частот вище 50 ГГц. Ця модель базується на стохастичних та детермінованих методах і використовується для аналізу даних пасивних мікрохвильових сенсорів, наприклад, GPM Microwave Imager, в дослідженні хмар та опадів [4,5]. Нещодавні дослідження, такі як роботи із використанням нейронних мереж, пропонують заміну традиційних чисельних моделей на перенавчені алгоритми, які здатні передбачати яскравісну температуру на базі основних даних про атмосферні профілі. Такі підходи прискорюють обробку даних у реальному часі, що має важливе значення

для супутникового зв'язку [6].

Особливий інтерес представляють моделі, засновані на рекомендаціях Міжнародного союзу електрозв'язку (ITU), зокрема, стандарті ITU-R P.676-13 [7]. Ця модель враховує вклад кисню, водяної пари та рідкої води, спираючись на емпіричні залежності і спектральні лінії, що робить її популярною у супутниковій метеорології та системах зв'язку для оцінки затухання сигналів. Висока точність при стандартних умовах і регулярні оновлення стандарту забезпечують її практичну значимість.

Яскравісна температура, алгоритм знаходження якої детально описано у [7], відіграє важливу роль у радіолокації та радіометрії як ефективна температура випромінювання, що реєструється приймальними системами з урахуванням атмосферного поглинання. Цей параметр критичний для інтерпретації даних у мікрохвильовому діапазоні, де атмосфера значною мірою модулює сигнал. Вона також є еталоном для калібрування радіолокаційних та радіометричних систем, забезпечуючи точність вимірювань відображень від земної поверхні або космічних об'єктів.

Сучасні дослідження у [8] описують калібрування даних із застосуванням яскравісної температури для сенсорів типу VIIRS та NOAA-21. У поєднанні з моделями атмосферного поглинання яскравісна температура дозволяє розділяти вклади атмосфери та цільових об'єктів, що важливо для дистанційного зондування Землі, дослідження планет та астрономічних спостережень. Наприклад, стаття [9] демонструє її застосування для аналізу земних поверхонь з використанням даних SMAP.

У телекомунікаціях яскравісна температура використовується для оцінки завад та затухання сигналів, особливо у високошвидкісних системах 5G та 6G у різних діапазонах частот. Аналіз її впливу на затухання у терагерцовому діапазоні для 6G представл-

ено у роботі [10], а дослідження [11] об'єднує експериментальні та теоретичні дані про вплив атмосфери на 6G-системи. В роботі [12] акцент зроблено на оптимізації каналів з навколишніми поверхнями.

Постановка проблеми. Дослідження присвячене створенню імітаційної моделі розрахунку яскравісної температури у середовищі Maple на базі стандартів [7, 13, 14]. Запропонований підхід поєднує ітеративний та рекурсивний методи чисельного розв'язання RTE, забезпечуючи гнучкість та адаптивність до різних атмосферних профілів. Модель включає дискретизацію атмосфери з кроком 0.5 км до висоти 100 км, інтеграцію функції поглинання та траєкторії радіохвиль, а також порівняння продуктивності двох підходів. Це не лише відповідає міжнародним стандартам, але і представляє зручний інструмент для освітніх та дослідницьких цілей, зберігаючи баланс між точністю, швидкістю та наочністю коду.

Розроблена у програмі Maple імітаційна модель має значні переваги. Використання даного пакету прикладних програм, відомого своїми символьними та чисельними обчисленнями, забезпечує легку модифікацію алгоритмів та адаптацію до різних умов або частотним діапазоном, включаючи можливість інтеграції з іншими стандартами завдяки модульній структурі. Платформа також підтримує інтерактивність та візуалізацію, що робить модель цінним ресурсом для науковців. Порівняння двох підходів – ітеративного та рекурсивного – дозволило визначити оптимальний підхід для розрахунку яскравісної температури. Висока точність, що підтвердилась відповідністю стандартам, робить модель надійним інструментом для наукових та практичних задач.

Мета статті. Основною метою дослідження було створення методології та імітаційної моделі в середовищі Maple, що переводить теоретичні положення різних рекомендацій по обчисленню яскравісної температури у єдину практичну форму для чисельних експериментів. Це мотивовано також представленням інструмента для ілюстрації фізичних основ та алгоритмічних розрахунків яскравісної температури. Проведене дослідження можна вважати основою для подальших покращень, таких як додавання модулів інтеграції з даними реального часу, що відкриває широкі перспективи для більш широкого класу задач. Отримані результати можуть знайти застосування у дистанційному зондуванні, телекомунікаціях (наприклад, у аналізі даних мікрохвильових радіометрів), а також у моделюванні впливу атмосфери на радіолокаційні системи та навігаційні прилади космічних апаратів.

Методологія

Яскравісна температура мікрохвильового випромінювання – це фундаментальна концепція у радіофізиці, метеорології та астрономії, яка використовується для описання інтенсивності випромінювання в термінах температури еквівалентного чорного тіла та може бути обчислена по формулі [7]:

$$T_B(f_{GHz}, T_j) = 0,048 \cdot f_{GHz} \times \left(1 / \left(\exp(0,048 f_{GHz} / T_j) - 1 \right) \right), (K), \quad (1)$$

де T_j – фізична температура j -го шару. Яскравісна температура $T_B(f_{GHz}, T_j)$ добре апроксимується значенням T_j на частоті $f_{GHz} < 0,42$.

Тобто, яскравісна температура T_B визначається як температура ідеального тіла, що випромінює електромагнітна хвиля з тією ж інтенсивністю, що і середовище при певній частоті. Для обчислення яскравісної температури T_B випромінювання потрібно враховувати низхідне випромінювання атмосферних газів (кисню та водяної пари), а також вплив затухання і геометрії траси [7]. Згідно рекомендаціям [7] для моделювання низхідної яскравісної температури необхідно розглядати модель, де атмосфера поділяється на певну кількість шарів, а вибір кількості цих шарів відповідає за точність значення яскравісної температури. Цей вибір залежить від багатьох факторів, включаючи мету дослідження, характеристики атмосфери, частотний діапазон радіометра, обчислювальні ресурси тощо. Як правило, перший шар атмосфери розглядається на поверхні Землі, а останній – це верхній шар атмосфери. Для обчислення сумарної яскравісної температури потрібно розглянути суму значень яскравісної температури випромінювання в кожному шарі, помноживши отриману суму на втрати при переході до нового шару з урахуванням точки спостереження. У цьому випадку розсіювання можна знехтувати, припустивши, що атмосфера знаходиться у стані локальної термодинамічної рівноваги.

При відомих атмосферних профілях фізичної температури, атмосферного та парціального тиску [12] яскравісна температура *низхідного* мікрохвильового випромінювання обчислюється за формулою, що є розв'язком рівняння переносу випромінювання для низхідного мікрохвильового випромінювання за набором дискретних шарів [7]:

$$T_{downwelling} = T_B(f_{GHz}, 2, 73) \cdot 10^{-\left(\sum_{j=1}^k a_j \gamma_j / 10\right)} + \sum_{j=1}^k T_B(f_{GHz}, T_j) \cdot \left(10^{a_j \gamma_j / 10} - 1\right) \cdot 10^{-\left(\sum_{i=1}^j a_i \gamma_i / 10\right)}, (K), \quad (2)$$

де $T_{downwelling}$ – яскравісна температура низхідного випромінювання (в Кельвінах); $T_B(f_{GHz}, T)$ – яскравісна температура для частоти f_{GHz} і температури T ; f_{GHz} – частота в гігагерцах; T_j – температура j -го шару атмосфери; a_j – коефіцієнт поглинання для j -го шару атмосфери; T_j – оптична товщина j -го шару атмосфери; k – загальна кількість шарів атмосфери.

Важливим етапом обчислення яскравісної температури є розрахунок погонного затухання в атмосферних газах [7] на основі моделювання поглинання киснем і водяною парою з використанням даних про спектральні лінії. При цьому, необхідно врахувати додаткові коефіцієнти, що відповідають за нерезонансний спектр поглинання киснем на низьких частотах, поглинання азоту на частотах від 100 ГГц та додаткове поглинання у смузі неперервного поглинання водяною парою.

Формула для обчислення погонного затухання в атмосферних газах має вигляд [7]:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w = 0,1820 \cdot f \times \left(\sum_i \kappa_{iuc} S_i F_i + N_D''(f) + \sum_i \kappa_{вод.пар} S_i F_i \right) \cdot (\partial B / \kappa m), \quad (3)$$

де γ_o – погонне затухання, обумовлене сухим повітрям (киснем); γ_w – погонне затухання, обумовлене водяною парою; S_i – спектральні лінії, F_i – коефіцієнт форми спектральних ліній, $N_D''(f)$ – неперервний спектр для сухого повітря, обумовлений поглинанням азоту та дебаєвським спектром.

Окрім погонного затухання потрібно враховувати траєкторію поширення випромінювання, тобто, обчислювати довжину ділянки траси через кожен шар. Довжина ділянки траси через i -й шар товщиною δ_i обчислюється за формулою [7]:

$$a_i = -r_i \cos \beta_i + \sqrt{r_i^2 \cos^2 \beta_i + 2r_i \delta_i + \delta_i^2}, \quad (\text{км}), \quad (4)$$

де r_i – довжина радіус-вектора із центра Землі до нижньої межі i -го шару; $r_{i+1} = r_i + \delta_i$, r_1 – довжина радіус-вектора Землі до нижньої межі нижнього шару, як правило – це середній радіус Землі (6371 км); β_1 – місцевий зенітний кут при поверхні Землі або близько неї; $\beta_1 = 90 - \varphi$, де φ – видимий кут місця; $\beta_{i+1} = \arcsin(n_1 r_1 \sin \beta / n_i r_{i1})$, n – індекс рефракції із [13].

В рекомендації [7] також зазначено, для обчислення яскравісної температури зручно застосовувати рекурсію. Це пов'язано з природою радіаційного трансферного рівняння, оскільки воно виражається як рекурентне співвідношення, у якому внесок кожного шару атмосфери у значення яскравісної температури залежить від попереднього шару. Окрім того, рекурсія робить модель більш інтуїтивною для розуміння, адже вона чітко демонструє, як випромінювання накопичується і явно відображає фізичність рівняння переносу.

Проте, слід зазначити, що використання рекурсії не є обов'язковим, хоча і мотивовано бажанням відобразити природню рекурентність рівняння переносу. Альтернативний підхід із застосування циклів (ітеративний) також має сенс і може бути більш оптимальним для розрахунку яскравісної температури.

Алгоритми обчислення яскравісної температури та їх порівняння

Даний розділ присвячений детальному опису алгоритмів обчислення низхідної яскравісної температури, реалізованих у середовищі Maple. Розглянуто два підходи: ітеративний та рекурсивний, а також проведено їх порівняння за ключовими характеристиками.

Ітеративний алгоритм базується на циклічному обчисленні яскравісної температури для послідовних шарів атмосфери. Процес починається з ініціалізації

параметрів: висота $h = 0$, яскравісна температура $T_B = 0$, індекс шару $i = 0$ та загальна кількість шарів $N = 100$. У межах циклу виконуються такі кроки:

1. Обчислення коефіцієнту поглинання γ для поточного шару.
2. Визначення довжини шляху.
3. Оновлення яскравісної температури за формулою [7]^

$$T_{B,downwelling,last} = T_{B,downwelling} \cdot L_j + (1 - L_j) \cdot T_B, \quad (5)$$

де $L_j = 10^{-a_j \gamma_j / 10}$.

4. Збільшення індексу $i = i + 1$ та висоти $h = h + \delta h$. Цикл повторюється, доки $i < N$. По завершенні повертається остаточне значення яскравісної температури.

Цей підхід забезпечує лінійну обробку даних і не потребує додаткових ресурсів пам'яті.

На рис. 1 у вигляді блок-схеми зображено алгоритм виконання ітеративного методу обчислення яскравісної температури.

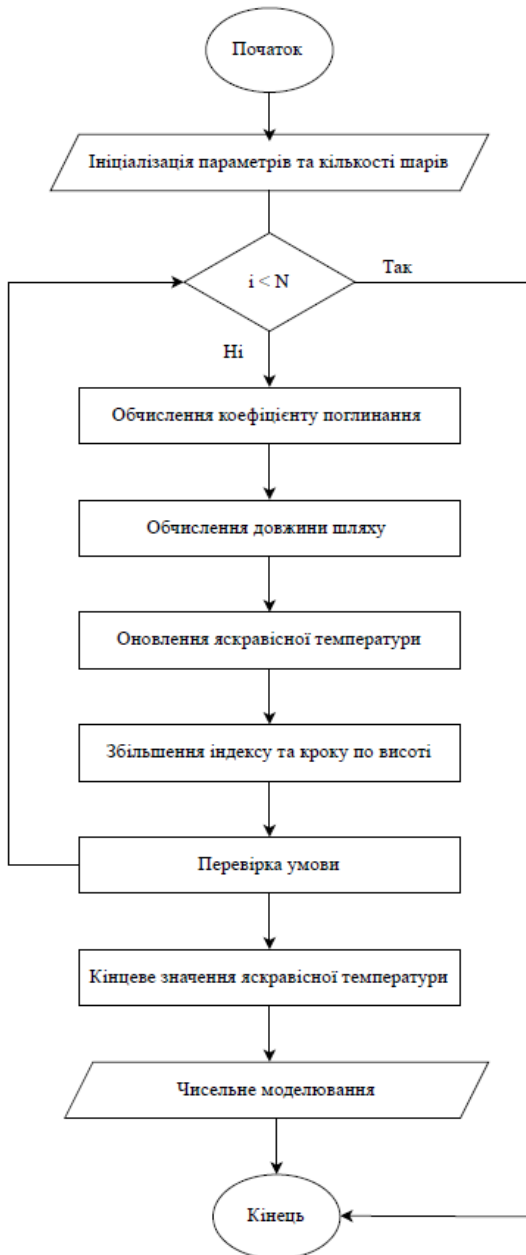
Рекурсивний алгоритм реалізовано через окрему рекурсивну функцію, яка викликає сама себе для обробки наступного шару і показано на рис. 2 у вигляді блок-схеми. Ініціалізація параметрів виконується аналогічно ітеративному алгоритму, а далі рекурсивний алгоритм включає:

1. Перевірку базового випадку: якщо $i \geq N$, повертається поточне значення яскравісної температури.
2. Обчислення коефіцієнту поглинання та довжини шляху
3. Оновлення яскравісної температури.
4. Виклик рекурсивної функції з новими параметрами.

Цей метод відображає рекурентну природу рівняння переносу, де кожен шар залежить від попереднього.

Порівняння ітеративного та рекурсивного підходів показало, що ітеративний метод демонструє вищу швидкість (середній час виконання 781,7 мс), що приблизно на 6% швидше, ніж рекурсивний (830 мс) завдяки відсутності накладних витрат на виклики функцій. Також перший підхід використовує фіксований об'єм пам'яті, тоді як другий накопичує стекові кадри, що може призвести до переповнення при великій кількості шарів.

Проте, рекурсивний метод краще ілюструє рекурентну структуру базового рівняння переносу, що корисно для освітніх цілей, тоді як ітеративний простіший для модифікації та відлагодження. Ітеративний підхід легше адаптувати до паралельних обчислень, а рекурсивний вимагає переробки для інтеграції складних умов. Тому, рекурсивний підхід більше відповідає умовам демонстрації фізичних принципів обчислення яскравісної температури, а ітеративний краще підходить для масових обчислень, зокрема, обробки даних у реальному часі.

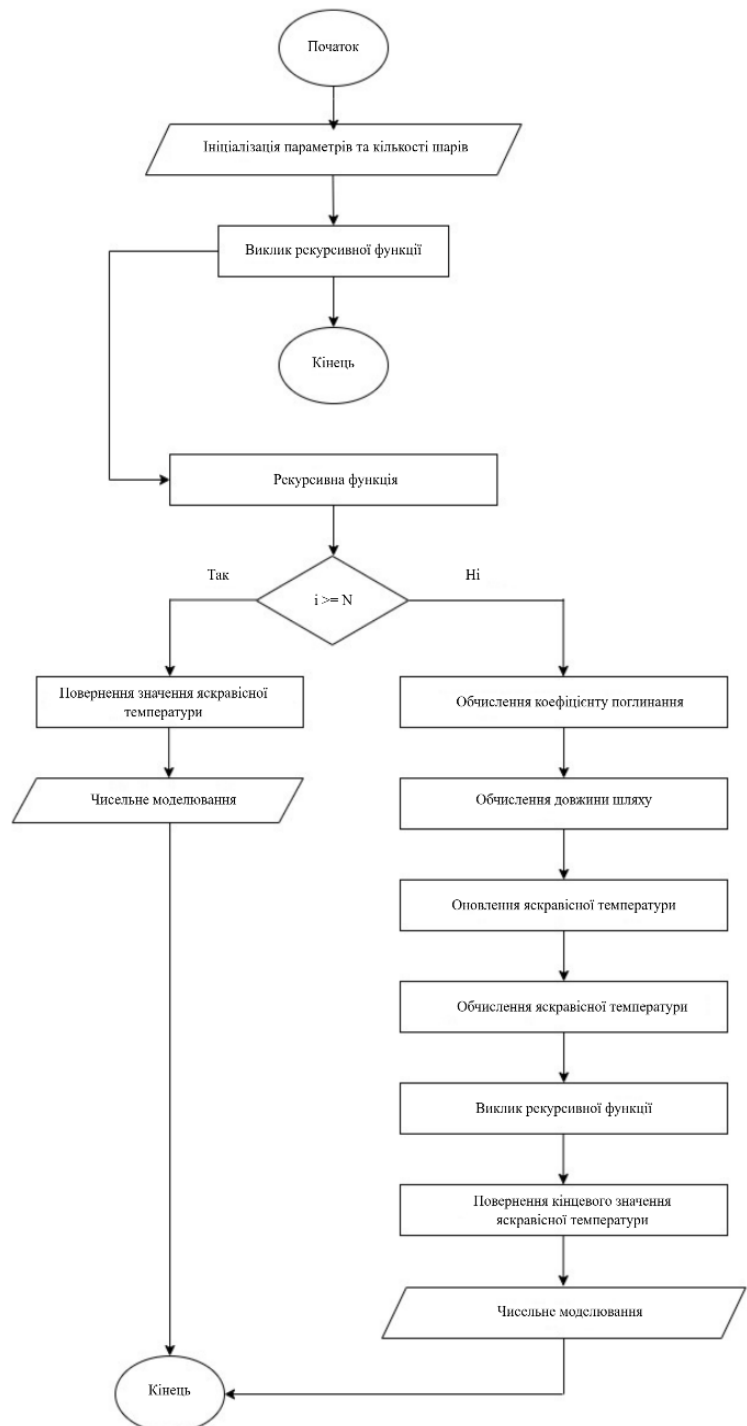
Рис. 1. Ітеративний алгоритм обчислення T_B

Обидва алгоритми коректно реалізують обчислення яскравісної температури відповідно до рекомендацій, демонструючи близькість результатів до еталонних даних. Вибір між ними залежить від цілей.

Чисельне моделювання

У цьому розділі представлено аналіз чисельного моделювання низхідної яскравісної температури у мікрохвильовому діапазоні, виконаних за допомогою розробленої імітаційної моделі в середовищі Maple.

На рис. 3 показано розподіл яскравісної температури залежно від кутів місця для різних частот.

Рис. 2. Рекурсивний алгоритм обчислення T_B

Графік на рис. 3 відображає залежність яскравісної температури від кутів місця у діапазоні від 5° до 90° для кількох частот у мікрохвильовому діапазоні, зокрема 11 ГГц, 20 ГГц, 67 ГГц і 90 ГГц. Модель базується на віщеазначених рекомендаціях і використовує дискретизацію атмосфери з кроком 0.5 км до висоти 100 км.

На графіку представлено кілька кривих, кожна з яких відповідає певній частоті, із чіткими позначками осей: горизонтальна вісь відображає кут місця (у градусах), а вертикальна — значення яскравісної температури (у кельвінах). Кожна крива, ймовірно, має різний колір або стиль лінії для

розрізнення частот, із відповідними легендами. Графік демонструє, що значення яскравісної температури, отримані моделлю, близькі до реальних даних, що підтверджує коректність реалізації. Маленькі відхилення можуть бути пов'язані з

відсутністю у моделі врахування розсіювання на гідрометеорах (дош, сніг), яке стає значним при частотах > 50 ГГц, або з використанням еталонних профілів атмосфери [14], які можуть не повністю відображати локальні умови.

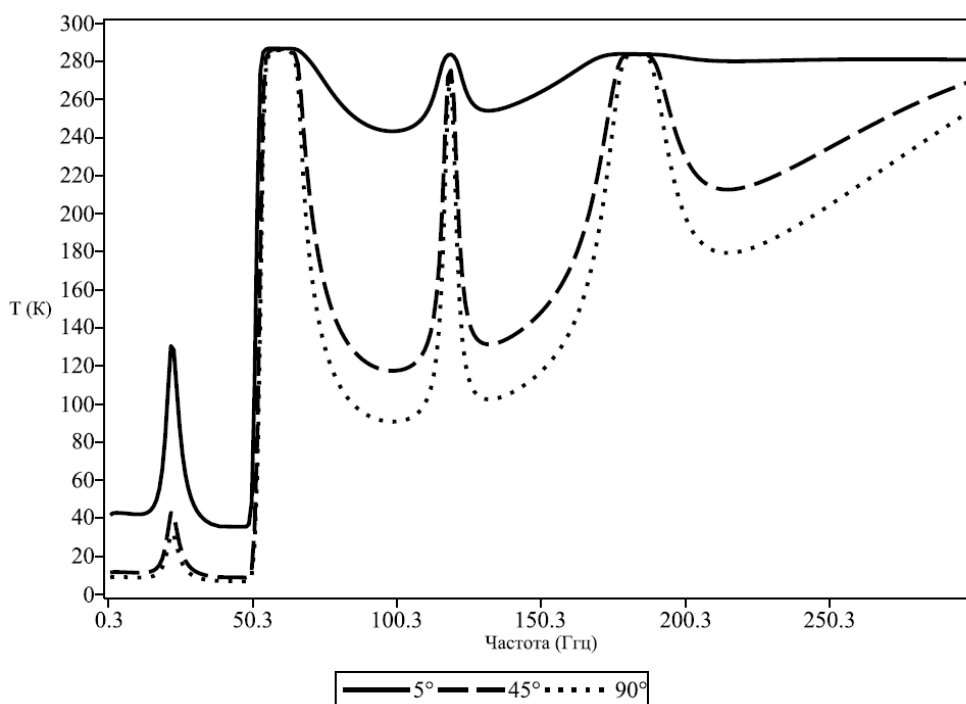


Рис. 3. Яскравісна температура низхідного мікрохвильового випромінювання

Графік на рис. 3 є наочним підтвердженням працездатності імітаційної моделі в Maple.

Зростання яскравісної температури зі зменшенням кута місця та підвищенням частоти узгоджується з фізичними принципами, а близькість до реальних значень свідчить про високу точність моделі в стандартних умовах. Для покращення можна додати модуль розсіювання та інтегрувати локальні атмосферні профілі.

Висновки

Дане дослідження представило детальну розробку та аналіз імітаційної моделі для обчислення низхідної яскравісної температури у мікрохвильовому діапазоні, реалізованої в середовищі Maple на основі рекомендацій. Модель, що базується на радіаційному трансферному рівнянні, продемонструвала високу точність і практичну цінність для наукових та освітніх цілей.

Розроблено та порівняно два алгоритмічні підходи: ітеративний і рекурсивний. Ітеративний метод виявився ефективнішим за швидкістю, що робить

його придатним для масових обчислень, тоді як рекурсивний підхід вирізняється наочністю і краще відображає рекурентну природу трансферного рівняння, що є цінним для навчальних цілей. Обидва методи показали близькість результатів до еталонних даних, підтверджуючи коректність реалізації. Близькість графіків до реальних значень підкреслює надійність моделі, хоча невеликі відхилення вказують на необхідність урахування розсіювання та локальних атмосферних профілів.

Модель має значний потенціал для застосування в метеорології, телекомунікаціях (особливо для 5G/6G) та дистанційному зондуванні Землі, а також як освітній інструмент для демонстрації фізичних і алгоритмічних аспектів рекурентних рівнянь. Перспективи подальшого розвитку включають інтеграцію модулів розсіювання, використання даних реального часу та оптимізацію рекурсивного методу (наприклад, хвостовою рекурсією). Дослідження закладає міцну основу для майбутніх удосконалень і практичного використання в сучасних наукових та інженерних задачах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bruna Barbosa Silveira, Emma Catherine Turner, and Jérôme Vidot, Global evaluation of fast radiative transfer model coefficients for early meteorological satellite sensors, EGU24, vol. 17, issue 4, 2024, 1279-1296, <https://doi.org/10.5194/amt-17-1279-2024>
2. Yongbo Zhou, Tianrui Cao, and Lijian Zhu, Optimizing cloud optical parameterizations in Radiative Transfer for TOVS (RTTOV v12.3) for data assimilation of satellite visible reflectance data: an assessment using observed and synthetic images, EGU25, vol. 18, issue 14, 2024, 3267-3285, <https://doi.org/10.5194/amt-18-3267-2025>

3. Vargas Jiménez, F. and De los Reyes, J. C., Automatic Optical Depth Parametrization in Radiative Transfer Model RTTOV v13 via LASSO-Induced Sparsity for Satellite Data Assimilation, EGU sphere [preprint], 2025. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-950>
4. Buehler, S. A., R. Larsson, O. Lemke, S. Pfrendschuh, M. Brath, I. Adams, S. Fox, F. E. Roemer, P. Czarnecki, and P. Eriksson, The Atmospheric Radiative Transfer Simulator ARTS, Version 2.6 — Deep Python Integration, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, 2025, 341, 109443, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2025.109443>.
5. Buehler, S. A., J. Mendrok, P. Eriksson, A. Perrin, R. Larsson, and O. Lemke, ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator — version 2.2, the planetary toolbox edition, Geosci. Model Dev., 2018, 11(4), 1537–1556, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1537-2018>.
6. Shixiong Wang, Wei Dai, Geoffrey Ye Li, Distributionally Robust Receive Combining, Electrical Engineering and Systems Science, 2025, 1-16, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.12345>
7. ITU, “Attenuation by atmospheric gases,” Recommendation ITU-R P.676-13, Aug. 2022. www.itu.int. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.676-13-202208-I/en>. (accessed Jul. 3, 2025).
8. N. Charaf, J. Haase, A. Kulisch, C. Von Elm and D. Göhringer, "RTASS: a RunTime Adaptable and Scalable System for Network-on-Chip-Based Architectures," 2023 26th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), Golem, Albania, 2023, pp. 585-592, <https://doi.org/10.1109/DSD60849.2023.00086>.
9. Nandy A, Phinn S, Grinham A, Albert S. Developing a Semi-Automated Near-Coastal, Water Quality-Retrieval Process from Global Multi-Spectral Data: South-Eastern Australia. Remote Sensing. 2024; 16(13):2389. <https://doi.org/10.3390/rs16132389>
10. S. Yan, X. Shi, X. Liu, Q. Chen and L. Lin, "Mechanism Analysis of Instability in Grid-Connected PV Systems With Volt-Var Control," 2024 IEEE 10th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2024-ECCE Asia), Chengdu, China, 2024, pp. 2824-2828, <https://doi.org/10.1109/IPEMC-ECCEAsia60879.2024.10567812>.
11. F. Li, L. Pang and T. Dai, "CPG Motion Controller Based on Van der Pol Nonlinear Oscillator for a Quadraped Robot," 2023 5th International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence (RICAI), Hangzhou, China, 2023, pp. 236-239, <https://doi.org/10.1109/RICAI60863.2023.10489012>.
12. E Silva, J.D.S.; Ribeiro, J.A.P.; Adanvo, V.F.; Mafra, S.B.; Mendes, L.L.; Li, Y.; de Souza, R.A.A. A Survey on the Impact of Intelligent Surfaces in the Terahertz Communication Channel Models. Sensors **2024**, *24*, 33. <https://doi.org/10.3390/s24010033>
13. ITU, “Sky-wave field-strength prediction method for the broadcasting service in the frequency range 150 to 1600 kHz,” Recommendation ITU-R P.435, Jan. 2017. www.itu.int. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.435/en>. (accessed Jul. 30, 2025).
14. ITU, “Reference atmospheres,” Recommendation ITU-R P.835, Feb. 2025. www.itu.int. <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.835/en>. (accessed Jul. 30, 2025).

Received (Надійшла) 21.08.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.10.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Жила Ольга Володимирівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Olha Zhyla – candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;

e-mail: olha.kuryzheva@nure.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-6888-8953>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56784340900>.

Кошарський Володимир Віталійович – доктор філософії, доцент кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", Харків, Україна;

Volodymyr Kosharskyi – PhD in Telecommunications and Radioengineering, Associate Professor at the Aerospace Radio-Electronic Systems Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

e-mail: v.kosharsky@khai.edu; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-8569-2047>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57218710916>.

Development and analysis of a numerical model for calculating the brightness temperature of the atmosphere in the Maple environment based on ITU-R recommendations

Olha Zhyla, Volodymyr Kosharskyi

Abstract. The article is devoted to the development and analysis of a simulation model for calculating the downward luminous temperature, implemented in the Maple environment based on ITU-R recommendations. The purpose of the article is to create a methodology and simulation model for numerical modelling of luminance temperature, as well as to evaluate the effectiveness of iterative and recursive methods, taking into account their performance and practical application. The research tasks include the development of algorithms for calculating luminance temperature, the implementation of the model in Maple, the analysis of the dependence of luminance temperature on elevation angles and frequencies, the comparison of iterative and recursive approaches in terms of key parameters, and the evaluation of the model's accuracy relative to reference data. The results demonstrate the correctness of the model, confirmed by the proximity of the calculated luminous temperature values to the actual data. The iterative method proved to be faster, while the recursive approach better illustrates the physical model. Numerical modelling reflects the dependence of brightness temperature on elevation angles, which is consistent with physical principles. Field of application: covers meteorology (analysis of atmospheric radiation), telecommunications (assessment of 5G/6G signal attenuation), remote sensing of the Earth, and education (demonstration of RTE and algorithms). Prospects include the integration of scattering and real-time data.

Keywords: brightness temperature, simulation model, radiometry, microwave radiation.