

DOI: 10.20535/1970.71(1).2026.361585

УДК 535.5:681.7.068:62-52

**АДАПТИВНА СИСТЕМА ФОРМУВАННЯ ЕТАЛОННИХ СТАНІВ
ЧАСТКОВОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ З КОНТУРОМ ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ**¹⁾Анісімов Д. Д., ^{1,2)}Синявський І. І.¹⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²⁾Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, УкраїнаE-mail: denysanisimov03@gmail.com, syniavskiy@gmail.com

У представленій статті аналізуються сучасні підходи до створення еталонних станів частково поляризованого випромінювання. Ця задача є фундаментальною для метрологічного супроводу космічних місії дистанційного зондування Землі, де від точності калібрування бортових приладів залежить якість обробки даних про земну атмосферу. Розглядаючи ключові дестабілізуючі фактори – термооптичний дрейф та нелінійне падіння потужності пучка, – обґрунтовано перехід від звичайних розімкнених систем до адаптивних комплексів із МІМО-архітектурою. У роботі детально описано структуру такої системи, що поєднує в собі прецизійну оптико-механічну частину на основі плоских пластин та цифрові алгоритми зворотного зв'язку для незалежної стабілізації інтенсивності випромінювання та ступеня його поляризації (DOLP). Застосування ітераційного алгоритму ПІ-регулювання дозволило ефективно розділити керування геометричними та енергетичними параметрами, що є принципово неможливим у межах класичних одноконтурних методів. Завдяки диференціальному аналізу похибок розроблена система демонструє високу енергетичну стабільність вихідного сигналу. Це дозволяє приладу самостійно підлаштовуватися під зміни зовнішнього середовища чи внутрішні апаратні зсуви, зберігаючи задану точність без втручання оператора. Особлива увага приділена фізичній природі виникнення похибок, зокрема через нелінійність коефіцієнтів Френеля при зміні кутів нахилу пластин. На основі проведеного моделювання підтверджено переваги адаптивного підходу: якщо у відкритому контурі втрати інтенсивності сягають 15,2 %, то впровадження зворотного зв'язку дозволяє утримувати сигнал на рівні 100 % із похибкою не більше 0,5 %. Також доведено, що запропонований алгоритм надійно фіксує параметр DOLP у межах вузького допуску 0,1 %, успішно нівелюючи температурний дрейф, який за годину роботи може перевищувати 1,0 %. Отримані результати можуть бути використані як основа для проектування для автономних калібрувальних станцій нового покоління, що відповідають жорстким стандартам космічних програм, таких як Aerosol-UA, ЗМІ чи SPEXone.

Ключові слова: ступінь лінійної поляризації (DOLP), адаптивна система керування, архітектура МІМО, ПІ-регулятор, зворотний зв'язок, термооптичний дрейф, рівняння Френеля, ітераційний алгоритм, космічний проєкт Aerosol-UA, калібрування поляриметрів, інтегруюча сфера, дистанційне зондування Землі.

Вступ

Поляриметричні вимірювання становлять одну з найбільш фундаментальних та швидкозростаючих галузей сучасного оптичного дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з орбіти. Інформація про поляризаційний стан відбитого електромагнітного випромінювання надає унікальну можливість вирішувати широке коло критично важливих завдань екологічного та кліматичного профілю: від визначення мікрофізичних властивостей атмосферного аерозольного шару до оцінювання стану водної поверхні та моніторингу хмарності та аерозолів [1].

Сучасні та перспективні супутникові місії оснащуються прецизійними багатосмуговими поляриметрами, здатними реєструвати ступінь лінійної поляризації (Degree of Linear Polarization, DOLP) із безпрецедентною точністю. Для забезпечення достовірності кліматичного моделювання

інструментальна похибка таких космічних приладів має становити не гірше ніж 0.1–0.5 % [1, 2].

Для підтвердження заявленої точності протягом усього терміну експлуатації апарату необхідна ретельна, багаторівнева та тривала калібрувальна процедура ще на етапі наземних лабораторних випробувань. Традиційні лабораторні методи калібрування оптичних приймачів здатні з високою достовірністю генерувати переважно «крайні» стани: або ідеально поляризоване світло (за допомогою дихроїчних поляризаторів), або повністю неполяризоване випромінювання (за допомогою інтегруючих сфер) [3]. Однак природні ландшафти Землі відбивають світло з порівняно низьким рівнем поляризації, де значення DOLP варіюються переважно у вузьких межах від 0 % до 40 %.

Відповідно, на сьогодні існує практична необхідність у розробці спеціалізованих еталонних оптичних джерел, які мають можливість не лише

генерувати будь-які проміжні значення часткової поляризації, але й прецизійно їх регулювати та стабілізувати під час довготривалих лабораторних випробувань.

Постановка проблеми

Основна інженерна проблема, що стримує розвиток сучасних стендів генерування часткової поляризації, полягає у їхній високій чутливості до дестабілізуючих факторів середовища. Процес формування заданого ступеня поляризації можна описати рівняннями Френеля та матрицями Мюллера [4, 5]. Оптична система є вразливою до термооптичного дрейфу показника заломлення скла під дією нагрівання від джерела випромінювання.

Крім того, теоретичний аналіз енергетичного балансу виявив фундаментальну закономірність: збільшення кута нахилу пластин для генерації глибоких станів поляризації (до 50 градусів) об'єктивно супроводжується значним відбиттям s-компоненти, що неминуче призводить до падіння інтенсивності вихідного випромінювання до 85 % від номіналу [5].

Без впровадження активних алгоритмів зворотного зв'язку на базі математичного апарату П-регуляторів та сучасних архітектур адаптивного керування оптичними системами, ця фізична особливість спричиняє штучну кореляцію поляризаційної та енергетичної шкал каліброваного приладу. Таким чином, виникає необхідність у створенні прецизійних оптичних генераторів із замкненим контуром зворотного зв'язку для незалежної стабілізації параметрів пучка в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ефективність сучасних супутникових місій, спрямованих на моніторинг клімату та аерозольного складу атмосфери, критично залежить від точності калібрування бортових поляриметрів. Для таких інструментів, як ЗМІ або SPEXone, інструментальна похибка вимірювання ступеня лінійної поляризації не повинна перевищувати 0,1–0,5 %, що є надзвичайно складним метрологічним завданням для наземних стендів [6, 7].

Аналіз літературних джерел показав, що генерування еталонних станів часткової поляризації зазвичай виконується із застосуванням нахилених діелектричних пластин (закони Френеля), інтегруючих сфер, прецизійних крокових двигунів та фотометричного обладнання.

У статті [8] представлено систему POLBOX для високоточного калібрування поляризаційних сонячних радіометрів. В якості виконавчих механізмів автори застосували високоточні прецизійні приводи. Незважаючи на високу механічну дискретність позиціонування, суттєвим недоліком цієї системи є відсутність компенсації Френелівських втрат. Автори не враховують алгоритмічно та апаратно падіння загальної інтенсивності пучка при

великих кутах нахилу пластин. Це призводить до порушення незалежності поляризаційної та енергетичної шкал приладу під час калібрування.

Дослідники у роботах [9, 10] пропонують використання вдосконалених генераторів лінійної часткової поляризації для калібрування фокальних матричних поляриметрів. Автори успішно мінімізують вплив поперечного зміщення пучка на матрицю приймача за рахунок складних оптичних збірок. Проте недоліком цих рішень є відсутність апаратного зворотного зв'язку за оптичним сигналом у режимі реального часу. Корекція накопичених похибок механіки здійснюється лише програмно на етапі обробки отриманих знімків, а не шляхом фізичної стабілізації еталонного пучка.

У роботах [11, 12] приділено увагу використанню високо стабільних інтегруючих сфер для створення рівномірного неполяризованого фону, зокрема для калібрування спектрополяриметра SPEX. Авторами констатується проблема експоненційної деградації яскравості галогенних джерел з часом. Основним недоліком описаних комплексів є те, що компенсація яскравості сфери вимагає або ручного втручання оператора, або використання окремих ізольованих систем стабілізації струму, які жодним чином не синхронізовані з роботою механічного блоку та не реагують на внесені ним втрати.

Дослідження в галузі теорії автоматичного керування [13] та позиціонування крокових двигунів [14] демонструють високу ефективність замкнених систем. Проте сучасні комерційні поляризаційні контролери, незважаючи на високу повторюваність встановлення кута, мають головний недолік у контексті прецизійного калібрування – нездатність самостійно адаптуватися до змін оптичних властивостей середовища без залучення спеціалізованих контурів керування [15].

Отже, можна стверджувати, що переважна більшість існуючих систем генерації часткової поляризації побудована за принципом відкритого керування без динамічного контролю вихідних параметрів пучка. Це накладає суттєві обмеження на можливості їх використання для довготривалого автоматизованого калібрування надточних орбітальних поляриметрів, де сумарна похибка не повинна перевищувати 0,1 %.

У зв'язку з цим, актуальною є проблема розробки власного конкурентоспроможного автоматизованого технологічного комплексу на базі архітектури MIMO (Multi-Input Multi-Output), який здатен з високою точністю, швидкодією та в режимі реального часу одночасно стабілізувати як ступінь поляризації, так і інтенсивність випромінювання.

Метою статті є обґрунтування структури та аналіз факторів, що визначають точність і стабільність формування еталонних станів часткової поляризації світла, аналіз лабораторного стенда на базі

симетричної системи діелектричних пластин (ГАО НАН України) як об'єкта керування, а також розробка перспективної адаптивної системи автоматизації цього об'єкта для підвищення його метрологічної ефективності. Особливу увагу надано синтезу двоконтурної архітектури класу МІМО та розробці ітераційних алгоритмів ПІ-регулювання, здатних у режимі реального часу забезпечувати незалежну стабілізацію ступеня поляризації та інтенсивності випромінювання в умовах термооптичних дрейфів та нелінійних Френелівських втрат.

Об'єкт та методи досліджень

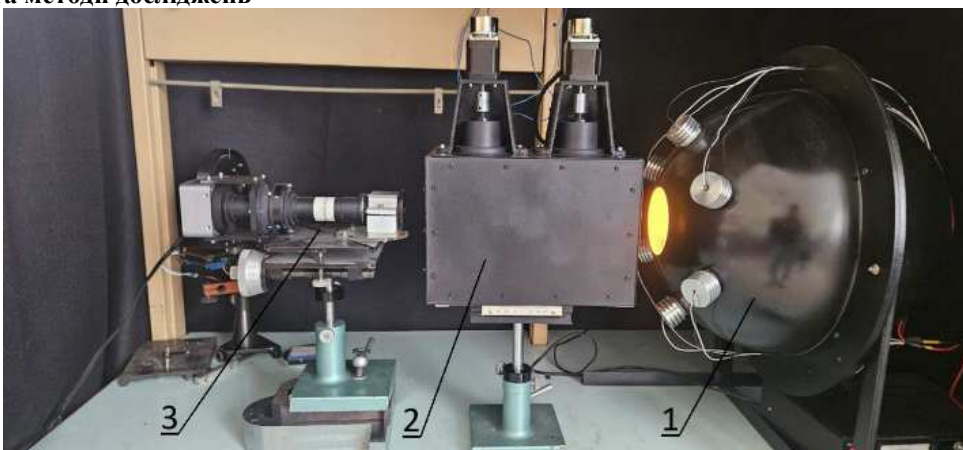


Рис. 1. Лабораторний макет генератора еталонних станів часткової поляризації (ГАО НАН України), де 1 – джерело неполяризованого випромінювання на базі інтегруючої сфери; 2 – блок формування оптичного пучка; 3 – Мультиспектральний зображуючий поляриметр [16]

Незважаючи на високу прецизійність оптичного тракту наявного стенду, його експлуатація у початковій конфігурації виявила низку технічних обмежень, пов'язаних із відсутністю замкненого контуру керування. Встановлення кутових положень пластин та регулювання яскравості джерела випромінювання (1) у базі здійснюється в режимі «відкритого циклу», що не дозволяє оперативно компенсувати динамічні похибки – термооптичний дрейф показника заломлення та ослаблення випромінювання за рахунок Френелівського відбиття.

У зв'язку з цим, метою даного етапу досліджень став синтез та чисельна верифікація адаптивної МІМО-системи, яка інтегрується в структуру наявного макета (рис. 1) для перетворення його на

Базою для проведення теоретичних та програмно-алгоритмічних розробок у даній роботі є лабораторний прототип генератора еталонних станів часткової поляризації, що розробляється у Головній астрономічній обсерваторії (ГАО) НАН України. Даний стенд призначений для метрологічного супроводу перспективних космічних місій (зокрема Aerosol-UA) [1, 16]. Його реалізація базується на принципі формування ступеня лінійної поляризації (DOLP) шляхом заломлення світла в симетричній системі діелектричних пластин (рис. 1).

інтелектуальний автоматизований комплекс. Представлені далі результати базуються на математичному моделюванні та ітераційній обробці сигналів зворотного зв'язку, де всі фізичні константи та геометричні параметри моделі суворо відповідають характеристикам реального стенду ГАО НАН України.

Фізичне обґрунтування оптичної схеми та аналітична модель генератора

Технічна реалізація блоку формування поляризованого випромінювання базується на використанні пари плоскопаралельних пластин, встановлених у симетричній конфігурації (рис. 2).

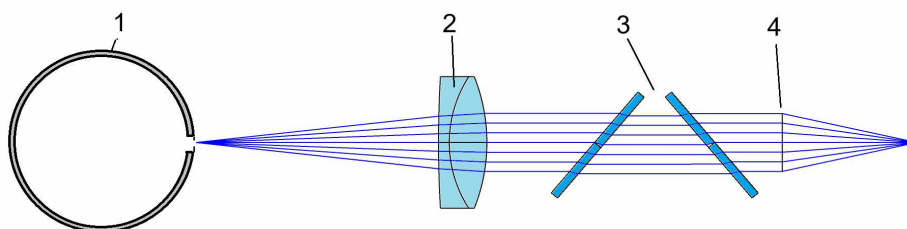


Рис. 2. Принцип побудови генератора поляризованого випромінювання, де 1 – джерело випромінювання деполіризованого світла; 2 – оптична система; 3 – плоскі пластини; 4 – поляризаційний прилад [18]

Така геометрія дозволяє реалізувати прецизійне керування станом поляризації заломленого світла, водночас мінімізуючи геометричні викривлення пучка. Аналіз математичної моделі та моделювання зміни ступеня поляризації цієї схеми наведено авторами у роботі [18].

Принцип роботи генератора полягає у наступному. Повністю деполаризоване випромінювання, що формується на виході інтегруючої сфери (1) колімується коліматором (2) та потрапляє на систему оптичних плоских пластин (3). У номінальному положенні, пластини розташовані перпендикулярно напрямку розповсюдження випромінювання (оптичній осі). При нахилі пластин, виникає асиметрія, змінюються кути падіння променів, внаслідок чого світло стає частково поляризованим, формується ступінь поляризації (Degree of Linear Polarization – DOLP). Значення DOLP залежить від нахилу пластин, залежності проаналізовані авторами в роботі [18]. Ключовою перевагою обраної архітектури є забезпечення повної просторової інваріантності вихідного сигналу. Будь-яке латеральне зміщення променя, що виникає при проходженні першої пластини, симетрично та повністю нівелюється при заломленні на другій пластині. Це дає змогу плавно змінювати DOLP у широкому діапазоні кутів нахилу θ без небажаного зміщення світлової плями по вхідній зіниці каліброваного приладу.

Значення DOLP на виході системи (3) можна визначити через сумарні коефіцієнти пропускання для ортогональних компонент (s- та p-поляризації) після проходження робочих поверхонь [5]:

$$DOLP = \frac{T_p - T_s}{T_p + T_s}, \quad (1)$$

де T_p , T_s – коефіцієнти пропускання для двох взаємно ортогональних складових, що мають залежність від кута падіння променів на пластини.

Згідно з цим виразом генерація глибоких станів поляризації неминуче супроводжується нелінійним падінням загальної інтенсивності випромінювання. Оскільки сучасні методи дистанційного зондування Землі потребують суворого розділення радіометричної та поляризаційної шкал, виникає необхідність інтеграції даної оптичної схеми в замкнену систему автоматичного регулювання.

Адаптивна система формування еталонних станів часткової поляризації

Для забезпечення метрологічного супроводу та високоточного калібрування поляриметричної апаратури розроблено автоматизований технологічний комплекс, здатний стабілізувати параметри вихідного пучка у режимі реального часу. Функціонування системи базується на принципах двоконтурного адаптивного керування класу МІМО (Multi-Input Multi-Output), що дозволяє незалежно регулювати ступінь лінійної поляризації та інтенсивність випромінювання.

Структурно-функціональна схема розробленої адаптивної системи представлена на рис. 3. Автоматизований комплекс працює наступним чином. Через блоки завдання параметрів 1 та 2 оператор встановлює цільові значення ступеня лінійної поляризації ($DOLP_{set}$ та відносної інтенсивності I), які надходять до мікроконтролерного блоку 3 («Генератор заданих значень»). У контролері формуються опорні сигнали, які порівнюються з фактичними даними в суматорах для обчислення похибок e_{DOLP} та e_I , що характеризують відхилення ступеня поляризації та інтенсивності випромінювання. На основі розрахованих похибок ітераційні ПІ-регулятори 4 та 5 формують керуючі впливи для відповідних виконавчих контурів. Контур стабілізації поляризації через драйвер 6 приводить у дію кроковий двигун 8, який забезпечує прецизійне позиціонування пластин у блоку формування поляризованого випромінювання 10. Незалежно від цього, контур компенсації енергетичних втрат через керований драйвер 7 регулює потужність джерела випромінювання інтегруючої сфери 9, нівелюючи нелінійні Френелівські втрати, що виникають при зміні кутів нахилу пластин. Сформований оптичний пучок проходить крізь проєкційну систему 11, яка забезпечує його спрямування на калібрований прилад 12 та еталонний поляриметр 13. Останній виконує функцію датчика зворотного зв'язку, миттєво фіксуючи фактичні параметри випромінювання та повертаючи їх на входи суматорів для замикання циклу керування. Використання такої архітектури дозволяє системі автоматично компенсувати термооптичні дрейфи елементів та утримувати еталонні стани з точністю не гірше ніж $\pm 0,1\%$.

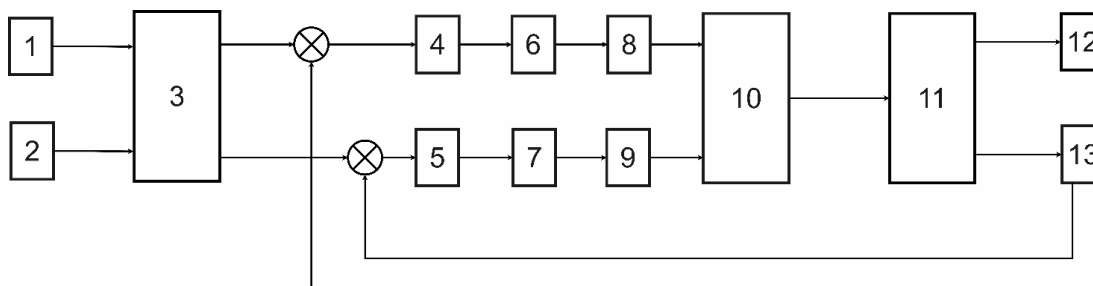


Рис. 3. Структурна схема двоконтурної адаптивної системи зі зворотним зв'язком

Алгоритмічне забезпечення та ітераційна логіка ПІ-регулювання

Для практичної реалізації автономного режиму формування еталонних станів було розроблено програмний алгоритм, що базується на принципах ітераційної корекції зі зворотним зв'язком. Логіка функціонування системи побудована за ієрархічним принципом, що дозволяє послідовно усувати похибки в обох каналах керування (рис. 4).

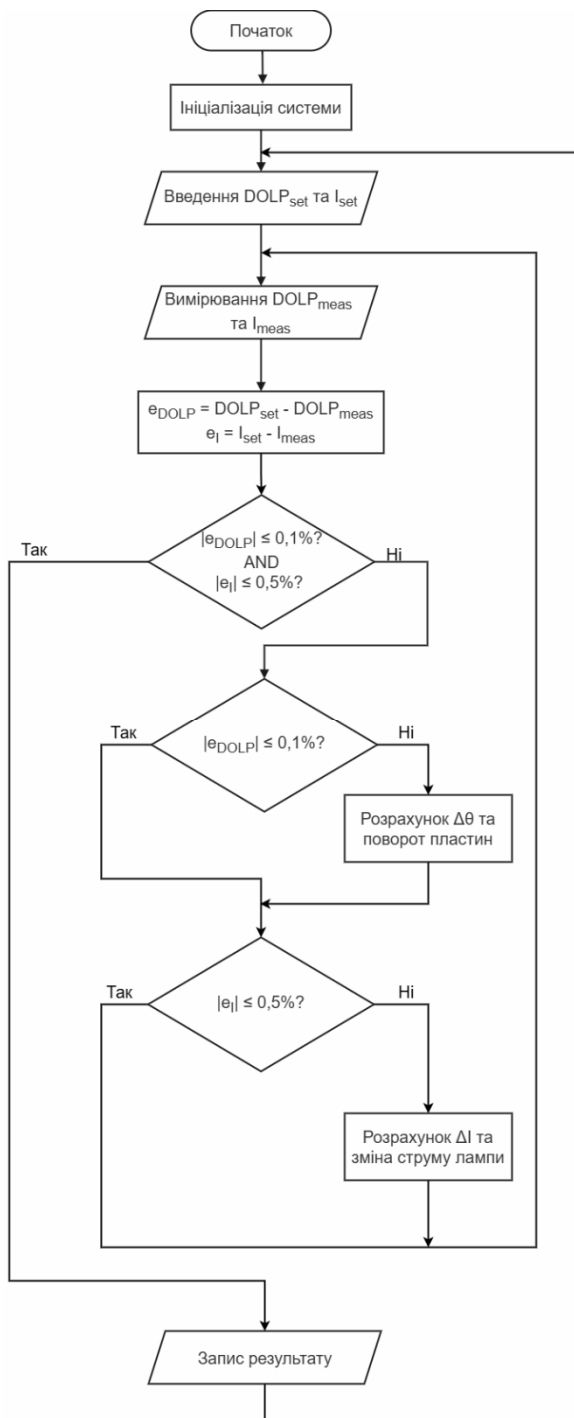


Рис. 4. Алгоритмічна блок-схема програмного ПІ-регулятора

Початковий етап передбачає ініціалізацію апаратних інтерфейсів мікроконтролера, завантаження у пам'ять коефіцієнтів регулювання та встановлення цільових значень ступеня лінійної поляризації ($DOLP_{set}$ і відносної інтенсивності I_{set}).

Система здійснює зчитування поточних значень $DOLP_{set}$ та I_{meas} з еталонного поляриметра. Для забезпечення коректної роботи контурів керування виконується обчислення похибок e_{DOLP} та $|e_I|$ як різниці між заданими та вимірними параметрами.

Згодом виконується ітераційна перевірка умов стабілізації. Алгоритм фільтрує результати на основі встановлених порогів точності $|e_{DOLP}| \leq 0,1\%$ та $|e_I| \leq 0,5\%$. При виході за межі допуску ступеня поляризації здійснюється розрахунок кута повороту пластин $\Delta\theta$ та генерується команда для драйвера крокового двигуна. Після цього контур компенсації інтенсивності незалежно аналізує енергетичне відхилення e_I та у разі потреби, розраховує збільшення струму ΔI для джерела випромінювання інтегруючої сфери.

Після внесення коректив у положення пластин або потужність джерела, алгоритм миттєво повертається до фази вимірювання для підтвердження стабілізації пучка. У разі повної відповідності похибок заданим допускам, система фіксує результати у пам'ять та переходить у режим безперервного моніторингу, очікуючи на введення нових цільових параметрів або оперативно компенсуючи можливий температурний дрейф у часі.

Результати досліджень

Для верифікації розробленого адаптивного алгоритму та оцінки його спроможності компенсувати нелінійні спотворення сигналу проведено моделювання процесу формування станів поляризації. Моделювання виконано в середовищі MATLAB із використанням математичної моделі, що базується на рівняннях Френеля та ітераційній реалізації ПІ-регулятора. Основним завданням цього етапу є перевірка енергетичної стабілізації вихідного пучка шляхом динамічного коригування потужності джерела у відповідь на зміну геометричних параметрів оптичного блоку.

Аналіз енергетичних характеристик системи базується на дослідженні взаємозв'язку між кутом нахилу пластин θ та вихідною відносною інтенсивністю випромінювання I (рис. 5). Графік відкритого контуру продемонстрував падіння інтенсивності при збільшенні кута нахилу, що свідчить про його критичний вплив на загальний енергетичний баланс. Така поведінка системи повністю відповідає теоретичним розрахункам Френелівського відбиття, де при кутах $\theta > 30^\circ$ втрати потужності стають суттєвими для прецизійних вимірювань.

Разом із тим, графік адаптивного контуру показав практично горизонтальну залежність у всьому

му робочому діапазоні, що підтверджує його ефективне усунення енергетичних втрат. Обрана стратегія дозволяє незалежно керувати поляризацією та інтенсивністю, забезпечуючи стабільність вихідного сигналу при будь-якому положенні пластин.

Аналіз графіку роботи системи показав, що при максимальних кутах нахилу зменшення інтенсивності у відкритому контурі досягає 15,2 %. При активації адаптивного каналу залишкове відхилення інтенсивності не перевищує 0,5 %.

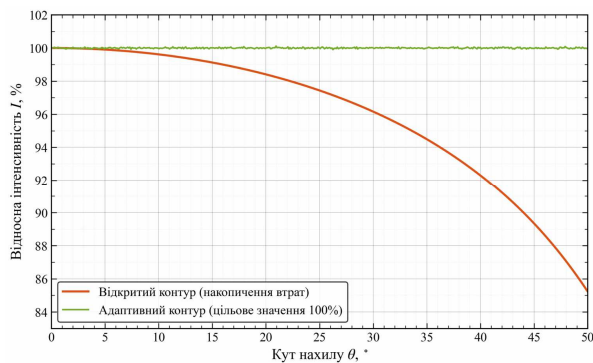


Рис. 5. Залежність відносної інтенсивності вихідного пучка від кута нахилу пластин оптичного блоку

На рис. 6 представлено результати дослідження часової стабільності ступеня лінійної поляризації DOLP при тривалій експлуатації системи. Основним завданням цього етапу було моделювання впливу температурного дрейфу компонентів на точність формування еталонного стану.

Графік відкритого контуру продемонстрував виражений експоненціальний дрейф параметра DOLP, що свідчить про високу чутливість оптичної системи до прогресуючого нагріву джерела та елементів оптичного блоку. Протягом 60 хвилин роботи відхилення від еталонного значення (20 %) склало близько 1 %, що значно перевищує встановлені метрологічні допуски. Така поведінка підтверджує непридатність неадаптивних систем для проведення довготривалих вимірювань без постійного перекалібрування.

Разом із тим, графік замкненого контуру показав практично горизонтальну залежність сигналу протягом усього часу спостереження. Це підтверджує ефективність впровадженої адаптивної корекції, яка дозволяє системі в режимі реального часу компенсувати апаратні дрейфи. Завдяки ітераційному підстроюванню кута нахилу пластин, значення DOLP утримується на еталонній позначці з високою точністю.

Аналіз часової стабільності показав, що при використанні адаптивного контуру середньоквадратичне відхилення ступеня поляризації не перевищує 0,1 %, тоді як у відкритому контурі похибка неконтрольовано зростає. Це підтверджує доцільність обраної стратегії керування для забезпечення довгострокової надійності еталонного джерела та

його інваріантності до внутрішніх температурних факторів.

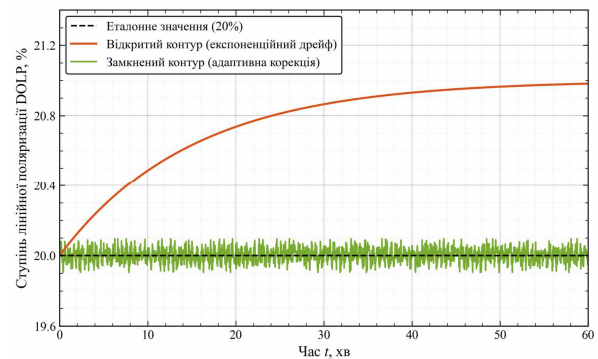


Рис. 6. Часова стабільність ступеня лінійної поляризації DOLP при тривалій роботі системи

Висновки

Проведені дослідження підтверджують, що застосування адаптивної МІМО-системи з ієрархічним керуванням дозволяє ефективно формувати еталонні стани поляризації навіть за умови значних енергетичних втрат. Розроблена модель забезпечила стабілізацію інтенсивності вихідного пучка на рівні 100 % із залишковим відхиленням у межах 0,5 %. Це дає суттєву перевагу над традиційними розімкненими схемами, де падіння потужності випромінювання сягало 15,2 %.

Стабільність системи досягнута завдяки паралельній обробці похибок у єдиному обчислювальному циклі. Такий підхід дав змогу розділити канали керування поляризацією та інтенсивністю, що технічно неможливо реалізувати класичними одноконтурними методами.

Оскільки поворот пластин нелінійно змінює обидва параметри одночасно, саме двоконтурна архітектура дозволила виокремити корисний сигнал і нейтралізувати супутні енергетичні втрати.

Результати проведеного моделювання свідчать, що застосування ітераційного алгоритму стабілізації дозволяє підвищити надійність генерації еталонних станів в умовах тривалого температурного дрейфу. Динамічне коригування струму джерела безпосередньо під час вимірювального циклу гарантує утримання параметра DOLP у межах допуску 0,1 % із середньоквадратичним відхиленням лише 0,05 %. Отримані результати підтверджують перспективність обраного методу для створення прецизійних джерел випромінювання, які можуть бути інтегровані в цифрову інфраструктуру метрологічного забезпечення космічної апаратури.

Література

- [1] O. Dubovik *et al.*, "Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 224, pp. 474–511, 2019. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.11.024

- [2] G. Milinevsky *et al.*, "Calibration model of polarimeters on board the Aerosol-UA space mission," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 229, pp. 92–105, 2019.
DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.03.007
- [3] I. Syniavskiy, Y. Oberemok, Y. Ivanov, and M. Sosonkin, "Multispectral polarization state analyzer of scanning polarimeter ScanPol," *Int. J. Opt.*, vol. 2020, Art. no. 1695658, 2020.
DOI: 10.1155/2020/1695658
- [4] R. M. A. Azzam, "Stokes-vector and Mueller-matrix polarimetry," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 33, no. 7, pp. 1396–1408, 2016.
DOI: 10.1364/JOSAA.33.001396
- [5] D. H. Goldstein, *Polarized Light*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2011.
DOI: 10.1201/b10436
- [6] B. Fougnie *et al.*, "The 3MI mission on-board EPS-SG: a multi-spectral multi-polarization multi-directional imager," *Proc. SPIE*, vol. 10764, 107640L, 2018. DOI: 10.1117/12.2320254
- [7] O. P. Hasekamp *et al.*, "Aerosol Measurements by SPEXone on the NASA PACE Mission: Expected Retrieval Capabilities," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 227, pp. 170–184, 2019.
DOI: 10.1016/j.jqsrt.2019.02.006
- [8] Z. Li *et al.*, "Calibration of the degree of linear polarization measurements of the polarized Sun-sky radiometer based on the POLBOX system," *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 5, pp. 1011–1018, 2018.
DOI: 10.1364/AO.57.001011
- [9] L. Wu *et al.*, "Aerosol retrieval from multiangle, multispectral photopolarimetric measurements: Importance of spectral range and angular resolution," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 8, pp. 2625–2638, 2015. DOI: 10.5194/amt-8-2625-2015
- [10] H. Zhang, Y. Wang, J. Tian, and Q. Zhao, "Calibration Method for Division-of-Focal-Plane Polarimeters Using Nonuniform Light," *IEEE Photonics Journal*, vol. 13, no. 1, Art. no. 6800109, 2021.
DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3048007
- [11] J. M. Smit *et al.*, "Polarimetric calibration of a spectro-polarimeter for remote sensing and characterization of aerosols," *Proc. SPIE*, vol. 11852, 1185232, 2021. DOI: 10.1117/12.2599475
- [12] J. H. Rietjens, O. P. Hasekamp, J. Landgraf, and B. van Harten, "SPEX airborne spectropolarimeter calibration and performance," *Applied Optics*, vol. 58, no. 21, pp. 5695–5719, 2019.
DOI: 10.1364/AO.58.005695
- [13] A. Borase *et al.*, "A review of PID control, tuning methods and applications," *Int. J. Dyn. Control*, vol. 9, no. 2, pp. 818–827, 2021.
DOI: 10.1007/s40435-020-00665-4
- [14] D. Shin, W. Kim, and C. C. Chung, "Position control of a permanent magnet stepper motor by MISO backstepping in semi-strict feedback form," in *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2011, pp. 808–813. DOI: 10.1109/AIM.2011.6027141
- [15] M. Ma, H. Shoman, S. Shekhar, N. A. F. Jaeger, and L. Chrostowski, "Automated Adaptation and Stabilization of a Tunable WDM Polarization-Independent Receiver on Active Silicon Photonic Platform," *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 4, Art. no. 6802110, 2020.
DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3012097
- [16] I. Syniavskiy *et al.*, "Aerosol-UA satellite mission for the polarimetric study of aerosols in the atmosphere," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, vol. 267, 107601, 2021.
DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107601
- [17] I. I. Syniavskiy, Y. S. Ivanov, M. H. Sosonkin, G. P. Milinevsky, and H. V. Koshman, "Multispectral imager-polarimeter of the Aerosol-UA space project," *Space Sci. Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 23–32, 2018. DOI: 10.15407/knit2018.03.023
- [18] Д. Д. Анісімов, І. І. Синявський, та Є. А. Оберемок, "Генератор частково поляризованого оптичного випромінювання для тестування та калібрування поляриметрів," в *Приладобудування: стан і перспективи: матеріали наук.-техн. конф.*, Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.

UDC 535.5:681.7.068:62-52

¹⁾**D. D. Anisimov**, ^{1, 2)}**I. I. Syniavskiy**¹⁾*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*²⁾*Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine***ADAPTIVE SYSTEM FOR GENERATING REFERENCE STATES OF PARTIALLY POLARIZED RADIATION WITH A FEEDBACK LOOP**

The presented article provides a comprehensive analysis of contemporary approaches to generating reference states of partially polarized radiation. This task is fundamental for the metrological support of satellite remote sensing missions, where the quality of atmospheric data processing directly depends on the calibration accuracy of on-board instruments. By examining key destabilizing factors, such as thermo-optical drift and nonlinear beam power attenuation, the study substantiates the transition from conventional open-loop systems to advanced adaptive complexes based on MIMO

(Multi-Input Multi-Output) architecture. The paper provides a detailed description of the structure of such a system, which integrates a high-precision opto-mechanical section based on inclined dielectric plates and digital feedback algorithms for the independent stabilization of both radiation intensity and the degree of linear polarization (DOLP). The application of an iterative PI-control algorithm has enabled effective decoupling of the geometric and energy control channels a task that is fundamentally impossible within the framework of classical single-loop control methods. Due to the differential analysis of errors, the developed system demonstrates high stability of the output signal intensity. This allows the instrument to independently adapt to environmental changes or internal hardware shifts, maintaining the specified precision without operator intervention. Particular attention is paid to the physical origin of the errors, specifically through the nonlinearity of Fresnel coefficients during changes in the tilt angles of the plates. Based on the results of performed simulations, the advantages of the adaptive approach are confirmed: while intensity losses in an open-loop configuration reach 15.2%, the implementation of closed-loop feedback allows maintaining the signal at 100% with an error of no more than 0.5%. Furthermore, it is proved that the proposed algorithm reliably fixes the DOLP parameter within a narrow tolerance of 0.1%, successfully neutralizing temperature drifts that can exceed 1.0% per hour of operation. The results obtained lay the scientific foundation for designing a new generation of autonomous calibration stations that meet the rigorous standards of space programs such as Aerosol-UA, 3MI, or SPEXone.

Keywords: degree of linear polarization (DOLP), adaptive control system, MIMO architecture, PI-controller, feedback loop, thermo-optical drift, Fresnel equations, iterative algorithm, Aerosol-UA mission, calibration of polarimeters, integrating sphere, Earth remote sensing.

*Надійшла до редакції
09 квітня 2026 року*

*Рецензовано
28 квітня 2026 року*



© 2026 Copyright for this paper by its authors.
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).