

Задача створення української нормативної бази з газовимірювань, якості газу і метрології робить актуальним подальше розширення описаного словника і створення на його основі словника-довідника, який би поєднував функції тлумачення з функціями перекладу термінів.

1. Гордієнко І.А., Пономарьов Ю.В., Єксаров С.В. Комп'ютерні технології у витратометрії і метрології засобів вимірювання потоку газу // *Нафтова і газова промисловість*. 1997. № 4. С.46-47. 2. Рицар Б., Семенистий К., Кочан І. Російсько-український та українсько-російський словник з радіоелектроніки / За ред. Б.Рицара. Львів, 1995. 3. Новий російсько-український словник-довідник: Близько 65 тис. слів / С.Я.Єрмоленко,

В.І.Єрмоленко, К.В.Ленець, Л.О.Пустовіт. К., 1996. 4. Російсько-український словник наукової термінології. Біологія. Хімія. Медицина / С.П.Вассер, І.О.Дудка, В.І.Єрмоленко та ін. К., 1996. 5. Російсько-український хімічний словник. 6000 термінів / Уклад. Є.Ф.Некряч, Ю.П.Назаренко, В.П.Чернецький. Видання друге. Харків., 1990. 6. Російсько-український словник фізичних термінів / Уклад. Ю.В.Караван, Є.С.Клос, О.Б.Лискович та ін.; За ред. О.Б.Лисковича. К., 1994. 7. Гінзбург М.Д., Корніловська І.М., Фролов Р.М. та ін. Електронний тлумачний словник з автоматизації, телемеханізації та використання обчислювальної техніки // *Нафтова і газова промисловість*. 1997. № 3. С.43-46.

УДК 621.397.13

## КОНТРОЛЬ СВІТЛОВИХ ПОЛІВ ПРИЛАДАМИ З ЕЛЕКТРОННОЮ РОЗГОРТКОЮ ЗОБРАЖЕННЯ

© Порєв В.А., 1998

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

*Подано огляд засадних принципів та перспектив використання приладів з електронною розгорткою зображення для контролю світлових полів, утворених як власним, так і невластним випромінюванням.*

Світлове поле можна визначити як область простору з певним розподілом потоку випромінювання, що відбиває структуру та властивості об'єктів цієї області. Під об'єктом розуміємо матеріальне тіло будь-якої форми, розміру та орієнтації в просторі. Об'єкт може випромінювати, а також відбивати і пропускати потік, утворюючи відповідно власне або невластне випромінювання чи їх суміш. У загальному випадку випромінювання елементарного об'єму характеризується просторовими координатами  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , координатами часу  $t$  та довжини хвилі  $\lambda$ , фазою та трьома кутами, що визначають площину поляризації. У випадку, коли некогерентне і неполяризоване випромінювання реєструється плоским приймачем, кількість просторових змінних зменшується до двох, а загальна сукупність характеризуючих потік аргументів — до чотирьох:  $x$ ,  $y$ ,  $t$ ,  $\lambda$ .

Основною кількісною характеристикою світлового поля, утвореного потоком з поверхні елементарного об'єму в тілесний кут, який спирається на вхідну апертуру приладу, може бути функція яскравості  $L(x, y, t, \lambda)$ . Якщо характер світлового поля, яке досліджуватиметься, дає змогу зробити припущення про незмінність за час формування сигналу, то його можна характеризувати тривимірною функцією яскравості  $L(x, y, \lambda)$  або спектральною яскравістю  $L_\lambda(x, y)$ .

Функція  $L_\lambda(x, y)$ , а отже і світлове поле, можуть бути як детермінованими, так і випадковими. Детерміноване світлове поле визначається просторовим спектром, а випадкове — енергетичним спектром [1].

Визначаючи прилади контролю світлових полів з електронною розгорткою зображення (ПКЕР), скористаємося визначенням Я.А.Рифтіна для телевізійної системи, як сукупності оптичних, електронних та радіотехнічних пристроїв, призначених для формування та передачі зображення [2], додавши обчислювальний засіб та доповнивши мету функціонування задачею аналізу зображень з розширенням спектрального діапазону до далекої інфрачервоної області.

При розширенні спектрального діапазону попадають в один клас і їх можна розглядати з позиції спільної методології найбільш важливі з погляду використання в засобах контролю типи світлоелектричних перетворювачів — прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), а також передавальні телевізійні трубки (ПТТ), зокрема, відікони та піровідікони. Останні, хоча і різняться між собою механізмом перетворення світлового потоку в електричний заряд, мають ідентичну конструкцію, зчитування заряду у відіконах і піровідіконах

відбувається сфокусованим електронним пучком за одним і тим же законом розгортки, а повний відеосигнал утворюється за однаковою схемою. Отже, піривідікон є своєрідною ланкою зв'язку між телевізійними системами і традиційними системами теплобачення, які з успіхом використовують у задачах неруйнівного контролю.

Додамо до цього також, що до аналізу процесу формування сигналу у вказаних випадках застосований математичний апарат теорії лінійних систем.

Фізично робота ПКЕР базується на послідовності перетворень вхідного сигналу, кінцевою ланкою якої є яскравість екрана приймального пристрою або цифровий сигнал, пропорційний амплітуді вхідного сигналу. У першому випадку ПКЕР називається відтворюючим (діагностичним), у другому – аналізуючим (вимірювальним).

Перетворення освітленості зображення в первинні відеосигнали проводиться малими ділянками чутливої площини – елементами розкладу. У сучасній науково-технічній літературі використовують також термін “піксел” (англ. скор. picture element).

Розміри піксела визначаються типом світлоелектричного перетворювача (СЕП) і коливаються в межах від одиниць мкм до десятків мкм. Отже, фактично СЕП — це упорядкована матриця, складена з великої кількості мікро-приймачів. Ця обставина разом з малим (десятки мілісекунд) часом формування сигналу від усієї матриці є принциповою особливістю ПКЕР, яка відкриває перед ним широкі перспективи впровадження в наукові дослідження та технологічну практику.

Завдяки унікальній властивості ПКЕР, яка полягає в можливості забезпечити контроль будь-якого світлового поля за довільною траєкторією з великим просторовим розрізненням у реальному масштабі часу, ПКЕР ще в 80-х роках зайняли чільне місце серед аналогічних засобів контролю.

Найрізноманітніші практичні задачі розглядали і продовжують розглядати з погляду можливості та доцільності застосування телевізійних методів та засобів, сформовані цілі напрямки в розвитку ПКЕР.

Одним із таких напрямків є контроль мікро-зображень (часто застосовують термін телевізійна мікроскопія або відеомікроскопія, але на наш погляд, жодну з цих назв не можна вважати вдалою, бо кожна поєднує два слова, які є відповідниками в двох різних мовах — video (лат.), skopeo (грецьк.) — дивитися). Застосування телевізійної техніки в

мікроскопії за влучним висловом Іноуе “привело до справжньої революції в аналітичних можливостях світлового мікроскопа” [3]. Вражаючими були перші експериментальні результати, отримані Allen — за допомогою відеомікроскопа спостерігали об'єкти розміром 0,02 мкм. Mizushima [4] дав теоретичне обґрунтування цим результатам, вказавши для теоретичної межі розрізнення 0,0035 мкм. Зауважимо, що це вже робочий діапазон електронного мікроскопа. Але при застосуванні відеомікроскопа можливе дослідження живих об'єктів. Mizushima також показав, що для біологічних об'єктів молекулярного рівня, коли різницею в поглинанні можна знехтувати, контраст утворюється різницею показників заломлення мікрочастинок і середовища, причому основні складові сигналу формуються за рахунок розсіяного світла.

Надзвичайно перспективним напрямком розвитку розглянутих засобів контролю є їх застосування для аналізу температурних мікро- і макрополів [5]. Особливого значення ПКЕР набувають в електронно-променевих технологіях зонного очищення [6], де зараз у більшості випадків використовують непрямі методи контролю (наприклад, за значенням струму тощо). Але відомо, що, навіть, при постійному значенні струму можливі флуктуації структури електронного пучка, що впливає на розподіл температури по зоні очищення, її розміри і форму, а в остаточному підсумку і на розподіл домішок, тобто на якість продукції. Проблема ефективного контролю параметрів зонного очищення і передусім постійного контролю температурного поля зони очищення на сьогодні є дуже актуальною.

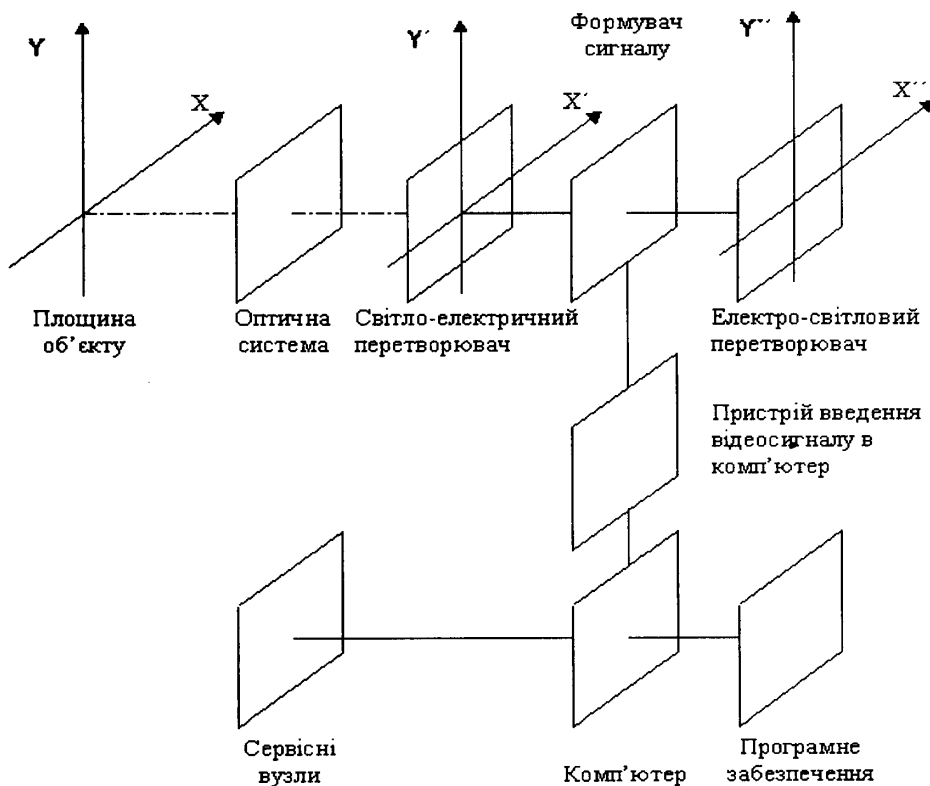
Великий спектр задач екологічного моніторингу можна розв'язати саме з використанням ПКЕР [7]. Поверхня Землі є досить потужним джерелом власного (в діапазоні 8...12 мкм) та відбитого (в діапазоні 0,4...1,1 мкм) випромінювань, що створює умови для ефективного застосування ПКЕР у складі апаратури дистанційного зондування. У [8], зокрема, визначається, що ПКЕР ефективно використовують при розв'язанні таких задач екологічного моніторингу, як контроль забрудненості атмосфери, стану водної поверхні та суходолу. Об'єктами досліджень можуть бути кількість і склад опадів, стан рослинного покриву, ґрунтів, берегова лінія та рух мілини, колір води та наявність поверхневих забруднень тощо.

Структурна схема ПКЕР зображена на рисунку.

Оптична система формує зображення об'єкта в чутливій площині СЕП, де за допомогою розгортки (електронним променем у ПТТ або комбінацією електронних імпульсів у ПЗЗ) утворюється первинний відеосигнал. Повний відеосигнал, сформований в наступному блоці формування відеосигналу, подається на вхід електросвітлового перетворювача (ЕСП) та до пристрою введення

зображення в комп'ютері (ПВБК). Сервісні вузли використовують для програмованого керування параметрами ПКЕР.

Специфіка використання зумовлює параметри оптичної схеми, ПВБК та тип комп'ютера, характеристики сервісних вузлів, вимоги до СЕП та ЕСП тощо.



Узагальнена структура ПКЕР.

Якщо СЕП визначає принципову можливість виконання ПКЕР певних функцій, то оптична система, в основному, забезпечує якісні показники функціонування. Зокрема, оптична система є спектральним фільтром певного діапазону та просторовим фільтром нижніх частот. Вибором характеристик оптичної системи встановлюється потрібне збільшення, спектральний діапазон, а також виконується узгодження динамічного діапазону СЕП з діапазоном змін вхідного сигналу.

ЕСП формує зображення об'єкта, яке є відтворенням його яскравості на поверхні об'єкта або в певних режимах змінює вхідне зображення, підкреслюючи діагностичні ознаки. Якщо існуючі ПЗЗ мають діапазон спектральної чутливості від 0,4 мкм до 1,5 мкм, то спектральний діапазон ПТТ за рахунок піровідконів розширюється принаймні до 20 мкм. Зазначимо, що ця відмінність принципова

як з погляду матеріалу мішені піровідкону, так і стосовно класу можливих завдань.

У розвитку піровідконних ПКЕР чітко вирізняються два періоди. Перший — з моменту створення ПТТ з піроелектричною мішенню в середині 60-х років і до кінця 70-х, коли стало ясно, що надії на широке впровадження нової трубки у військову техніку не справдились. Другий, починаючи з 80-х років, стимульований публікаціями матеріалів, які раніше були засекреченими, а також розвитком технології виробництва піровідконів, завдяки чому відтепер надійний і порівняно дешевий піровідкон виходить із розряду екзотичних приладів. У цьому періоді почастішали спроби створення та використання піровідконових ПКЕР у різних галузях народного господарства.

Більш-менш повна характеристика досягнень цього періоду описана в [9, 10]. У цьому ж періоді НПО

“Електрон” спільно з Азовським оптико-механічним заводом створює серію систем “Пировидикон”, найдосконалішою з-поміж яких є “Пировидикон-3” на піровідіконі ЛІ-492. Система працює тільки в режимі панорамування, у той час, як більшість закордонних аналогів можуть працювати в режимах і панорамування, і обтюрції. Принагідно додамо, що вагомий вклад у розвиток піровідіконної техніки зробили науковці Київського та Львівського політехнічних інститутів. Та, незважаючи на окремі вдалі технічні рішення, очікуваного і прогнозованого багатства спеціалістами “технічного перевороту” не сталося. Причин, на наш погляд, дві. Перша полягає в тому, що піровідіконні прилади за критерієм розрізнення поступаються альтернативним ПКЕР, тому всі спроби перевершити останні за якістю зображення приречені на невдачу. Вести мову можна тільки про обґрунтований вибір об’єктів контролю та методики застосування, за яких різниця в розрізненні не суттєва, а на перший план виступають очевидні переваги піровідіконних ПКЕР – можливість роботи в широкому спектральному діапазоні без охолодження та простота селекції рухомих об’єктів.

Друга причина полягає в тому, що становлення і розвиток піровідіконних приладів відбувались в умовах, коли вже були сформовані методологічні основи телевізійних систем та тепловізійних систем з оптико-механічною розгорткою. Тому логічним, на перший погляд, видавалось прагнення скористатися розробленими раніше методами при розв’язанні нових задач. У більшості випадків подібна практика себе виправдала, але досить часто траплялись і помилки, зокрема при оцінюванні потенціальних можливостей піровідіконних систем та під час експериментальних досліджень їх характеристик.

Додамо, що аналіз останніх публікацій [11, 12] дає всі підстави стверджувати про початок нового періоду розвитку піровідіконної елементної бази. Особливо перспективною для застосування в ПКЕР видається нова трубка РЕМЕТ. У трубці РЕМЕТ (Pyroelectric Modulation Effect Tube) використаний ефект модуляції потоку електронів полем зарядів, що створюється елементами мішені. РЕМЕТ має чутливість близько 100 мкА/Вт у режимі панорамування та до 10 мкА/Вт у режимі обтюрції, а роздільна здатність становить 400 ліній на растр, що дає можливість значно покращити показники ПКЕР.

Як зазначалося вище, вхідним сигналом для ПКЕР або фізичною величиною, яка перетворюється

в інформацію про стан об’єкта контролю, є потік випромінювання, точніше, потік з елементарної площадки поверхні об’єкта, орієнтованої під певним кутом до нормалі, у тілесний кут, який спирається на вхідну апертуру, тобто яскравість.

Перетворення вхідного сигналу відбувається в такій послідовності.

Спочатку здійснюється спектральна фільтрація потоку елементами оптичної схеми відповідно до співвідношення  $\tau_\lambda = \tau_{\lambda\phi} \cdot \tau_{\lambda 0}$ , де  $\tau_{\lambda\phi}$ ,  $\tau_{\lambda 0}$  — спектральні коефіцієнти пропускання фільтра та об’єктива. Одночасно потік обмежується за рахунок вибору певного значення світлового діаметра об’єктива  $D_0$ . На цьому етапі досягається погодження динамічного діапазону СЕП з робочим діапазоном змін яскравості об’єкта контролю.

Далі відповідно імпульсною характеристикою об’єктива формується функція розподілу освітленості в чутливій площині, яка в загальному випадку є також функцією часу  $t$ .

Якщо ПКЕР нерухомий, а швидкість зміни яскравості (або руху об’єкта) значно менші ніж час формування кадру, то для функції  $E'(x', y', t)$  можливе спрощення у вигляді розділення координат простору і часу  $E'(x', y', t) = E'(x', y') \cdot E'(t)$ . Така залежність освітленості від координати часу практично означає, що в межах інтервалу формування кадру  $E'(x', y') = const$ .

На наступному етапі відбувається перетворення функції  $E'(x', y')$  у сигнал розгортки — відеосигнал  $U(t)$ , відповідно з законом розгортки  $x' = x'(t)$ ;  $y' = y'(t)$ . Додамо, що в ПКЕР при розгортці потенціального рельєфу відбувається його дискретизація – наближене задання функції  $E'(x', y')$  сукупністю її значень з утворенням еквівалентної матриці  $U_0[E'(x', y')]$ . У вимірювальних ПКЕР відеосигнал перетворюється в цифрову форму з прив’язуванням до координатної площини СЕП, а в діагностичних – у потік випромінювання екрана ЕСП, яскравість якого в певній точці пропорційна до освітленості відповідного елемента розкладу СЕП.

Перетворення сигналу в цифрову форму відбувається шляхом квантування кожного із значень матриці  $U_0[E'(x', y')]$ . Результатом послідовного виконання над функцією  $E'(x', y')$  операцій дискретизації та квантування є матриця [13]

$$[A] = U_K U_D [E'(x', y')], \quad (1)$$

де  $U_K$  – оператор квантування.

На заключному етапі перетворень у комп’ютері виконують операції з матрицею (1), мета та вид яких визначаються призначенням ПКЕР та програмним забезпеченням.

Загальноприйнятою практикою аналізу систем формування та передачі зображень є використання математичного апарата теорії лінійних систем, яку можна застосувати тільки в тому разі, коли виконується принцип суперпозиції, тобто коли реакція на сумарний сигнал дорівнює сумі реакцій на окремі його складові. У межах діапазону лінійності до аналізу процесу перетворення сигналу в ПКЕР можна застосовувати просторово-частотні уявлення, при яких просторові функції  $E'(x',y')$  ставиться у відповідність просторовий спектр  $S(f_x, f_y)$ , де  $f_x, f_y$  — просторові частоти.

А зв'язок між спектрами сигналів на вході  $S_{вх}(f_x, f_y)$  та на виході  $S_{вих}(f_x, f_y)$  визначають через функцію передачі модуляції системи  $H(f_x, f_y)$

$$S_{вих}(f_x, f_y) = S_{вх}(f_x, f_y) \cdot H(f_x, f_y). \quad (2)$$

Теорію лінійних систем можна використовувати для аналізу ПКЕР, якщо випромінювання сприймається некогерентно, а система лінійна та просторово-інваріантна. Щодо лінійності — то ПКЕР взагалі є нелінійними системами, але в кожному конкретному випадку треба експериментально визначити діапазон, в якому відбувається лінійне перетворення сигналу. Просторова інваріантність ПКЕР також потребує певних припущень, наприклад, введення в розгляд ізопланатичних зон, у межах яких функцію розсіяння можна вважати постійною.

Серед основних чинників, які впливають на формування сигналу, спричиняючи похибки, треба відзначити неоднорідність та динамічну нестабільність середовища, просторову неінваріантність спектральних характеристик об'єктива та СЕП, остаточні аберації об'єктива, нерівномірність чутливості та власні шуми СЕП, шуми блока формування сигналу, недосконалість системи розгортки, дрейфи, похибки дискретизації та квантування. При цьому систематичні похибки завжди зумовлені систематичними чинниками, а випадкові — можуть бути зумовлені як випадковими, так і систематичними. Останнє має місце, коли, наприклад, сигнал у даній точці, значення якого в діапазоні лінійності визначається взагалі тільки світлосигнальною характеристикою, залежить від сигналів у сусідніх точках, тобто зумовлений випадковим характером розподілу зображення [14].

Відзначаючи важливість вказаних питань взагалі, вважаємо доцільним у певних випадках обмежуватись застосуванням відомих підходів. Так, похибка, зумовлена шумами СЕП, блоком формування сигналу, квантування та дискретизації зменшується при додаванні  $n$  послідовних кадрів у  $n^{1/2}$  разів. Похибки внаслідок просторової неінва-

ріантності характеристик об'єктива та СЕП, недосконалість системи розгортки, можна компенсувати попереднім калібруванням [15]. Похибки, спричинені дрейфом параметрів, доцільно враховувати періодичним калібруванням, період якого визначається швидкістю зміни калібрувального сигналу [5]. Такий підхід видається правомірним, оскільки відомо, що вказані заходи зменшують інструментальну похибку, а необхідні параметри (значення  $n$ , період циклу калібрування тощо) можна визначити експериментально. У той же час з'являється можливість зосередити увагу на врахуванні та компенсації методичних похибок формування сигналу в ПКЕР, з-поміж яких головними є розкид значень коефіцієнта випромінювальної здатності (у випадку власного випромінювання) або коефіцієнта відбиття (у випадку, коли досліджується відбите випромінювання), а також вплив середовища та випромінювання сторонніх джерел.

1. Елизаренко А.С., Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г. *Опτικο-електронные системы в исследованиях природных ресурсов*. М., 1984. 2. Рыфтин Я.А. *Телевизионная система. Теория*. М., 1967. 3. Inoue S., *Video microscopy of living cells and dynamic molecular assemblies // Applied Optics*. 1987. № 16. Vol.26. P.3219-3225. 4. Mizushima Y. *Detectivity limit of very small objects by video-enhanced microscopy // Applied Optics*. 1988. № 12. Vol.27. P.2587-2594. 5. Порев В.А. *Телевизионный анализатор температурных микрополей // ПТЭ*. 1998. № 1. С.1-2. 6. Порев В.А. *Контроль процесса зонной очистки с использованием телевизионных приборов // Дефектоскопия*. 1997. № 6. С.50-51. 7. Лазарев А.И. *Визуально-инструментальные исследования Земли из космоса // Оптико-механическая промышленность*. 1989. № 1. С.51-58. 8. Бузников А.А. *Методы и аппаратура дистанционного зондирования для глобального экологического мониторинга // Оптическая промышленность*. 1992. № 8. С.6-1. 9. Кирьев А.М. *Теловизионная аппаратура на пировидиконах // Техника кино и телевидения*. 1988. № 1. С.47-50. 10. Криксунов Л.З., Рабышко В.А., Пириконы. К., 1984. 11. Либенсон Б.Н., Меркин С.Ю., Станская Т.Б., Цырлин Л.Э. *Использование пироэлектрических приборов в теловизионных системах // Оптический журн*. 1997. № 6. Т.64. С.118-120. 12. Березкин Н.А., Дун А.З., Меркин С.Ю. *Новая высокочувствительная телевизионная передающая трубка с пироэлектрической мишенью, использующая эффект модуляции тока электронного луча, РЕМЕТ (Pyroelectric Modulation Effect Tube) // Оптический журн*. 1997. № 6. Т.64. С.93—98. 13. Смирнов А.Я. *Математические модели теории передачи изображений*. М., 1979. 14. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. *Телевизионные измерительные системы*. М., 1980. 15. Лагодный В.И., Порев Г.В. *Программа коррекция в телевизионных системах автоматизованого контролю // Тез. доп. наук. техн. конф. Судак, 1996*.