

УДК 621.307.13

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ МІКРОДЕФЕКТІВ В ДЕТАЛЯХ З ОПТИЧНО ПРОЗОРИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ЗАСОБІВ

В.П. Маслов

НТУУ «Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, vladmaslov@mail.ru

Проведено дослідження факторів, які визначають точність вимірювання лінійних розмірів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем. Виконана класифікація підходів до оцінки похибки вимірювання лінійних розмірів. Показано, що геометричним підходом доцільно користуватись переважно для отримання оціночних значень похибки вимірювання, наприклад, в лабораторних умовах при використанні еталонних джерела. Використання просторово-частотного підходу цілком прийнятне тільки для оцінки потенційних значень. Реальна точність вимірювання лінійних розмірів за допомогою телевізійних інформаційно-вимірювальних систем обумовлюється характеристиками приладу, контрастом на об'єкті, умовами роботи. Показано, що точність вимірювання лінійних розмірів можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування сигналу, яка використовує умовну дискретизацію функції освітленості в межах пікселя.

Ключові слова: похибка вимірювання, лінійний розмір, телевізійні засоби, освітленість, піксель.

Исследованы факторы, определяющие точность измерения линейных размеров при помощи телевизионных информационно – измерительных систем. Выполнена классификация подходов к оценке погрешности измерения линейных размеров. Показано, что геометрический подход целесообразен для оценочных значений погрешности измерения, например, в лабораторных условиях при использовании эталонных источников. Использование пространственно – частотного подхода целесообразно только для оценки потенциальных значений. Реальная точность измерения линейных размеров при помощи телевизионных информационно – измерительных систем определяется характеристиками прибора, контрастом на объекте, условиями работы. Показано, что точность измерения линейных размеров можно увеличить за счет специальной методики формирования сигнала, которая использует условную дискретизацию функции освещенности в границах пикселя.

Ключевые слова: погрешность измерения, линейный размер, телевизионные средства, освещенность, пиксел.

The factors that are key to the accuracy for measuring the linear dimensions with the aid of television-information systems are analyzed. The approaches towards the estimation of the inaccuracy of measurement of linear dimensions are classified. It is shown that geometric approach is valuable for the preliminary estimation of inaccuracy of measurement, for instance, in the laboratory conditions and using the standard certified sources. Using of the spatial frequency analysis is only efficient for estimation. The real accuracy of the measurement of linear dimensions using the television-information systems is determined by the properties of the devices, image contrast and the environment conditions. It is shown that the accuracy of measurement of linear dimensions could be raised by special technique of signal formation, which uses implicit discretization of the luminosity function within the pixel bounds.

Key words: measurement accuracy, linear dimension, television devices, luminosity function, pixel.

Технологічний рівень суспільства визначається не тільки наявністю досконалих технологій отримання нових речовин, матеріалів та виробів, але й відповідних методів і засобів контролю цих технологій. Відомо, що в сучасних приладах широко використовується такий унікальний матеріал як сапфір. Висока стійкість до механічних, хімічних і температурних впливів, хороша прозорість в

оптичному діапазоні від ультрафіолетового до інфрачервоного випромінювання, яка властива матеріалу, дають можливість виготовляти сапфірові вікна та лінзи для оптичних приладів. Деталі із сапфіру використовують в термоядерних установках при діагностиці термоядерної плазми та аналізі стану поверхні розрядних плазмових камер, а також в космічній техніці – для виведення лазерного

випромінювання в космічний простір і в системах зв'язку космічних апаратів. Високі електроізолюючі властивості сапфіру посприяли також успішному його використанню в мікроелектроніці як матеріал–підкладка для структур «кремній на сапфірі», а в останній час – для виготовлення на сапфірових підкладках випромінюючих світлодіодів.

При виробуванні зливків монокристалічного сапфіру у ньому виникають дефекти у вигляді мікробульбашок, границь блоків та механічні напруження, які суттєво впливають на його властивості. При експлуатації приладів можливе руйнування з'єднаних деталей і вузлів, яке починається від шліфованих поверхонь і місць їх з'єднання. Тому вирішення проблеми контролю мікро– і наноз'єднань, особливо з урахуванням стану поверхні після механічної обробки прецизійних деталей, є надзвичайно актуальним завданням.

Проблему контролю якості сапфірових структур вирішують багатьма способами, але вони не достатньо чутливі для потреб сучасних технологій або складні у використанні (рентгенівські методи). Одним із традиційних методів контролю є світлова мікроскопія, яка застосовується практично у всіх матеріалознавчих дослідженнях. Цим методом виявляють стан виробів, пористість, тріщини, структуру, різні вклучення, деякі дефекти кристалічної будови. Аналізується структура поверхневого шару виробів і матеріалів, проводиться оцінка лінійних розмірів елементів та розмірів дефектів.

Останнім часом в технологічно розвинених країнах значного поширення набули телевізійні інформаційно–вимірювальні системи (ТІВС), за допомогою яких інформація про структуру, стан та властивості об'єктів різної природи, яка міститься в їх випромінюванні, перетворюється в зображення та аналізується. ТІВС фактично знаменують собою новий рівень вимірювальних технологій і потенційно найбільше відповідають сучасним вимогам контролю багатьох технологічних процесів. ТІВС надають унікальну можливість провадити вимірювання геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів в реальному масштабі часу з високим просторовим розрізненням шляхом аналізу як власного випромінювання, так і того, що відбулося або пройшло через об'єкт. На базі телевізійної системотехніки, зокрема, виникли відеомікроскопія та телевізійна пірометрія, без яких досягнення багатьох галузей науки і техніки були б значно скромнішими. ТІВС широко використовуються для охорони, в наукових дослідженнях, в промислових технологіях, в екології, в медичній діагностиці, в астрономії та в космічному матеріалознавстві, на транспорті, в криміналістичній експертизі, в

біотехнології, в мікроелектроніці, в військовій справі тощо.

Загальна методика застосування ТІВС полягає в формуванні зображення, перетворенні його в цифровий код та використанні алгоритмів, які забезпечують необхідну точність вимірювання енергетичних і геометричних параметрів об'єктів контролю. Телевізійне зображення може існувати як розподіл освітленості на чутливій поверхні світлоелектричного перетворювача (СЕП) як розподіл зарядів, як сформована законом розгортки послідовність аналогових електричних сигналів, як цифровий масив (цифрове зображення), як розподіл яскравості екрану. Термін світлоелектричний перетворювач склався історично і використовується переважно в телевізійній техніці, на відміну від терміну оптикоелектричний перетворювач, який має більш широке застосування. СЕП, як основний компонент ТІВС, істотно впливає на функціональні можливості ТІВС, зокрема, визначає спектральний діапазон (разом із оптичною системою), діапазон лінійності та міру неідентичності піксел, тобто точність вимірювання.

Важливим чинником, який дозволяє телевізійним вимірювальним засобам займати провідне місце серед аналогічних засобів, є наявність в їх структурі обчислювальних засобів (комп'ютера) та використання потужного арсеналу програмного забезпечення. Програмні засоби забезпечують керування процесом формування телевізійного зображення, введення його в комп'ютер, обробку, визначення заданих характеристик, поточну корекцію роботи ТІВС, формування банку даних, в тому числі і банку цифрових зображень.

Концепція застосування ТІВС для дослідження геометричних, динамічних та енергетичних параметрів об'єктів базується на припущенні про СЕП як про первинний вимірювальний перетворювач, що складається з упорядкованої сукупності ідентичних і незалежних мікроперетворювачів випромінювання (піксел). Реально таке припущення не завжди відповідає дійсності, вимога незалежності сусідніх піксел виконується тільки при роботі СЕП в діапазоні лінійності, а вимога ідентичності забезпечується програмною корекцією [1].

Елементна база телевізійної системотехніки на сьогодні має практично однакові параметри в усіх розвинених країнах, а технологія виробництва сучасних телевізійних систем досягла високого рівня і намітилась тенденція до стабілізації. Отже, істотне підвищення ефективності ТІВС можливе тільки на шляху розробки більш досконалих методик їх

використання як засобів вимірювання. Проблема полягає в тому, що незважаючи на значні досягнення, потенційні можливості ТІВС до кінця не вичерпані, головним чином внаслідок недосконалості методології їх використання як засобів вимірювання.

З точки зору наукових та технологічних досліджень ТІВС викликає особливу цікавість як технічний засіб з потенційно високим просторовим розрізненням. Але при використанні ТІВС для вимірювання геометричних параметрів можливі значні розходження в методиках оцінки потенційних можливостей ТІВС при вирішенні конкретних задач.

В більшості випадків приймають, що лінійне розрізнення ТІВС обернено пропорційне лінійному розміру пікселя. При цьому розміри пікселя визначаються типом СЕП і можуть бути в діапазоні від одиниць до десятків мікрон. Ця обставина разом з малою тривалістю формування сигналу всієї матриці є принциповою особливістю ТІВС, яка вже зараз відкриває перед ними широкі перспективи впровадження в наукові дослідження та в технологічну практику.

Метою даного дослідження є визначення умов, за дотримання яких потенційні переваги телевізійної системотехніки (великий обсяг та малий час формування вибірки, малі розміри елемента розкладу зображення) більш повно трансформуються в таку важливу характеристику як точність вимірювання геометричних параметрів.

Сукупність факторів, які впливають на точність вимірювання лінійних розмірів, можна розділити на дві групи. До першої групи віднесемо фактори, обумовлені характеристиками технічних засобів, до другої – особливостями формування зображення об'єкту, параметри якого визначаються.

Зрозуміло, що кожний компонент ТІВС впливає певним чином на точність визначення геометричних параметрів зображення. Обмежимося розглядом тих компонентів, які можуть бути головними джерелами похибок.

Аналіз літературних джерел [2, 3] дає всі підстави зробити висновок про те, що найбільший внесок в сумарну похибку вимірювання координати вносять похибки, обумовлені шумами СЕП, методичні похибки визначення координат та похибки аналого-цифрового перетворення, що дозволяє віднести їх до головних факторів, які впливають на точність визначення геометричних параметрів зображення.

Отже, сумарна похибка вимірювання лінійних розмірів може бути визначена за формулою

$$\Delta k = \sqrt{\Delta_{ш}^2 + \Delta_{г}^2 + \Delta_{ашп}^2 + \Delta_{м}^2}, \quad (1)$$

де $\Delta_{ш}$, $\Delta_{г}$, $\Delta_{ашп}$, $\Delta_{м}$ — складові, обумовлені власними шумами, геометричним шумом СЕП, шумом АЦП та методикою визначення координати, відповідно.

Похибка АЦП складається з інструментальної (нестабільність частоти та нелінійність характеристики), похибок дискретизації та квантування. Питання, пов'язані з похибками АЦП та їх впливом на точність вимірювання є достатньо вивченими. Для оцінки внеску складових $\Delta_{ашп}$ і $\Delta_{м}$ в похибку вимірювання можна скористатися результатами роботи [4], в якій наведено такі значення: $\Delta_{ашп} = 0,29\Delta_{ріх}$, $\Delta_{м} = 0,29\Delta_{ріх}$, де $\Delta_{ріх}$ — лінійний розмір пікселя вздовж відповідної координати. Ці результати отримані за припущень, що формування сигналу ПЗЗ-матриці характеризується малими втратами переносу зарядів, а методична похибка вимірювання координати обумовлюється характером зміни яскравості перехідної області. При цьому перехідна область, тобто область, на якій задані координати відрізка, є лінійною функцією яскравості.

Серед факторів, що впливають на точність визначення геометричних параметрів, нерівномірність чутливості (іноді вживають термін “геометричний шум СЕП”) заслуговує особливої уваги. Нерівномірність чутливості суперечить одній з основних складових концепції використання ТІВС для аналізу оптичних полів. Дійсно, вести мову про кількісний аналіз оптичного поля можна тільки тоді, коли для будь-яких піксел при однаковій освітленості ($E_{ij} = E_{pk}$) їх сигнали рівні між собою, тобто $A_{ij} = A_{pk}$. Але практично для всіх СЕП фіксуються випадки, коли $A_{ij} \neq A_{pk}$ при $E_{ij} = E_{pk}$. Можлива також ситуація, що $A_{ij} = A_{pk}$ при $E_{ij} \neq E_{pk}$.

Існуючі методики компенсації нерівномірності чутливості базуються на експериментальному визначенні локальних значень чутливості з подальшим їх використанням при обробці сигналу. Такий підхід дійсно дозволяє компенсувати геометричний шум. В цьому випадку сумарна похибка вимірювання визначається за формулою

$$\Delta k = \sqrt{\Delta_{ш}^2 + \Delta_{ашп}^2 + \Delta_{м}^2}. \quad (2)$$

Складова, обумовлена власними шумами СЕП, при вимірюванні координати в роботі [4] оцінюється наступною формулою

$$\Delta_{ш} = \frac{2t_{tran}}{q}, \quad (3)$$

де q — відношення сигналу до шуму в

зображенні; τ_{tran} — тривалість відеосигналу перехідної області.

Якщо при вимірюванні геометричних параметрів телевізійних зображень координати, а отже і розміри відрізків, розподілені за нормальним законом, то сумарну похибку вимірювання лінійного розміру можна оцінити за формулою $\Delta h = 2\Delta_k$.

Класичним підходом до оцінки похибки вимірювання лінійних розмірів в системах формування зображення є геометричний підхід, в основу якого покладено поняття елемента розкладу зображення як частини СЕП, в межах якого двомірна (просторова) функція освітленості інтегрується. При такому підході приймають, що абсолютна похибка вимірювання δ не перевищує значення лінійного розміру Δ елемента розкладу зображення по відповідній координаті. Але цим підходом доцільно користуватись переважно для отримання оціночних значень похибки вимірювання. Строго кажучи, геометричний підхід годиться для використання в лабораторних умовах, коли об'єктом виступають еталонні атестовані джерела.

До оцінки похибки вимірювання, крім геометричного, можуть бути застосовані інші підходи, зокрема, просторово-частотний, при якому точність вимірювання лінійних розмірів співставляється з роздільною здатністю, що визначається по ширині сумарної функції передачі модуляції (ФПМ) як значення просторової частоти, на якій нормований коефіцієнт передачі контрасту дорівнює пороговому. В свою чергу, пороговий контраст КП визначається за формулою, отриманою в [5]:

$$K_{\Pi} = \frac{q_{\Pi}(P)}{K_{BX}q(E)g(E)}, \quad (4)$$

де $q(E)$, $q_{\Pi}(P)$ — відношення сигнал/шум при освітленості E та порогове при імовірності реєстрації P ; K_{BX} — вхідний контраст; $\gamma(E)$ — показник ступеню світлосигнальної характеристики.

Оскільки ФПМ телевізійної системи, як правило, монотонно спадають в бік високих частот, то роздільна здатність буде тим більшою, чим більшим буде K_{BX} на даній просторовій частоті і чим кращою буде ФПМ. При цьому кращою вважається ФПМ, для якої коефіцієнт передачі контрасту приймає одне і те ж значення на більшій просторовій частоті.

Зауважимо, що в літературних джерелах, де використовується просторово-частотний підхід до визначення роздільної здатності, часто не враховуються особливості формування порогового контрасту та умови реальної задачі. В експериментальних дослідженнях ФПМ, як

правило, використовуються міри з $K_{BX}=1$. Отримане при цьому за формулою (4) значення K_{Π} може виявитися заниженим, а роздільна здатність, відповідно, завищеною. Отже, використання моделі з $K_{BX}=1$ є цілком прийнятним тільки для оцінки потенційної роздільної здатності.

Якщо ФПМ задана аналітично, то роздільну здатність можна визначити розрахунковим шляхом. Наприклад, в межах лінійної одномірної моделі ФПМ ПЗЗ- камери

$$H(f_x) = \exp[-2p^2 f_x^2 (r_p^2 - r_0^2)], \quad (5)$$

де r_p , r_0 — ефективний радіус розсіяння елемента розкладу зображення ПЗЗ-матриці та оптики на рівні 0,606 від максимальних значень; f_x — просторова частота.

Коефіцієнт передачі контрасту на просторовій частоті f_{Kn} , для якої досягається значення порогового контрасту

$$K(f_{Kn}) = \exp[-2p^2 f_{Kn}^2 (r_p^2 + r_0^2)]. \quad (6)$$

Прирівнявши (4) і (6) та за умови, що $\gamma(E)=1$, отримаємо:

$$\frac{q_{\Pi}(P)}{K_{BX}q(E)} = \exp[-2p^2 f_{Kn}^2 (r_0^2 + r_p^2)] \quad (7)$$

Прологарифмувавши (7) та виконавши нескладні перетворення, отримаємо такий вираз для просторової частоти, на якій досягається значення порогового контрасту:

$$f_{Kn} = \left[\frac{\ln(K_{BX} \cdot q(E)) - \ln q(p)}{2p^2 (r_0^2 + r_p^2)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

З формули (8) випливає, що реальна точність вимірювання лінійних розмірів за допомогою ТІВС обумовлюється параметрами приладу (r_0 , r_p , $q(p)$), контрастом на об'єкті (K_{BX}), умовами роботи — $q(E)$.

Виконані нами дослідження показали, що точність вимірювання лінійних розмірів можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування сигналу, яка використовує залежність сигналу пікселя ПЗЗ-матриці від співвідношення між більш освітленою і менш освітленою його ділянками.

Нехай сигнал, який формується пікселем з площею S в межах лінійної ділянки світлосигнальної характеристики ПЗЗ-матриці знаходиться в діапазоні від середньоквадратичного значення шуму σ до деякого максимального A_0 при освітленості E'_0 . Очевидно, що зміну сигналу в цих межах можна

отримати, збільшуючи освітленість від Е'П до Е'0, або навпаки, зменшуючи її від Е'0 до Е'П. Таку ж залежність можна побудувати, якщо при постійній освітленості Е0' повністю перекрити піксел, а потім поступово його відкривати.

Введемо параметр SP^* , який визначає освітлену площу піксела. Очевидно, що $0 \leq SP^* \leq S$, а при роботі в межах діапазону лінійності сформований пікселем сигнал $\sigma \leq A(SP^*) \leq A0$.

Нехай в момент часу t сигнал $A(t)$, а реалізація шуму $AШ(t)$. Визначимо поріг реєстрації сигналу $AП$, і встановимо, що сигнал $A(t)$ може бути зареєстрований за умови $A(t) > AП + AШ(t)$, або $AШ(t) < A(t) - AП$.

$$a_1 = \frac{A(t)}{S}, a_2 = \frac{AП}{S}, a_3 = \frac{AШ(t)}{S}$$

Введемо приведені значення. Тоді умова реєстрації сигналу $a_3 < a_1 - a_2$. Шум піксела $AШ(t)$, а також приведені значення a_3 є випадковими величинами. Повною характеристикою випадкової величини є функція розподілу (інтегральний закон розподілу), який визначає імовірність того, що випадкова величина приймає значення менше заданого. Для найбільш поширених в науковій практиці ПВС на ПЗЗ шум СЕП підкоряється нормальному закону розподілу, оскільки шумовий сигнал утворюється внаслідок одночасної дії кількох незалежних факторів, жоден з яких не домінує. Тоді імовірність реєстрації сигналу, тобто імовірність того, що $P(a_3 < a_1 - a_2)$ визначиться так

$$P(a_3 < a_1 - a_2) = \frac{1}{\sqrt{2p}} \int_{-\infty}^{a_1 - a_2} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad (9)$$

Скориставшись табличними значеннями можна встановити залежність між будь-якими величинами, що входять в формулу (9). Наприклад, при $a_2=1$, тобто при $AП=\sigma$ значення імовірності реєстрації $P=0.99$ буде забезпечуватись при $A(t)=3.2\sigma$. Якщо такий сигнал буде сформований частиною піксела і при цьому $A(t) \ll A0$, то кількість ділянок, що можуть бути розрізнені в межах піксела як окремі

$$N_1 = \frac{A_0}{3.2S} \quad (10)$$

З цього випливає, що при лінійному розмірі піксела Δr_{ix} можлива ідентифікація положення межі з точністю до ділянки розміром $\Delta r_{ix}/N$.

В принципі, методика дозволяє підвищувати точність визначення координати до рівня, який

обмежується тільки дисперсією шуму. Для оцінки достовірності сформульованого положення можна скористатися експериментальними результатами, отриманими в [6], де вказується, що гранична похибка вимірювання координати для сучасних ПЗЗ може бути зменшена до величини 1 мкм. Зазначимо, що використання методики дозволило втричі збільшити точність вимірювання геометричних параметрів зони розплаву в технології безтигельної зонної плавки та в задачах вимірювання геометричних параметрів при малих контрастах телевізійних зображень.

Зрозуміло, що застосування запропонованої методики може привести до підвищення точності вимірювання геометричних параметрів також в інших задачах. Наприклад, згідно з традиційною методикою встановлено, що зображення об'єкту формується в межах від піксела $(i; j)$ до піксела $(i; k)$. Тоді лінійний розмір зображення об'єкту обчислюється за формулою

$$h = (Y_{i,k} - Y_{i,j}) \quad (11)$$

де Y_{ik}, Y_{ij} – координати піксел $(i; j), (i; k)$.

Оскільки лінія межі може довільно перетинати піксел, то максимальна абсолютна похибка визначення координати ΔY дорівнює розміру піксела Δr_{ix} вздовж цієї координати. У відповідності з (11) максимальна абсолютна похибка вимірювання розміру зображення

$$\Delta h = 2\Delta Y = 2\Delta_{pix} \quad (12)$$

У відповідності із запропонованою методикою розмір зображення об'єкту визначається за формулою

$$h_0 = (Y_{i,k-1} - Y_{i,j-1}) + \frac{\Delta_{pix} \cdot y}{N} (l_k + l_j), \quad (13)$$

де l_k, l_j – кількість ділянок розміром $\frac{\Delta_{pix} \cdot y}{N}$, зайнятих зображенням $ЗР$ в межах піксела $(i; k)$ та піксела $(i; j)$, відповідно.

Застосування запропонованої методики дозволяє зменшити похибку визначення координати, оскільки використовується не Δr_{ix} , а $\Delta r_{pix} \cdot y = \frac{\Delta_{pix} \cdot y}{N}$. Відповідно, похибка вимірювання зменшується в N разів, де N визначається формулою (10).

Наведені міркування не повинні розглядатися як такі, що суперечать теоремі Котельнікова, яка є теоретичною базою дискретизації зображень. Неперервна функція $E'(x', y')$ задана в площині СЕП, її дискретизація

здійснюється у відповідності з теоремою Котельнікова шляхом виборок в «точках», віддалених одна від одної на Δx .

В даному випадку показана можливість умовної дискретизації функції $E'(x',y')$ в межах крайніх піксел, яка впливає з характеру функції $E'(x',y')$ саме в межах вказаних піксел. Така дискретизація здійснюється шляхом встановлення відповідності між значенням сигналу піксела і кількістю умовних (фізично не заданих) елементів дискретизації.

В той же час практична реалізація такого підходу може бути пов'язана із значними труднощами внаслідок цілого ряду причин, серед яких основну роль відіграють власні шуми, флуктуації вхідного сигналу, якість оптики тощо. Дійсно, лінійне розрізнення в одиниці мкм є одного порядку з тим, яке визначається для об'єктиву за критерієм Релея. А це вже вимагає окремих досліджень і оптики з високим ступенем корекції аберацій. Знадобляться також значні зусилля для захисту від низькочастотних мікрівібрацій, пов'язаних з роботою лабораторного обладнання, транспорту та інших джерел механічних коливань.

ВИСНОВКИ

Потенційні переваги телевізійної системотехніки (великий обсяг та малий час формування вибірки, малі розміри елемента розкладу зображення) більш повно трансформуються в характеристики телевізійних засобів вимірювання при виконанні концептуальних вимог щодо незалежності та ідентичності піксел.

Точність вимірювання лінійних розмірів можна збільшити за рахунок спеціальної методики формування сигналу, яка використовує умовну дискретизацію функції освітленості в межах крайніх піксел.

1. Порєв Г.В., Порєв В.А. Концептуальні аспекти використання приладів з електронним розгортанням зображення для аналізу оптичних полів // Наукові вісті НТУУ «КПІ».—2001, №.1.— С.56. 2. Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И. Телевизионные измерительные системы.— М.:Связь, 1980.—168 с. 3. Коркунов Ю.Ф., Корнышев Н.П. Измерение геометрических параметров объектов при воздействии шума // Техника средств связи, серия «техника телевидения».—1990.—Вып. 3.—С.76–80. 4. Телешов Г.В. Погрешность определения линейных размеров в системах обработки изображения на фоточувствительных приборах с зарядовой связью // Изв. вузов. Приборостроение.—1995.—№11–12, Т.38— С.44–46. 5. Брацлавец П.Ф., Росселевич И.А., Хромов Л.И. Космическое телевидение.— М.:Связь, 1973. 6. Маслюков Ю.С. Определение предельных погрешностей измерительной системы на ПЗС // Оптико–механическая промышленность.—1990.—№ 4.—С.70–73.

Поступила в редакцію 21.09.2012р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук,
проф. Кісіль І. С.