

В.П. Манойлов, д.т.н., проф.

О.Ф. Дубина, к.т.н., ст. викл.

І.І. Полещук, ст. викл.

П.П. Мартинчук, ст. викл.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Розрахунок параметрів приймачів зображення на ПЗЗ структурах при зніманні земної поверхні з літального апарата

Проведено аналіз шумових характеристик оптико-електронних приймачів зображення на матричних фоточутливих ПЗЗ структурах зі стрічковою адресацією і їхнього впливу на роздільну здатність оптико-електронних датчиків зображення в умовах слабкої освітленості. Розрізняльна здатність ПЗЗ на низьких рівнях освітленості обмежена головним чином шумами у фоновому заряді і шумами процесу захоплення носіїв.

До матриць зі стрічковою адресацією належать ФПЗЗ з тимчасовою затримкою та накопиченням (ТЗН), використання яких дозволяє різко збільшити відношення сигнал-шум, і як наслідок реалізувати високу чутливість. Одна з основних переваг матриць з ТЗН – можливість гібридної збірки їх в суперлінійки, число елементів яких досягає десятків тисяч.

Сучасні матриці ТЗН будуються за принципом секціонування. Кожна секція такої матриці дозволяє здійснювати перенесення заряду по стовпцях в сторону регістра. Оскільки секції керується незалежно (або частково незалежно), то послідовно відключаючи їх можна регулювати число рядків накопичення, а отже і чутливість ПЗЗ ТЗН. Таким чином здійснюється регулювання чутливості ПЗЗ і розширюється динамічний діапазон ПЗЗ і системи спостереження в цілому.

Для досягнення цієї мети був отриманий математичний вираз для розрахунку кількості лінійок світлочуттєвих елементів ПЗЗ, що необхідно застосовувати при зніманні земної поверхні в умовах слабкої освітленості. При цьому, кількість елементів по довжині приймача визначається досягненням необхідного відношення сигнал/шум, при якому реальна розрізняльна здатність визначається мінімальними геометричними розмірами світлочутливого елемента.

Ключові слова: матричний оптико-електронний приймач; прилади із зарядовим зв'язком; роздільна здатність; літальний засіб; режим тимчасової затримки й накопичення; освітленість земної поверхні.

Постановка проблеми. Нині отримання інформації про земну поверхню, створення цифрових моделей рельєфу поверхні Землі стало актуальним завданням у картографії, військовій сфері, народному господарстві тощо. Широкі можливості відкрилися в цих областях діяльності при використанні сучасних літальних засобів: космічних апаратів (КА), літаків, безпілотних літальних апаратів [5].

Для картографії основною є інформація про просторові координати об'єктів на поверхні Землі. Для одержання такої інформації на літальному засобі встановлюється знімальна апаратура, що робить зйомку необхідних ділянок земної поверхні.

Останнім часом як приймачі зображення широко застосовуються приймачі, засновані на приладах із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) [3, 5].

ПЗЗ-матриці (пристрої з зарядовим зв'язком, які виконують функцію перетворення світла в електричний сигнал) [10] розвиваються швидкими темпами та вже давно проникли в різні галузі науки та техніки, що можна підтвердити широким застосуванням їх в цифрових сканерах, копіювальних пристроях, високоякісних професійних фотоапаратах, системах технічного зору, системах формування зображення високої чіткості, військовій, аерокосмічній апаратурі та ін. [3, 5].

Організація таких приладів за принципом зарядового зв'язку забезпечує можливість зчитування масиву електричних сигналів, що відповідають сцені зображення з мінімальними геометричними і тимчасовими шумами. Застосування ПЗЗ, що працюють істотно поліпшило стан справ в області видимого й інфрачервоного діапазонів. Датчики зображень на основі ПЗЗ можуть забезпечувати одночасне виконання ряду функцій, таких як детектування, зчитування і мультиплексування сигналу, а також його обробку в режимі тимчасової затримки й накопичення (ТЗН) [8].

Однак датчики зображень на основі ПЗЗ структур характеризуються деякими специфічними недоліками. Це, у першу чергу, залежність розрізняльної здатності від розмірів чуттєвого елемента, по-друге, наявність теплових шумів датчика, по-третє, наявність утрат при переносі заряду і інерційність переносу. При застосуванні ПЗЗ у режимі ТЗН виникає питання розрахунку кількості лінійок світлочуттєвих елементів, що необхідно застосовувати для накопичення сигналу при організації зйомки в

умовах слабкої освітленості. Така інформація також необхідна при проектуванні програмно-алгоритмічного комплексу та знімальної апаратури в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день отримання даних за допомогою оптико-електронних вимірювальних систем застосовується в багатьох сферах діяльності людства, таких як народне господарство, військова галузь та інших [2, 4]. Технологія безпосереднього зчитування даних у сучасних пристроях зображень реалізується, переважно, на основі фотодетекторів типу ПЗЗ [5, 11]. Одним із показників, що впливає на якість інформації, є роздільна здатність [1, 2, 8, 9]. До основних існуючих способів підвищення роздільної здатності ПЗЗ належать: розташування сенсорів по діагоналі і виконання їх у вигляді восьмигранників (матриця нового покоління Super CCD), використання сенсорів, які мають змінний розмір пікселя (Variable Pixel Size) [11], організація роботи ПЗЗ у режимі тимчасової затримки й накопичення [1, 6, 11]. Проведений аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що для такого режиму зйомки немає в явному вигляді алгоритму визначення кількості лінійок, що необхідно застосовувати для забезпечення досяжної роздільної здатності для певного приладу ПЗЗ.

Викладення основного матеріалу. Проаналізуємо фотоприйомний режим роботи ПЗЗ із поверхневим каналом переносу заряду. Інтенсивність світла в глибині напівпровідника убуває по експонентному закону

$$H_{uz} = H_0 b b_1 \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт поглинання, H_0 – потік квантів, що впливають на напівпровідника, b – коефіцієнт пропущення атмосфери, b_1 – відносний отвір об'єктива.

Освітленість земної поверхні в найкращих умовах досягає $H_0 = 80$ клк [7]. Коефіцієнт поглинання для найбільш застосовуваних напівпровідників (InSb, HgCdTe) приблизно дорівнює $0,005 \text{ см}^{-1}$ чи трохи більше [8]. При використанні напівпровідників із глибиною порядку $10 - 15$ мкм інтенсивність світла в глибині буде зменшуватися в десятки разів. Для досягнення високої точності визначення координат об'єктів на поверхні Землі (менш від одного метра) час експозиції має бути менше 100 мкс. З цього можна зробити висновок, що зйомка з КА при використанні як приймачів зображення ПЗЗ структури здійснюється в умовах слабкої освітленості (до 10^{-3} лк*с) [6].

Однією з основних характеристик ПЗЗ приймачів, що впливає на точність визначення координат наземних об'єктів, є розрізняльна здатність (РЗ) [2]. Вона визначається максимальною кількістю ліній (віднесених до одного міліметра), що ще може бути сприйнято даним формувачем сигналу зображення (ФСЗ) без їхнього злиття в одне ціле. Очевидно, що в ПЗЗ максимальна РЗ визначається розміром одного світлочутливого елемента L_e і дорівнює

$$R_{\max} = \frac{1}{L_e}. \quad (2)$$

Реальна РЗ у ПЗЗ нижча за розраховану за формулою (1). При малих рівнях освітленості у світлочутливих елементах накопичуються малі зарядові пакети і велику роль починають грати шуми. У цьому випадку мінімальний розмір світлочутливого елемента визначається не технологією виготовлення, а умовою одержання необхідного відношення сигнал/шум $g = 3-5$ [6].

Шуми в ПЗЗ можна розділити на дві групи: шуми, обумовлені процесом сприйняття зображення, і шуми, зв'язані з режимом передачі зарядових пакетів (сканування). До першої групи належать білий шум у потоці падаючих фотонів (флуктуації щільності потоку) і флуктуації фонового заряду.

Інтенсивність білого шуму фотонів $N_{\text{фот}}$ дорівнює [6]

$$\bar{N}_{\text{фот}} = \sqrt{N_{uz}}, \quad (3)$$

де N_{uz} – загальне число носіїв, накопичених за час інтегрування t_n світлочутливим елементом з сприймаючою площею A_e :

$$N_{uz} = H_{uz} \theta_u A_e \quad (4)$$

де H_{uz} – потік падаючих фотонів, за винятком відбитих, θ - квантова ефективність.

Шуми фонового заряду залежать від способу його введення. Якщо фоновий заряд накопичений за рахунок термогенерації, то його флуктуації характеризуються білим шумом

$$\bar{N}_{\text{фон}} = \sqrt{N_{тг}}, \quad (5)$$

де $N_{тг}$ – кількість термогенерованих носіїв у зарядовому пакеті.

До шумів, що виникають при скануванні, належать шуми $\bar{N}_{\text{ном}}$, обумовлені неповною передачею зарядів, і шуми $\bar{N}_{\text{зах}}$, обумовлені захопленням носіїв і перезарядом швидких поверхневих станів при проходженні зарядових пакетів:

$$\bar{N}_{nom} = \sqrt{2\varepsilon u(N_{m2} + N_{u3})}, \quad (6)$$

$$\bar{N}_{zax} = \sqrt{1,4(kT/q)N_{ss}A_3n}, \quad (7)$$

де u – число тактів у системі, n – число передач, N_{ss} – щільність швидких поверхневих станів, k – постійна Больцмана, T – абсолютна температура, q – величина заряду електрона, ε – коефіцієнт неефективності переносу заряду.

Корисний сигнал, прийнятий від об'єкта, має перевищувати шуми в задане число разів (g). Якщо контрастність C_{u3} зображення низька, то корисний сигнал є тільки частиною загального числа падаючих фотонів N_{u3} і дорівнює

$$\Delta N_{u3} = C_{u3}H_{u3}\theta_u A_3. \quad (8)$$

Для заданого світлового потоку N_{u3} – мінімальна площа світлочутливого елемента A , безпосередньо зв'язана з РЗ, визначається з умови досягнення необхідного значення відносини сигнал/шум

$$g = \frac{\Delta N_{u3}}{\bar{N}}, \quad (9)$$

де \bar{N} – сумарний шум.

Звідси знаходимо реально необхідне значення площі світлочутливого елемента A :

$$A = \frac{g\bar{N}}{C_{u3}H_{u3}\theta_u}. \quad (10)$$

Розрізняльна здатність ПЗЗ на низьких рівнях освітленості обмежена головним чином шумами у фоновому заряді і шумами процесу захоплення носіїв.

Розрахунок, проведений по вище наведених формулах, показує, що для забезпечення необхідного відношення сигнал/шум мінімальна площа одного елемента перевищує мінімальну «досяжну технологічну» [6]. Для поліпшення цього показника при космічній зйомці доцільне застосування матричного ПЗЗ приймача в режимі тимчасової затримки й накопичення при послідовно-рівнобіжному скануванні [9]. При використанні ПЗЗ рядків для зрушення вихідних сигналів окремих детекторів уздовж матриці з тією самою швидкістю, з якою система сканування зрушує зображення (зі швидкістю руху КА), досягається збільшення відношення сигнал/шум на множник, який дорівнює квадратному кореню з числа світлочутливих елементів у напрямку сканування [8].

Сучасні матриці ТЗН будуються за принципом секціонування. Кожна секція такої матриці дозволяє здійснювати перенесення заряду по стовпцях з сторону регістра. Оскільки секції керуються незалежно (або частково незалежно), то послідовно відключаючи їх можна регулювати число рядків накопичення, а отже і чутливість ПЗЗ ТЗН. Таким чином здійснюється регулювання чутливості ПЗЗ і розширюється динамічний діапазон ПЗЗ і системи спостереження в цілому [1, 4].

Конструкція приймача зображення буде визначатися таким чином. Число елементів по ширині матриці ФСЗ N_x визначається необхідною шириною смуги захоплення по Землі з урахуванням масштабного коефіцієнта і розміром елемента A :

$$N_x = \frac{X \cdot f}{H\sqrt{A}}, \quad (11)$$

де X – необхідна ширина смуги захоплення по Землі, f – фокусна відстань оптичної системи, H – висота знімання.

Кількість елементів по довжині приймача N_y визначається досягненням необхідного відношення сигнал/шум, при якому реальна розрізняльна здатність визначається мінімальними геометричними розмірами світлочутливого елемента.

У процесі накопичення зарядів еквівалентний світловий потік N_{u3} , що впливає на кожен наступний елемент, буде збільшуватися в N_y раз. Тому формула (10) буде мати вигляд:

$$A = \frac{m \left(\sqrt{1,4(kT/q)N_{ss}(N_x + N_y)A_e} + \sqrt{I_d t_u A_e (N_x + N_y)/q} \right)}{H_{u3} t_u C_{u3} \theta_u A_e N_y}, \quad (12)$$

де I_d – щільність струму термогенерації.

Звідси знаходимо кількість елементів по довжині приймача N_y , необхідну для того, щоб реально необхідне значення площі елемента A дорівнювало мінімальній технологічній A_e :

$$N_y = \frac{z^2 + \sqrt{z^4 + 4z^2 N_x}}{2}, \quad (13)$$

де

$$z = \frac{m \left(\sqrt{1,4 \left(\frac{kT}{q} \right) N_{ss} A_e} + \sqrt{I_d t_u A_e / q} \right)}{H_{uz} t_u C_{uz} \theta A_e}. \quad (14)$$

Так, при $N_{ss} = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$, $I_d = 10 \text{ нА} \cdot \text{см}^{-2}$, $H_0 = 80000 \text{ лк}$, $X = 10 \text{ км}$, $T = 77 \text{ К}$, $f = 15 \text{ м}$, $C_{из} = 0,2$, $A_e = 225 \text{ мкм}^2$, $H = 300 \text{ км}$, $b = 0,7$, $b_1 = 0,5$ необхідне число елементів по довжині приймача повинне бути рівним $N_y = 12$. Тобто, треба застосовувати ПЗЗ з стандартним числом строк $N_y = 16$.

Одним із методів зменшення N_y є застосування ПЗЗ з об'ємним каналом переносу заряду. У таких приладах відсутні шуми, зв'язані з захопленням носіїв і перезарядом швидких поверхневих станів при проходженні зарядових пакетів, а аналогічні їм шуми на захоплення носіїв в об'ємних станах на декілька порядків нижче.

Варто зазначити, що на шуми, що обмежують розрізняльну здатність, істотно впливає температура T , для підтримки стабільності якої необхідно застосовувати спеціальні міри.

Висновки. Таким чином, для зйомки поверхні Землі в умовах слабкої освітленості при твердих вимогах до розрізняльної здатності як приймач випромінювання необхідно застосовувати матричний приймач на ПЗЗ-структурах з об'ємним каналом переносу заряду. При цьому розрізняльна здатність досягається рівною «мінімальній технологічній» при найменшій кількості світлочутливих елементів по довжині приймача. Формула (13) дозволяє розрахувати кількість лінійок у матричному ПЗЗ-фотоприймачу з поверхневим переносом заряду.

Список використаної літератури:

1. Неуймін О.С. ПЗЗ-матриці / О.С. Неуймін, С.М. Дяченко // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка. Радіоапаратурубудування. – 2010. – № 41. – С. 186–188.
2. Горшенін О.Є. Методика прогнозування показників якості космічних оптико-електронних знімків видимого діапазону хвиль / О.Є. Горшенін, І.В. Пулеко, В.А. Миклуха // Вісник ЖДТУ. – Житомир : ЖДТУ, 2018. – № 1 (81). – С. 173–181.
3. Рэндал У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / У.Рэндал, Т.Маклэйн. – М. : Техносфера, 2015. – 312 с.
4. Проценко М.М. Аналіз методів цифрової обробки відеозображень апаратурою безпілотного літального апарату / М.М. Проценко // Вісник ЖДТУ. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – № 62 (3). – С. 67–72.
5. Проценко М.М. Аналіз структури та варіантів побудови безпілотних авіаційних комплексів / М.М. Проценко // Вісник ЖДТУ. – Житомир : ЖДТУ, 2012. – № 61 (2). – С. 113–117.
6. Носов Ю.Р. Полупроводниковые приборы с зарядовой связью / Ю.Р. Носов, В.А. Шилин. – М. : Сов. радио, 1976. – 144 с.
7. Солодов А.В. Инженерный справочник по космической технике / А.В. Солодов. – М. : Воениздат, 1977. – 430 с.
8. Барба Д.Ф. Приборы с зарядовой связью / Д.Ф. Барба ; пер. с англ. – М. : Мир, 1982. – 240 с.
9. Кисес Р.Дж. Фотоприемники видимого ИК диапазонов / Р.Дж. Кисес, П.В. Крузе, Э.Г. Патли ; пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1985. – 328 с.
10. Неизвестный С.И. Приборы с зарядовой связью. Устройство и основные принципы работы / С.И. Неизвестный, О.Ю. Никулин // Специальная Техника. – № 4. – 1999.
11. Білінський Й.Й. Аналіз сучасних багатоелементних фотоприймальних пристроїв та оптикоелектронних методів і засобів на їх основі / Й.Й. Білінський // Вісник ВІП. – Вінниця : ВІП, 2005. – № 5. – С. 9–15.

References:

1. Neujmin, O.S. and Djachenko, S.M. (2010), «PZZ-matryci», *Visnyk NTUU «KPI». Radiotekhnika. Radioaparaturubuduvannja*, Vol. 41, pp. 186–188.
2. Gorshenin, O.Je., Puleko, I.V. and Mykluha, V.A. (2018), «Metodyka prognozuvannja pokaznykiv yakosti kosmichnyh optyko-elektronnyh znmkiv vydydymogo diapazonu hvyl'», *Visnyk ZhDTU*, No. 1 (81), ZhDTU, Zhytomyr, pp. 173–181.
3. Rjendal, U. and Makljejn, T. (2015), *Malye bespilotnye letatel'nye apparaty: teorija i praktika*, Tehnosfera, M., 312 p.
4. Procenko, M.M. (2012), «Analiz metodiv cyfrovoi' obrobky videozobrazhen' aparaturuju bezpilotnogo lital'nogo aparatu», *Visnyk ZhDTU*, Vol. 62 (3), ZhDTU, Zhytomyr, pp. 67–72.
5. Procenko, M.M. (2012), «Analiz struktury ta variantiv pobudovy bezpilotnyh aviacijnyh kompleksiv», *Visnyk ZhDTU*, Vol. 61 (2), ZhDTU, Zhytomyr, pp. 113–117.

6. Nosov, Ju.R. and Shylyn, V.A. (1976), *Poluprovodnykovye pribory s zarjadovoj svjaz'ju*, Sov. radio, M., 144 p.
7. Solodov, A.V. (1977), *Inzhenernyj spravochnik po kosmicheskoj tehnikе*, Voenizdat, M., 430 p.
8. Barba, D.F. (1982), *Pribory s zarjadovoj svjaz'ju*, Translated by English, Mir, M., 240 p.
9. Kies, R.Dzh., Kruze, P.V. and Patl, Je.G. (1985), *Fotopriemniki vidimogo IK diapazonov*, Translated by English, Radio i svjaz', M., 328 p.
10. Neizvestnyj, S.I. and Nikulin, O.Ju. (1999), «Pribory s zarjadovoj svjaz'ju. Ustrojstvo i osnovnye principy raboty», *Special'naja Tehnika*, Vol. 4.
11. Bilyns'ky, J.J. (2005), «Analiz suchasnyh bagatoelementnyh fotopryjmal'nyh prystroi'v ta optykoelektronnyh metodiv i zasobiv na i'h osnovi», *Visnyk VPI*, Vol. 5, VPI, Vinnycja, pp. 9–15.

Манойлов В'ячеслав Пилипович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка сигналів в радіотехнічних системах;
- пристрої НВЧ та антени.

E-mail: krt_mvp@ukr.net.

Дубина Олександр Федорович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка сигналів в радіотехнічних системах;
- цифрова обробка сигналів.

E-mail: Fedorovich_daf@ukr.net.

Мартинчук Петро Петрович – старший викладач кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- обробка сигналів в радіотехнічних системах;
- електро- та радіовимірювальні прилади.

E-mail: m_petro@ukr.net.

Полещук Іван Іванович – старший викладач кафедри біомедичної інженерії та телекомунікацій Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- передача сигналів в умовах дії завад;
- обробка сигналів в радіотехнічних системах.

E-mail: ivan_pol@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2019.