

2. Филатов Г. Развитие подвижных наземных комплексов оптико-электронных средств разведки СВ за рубежом / Г. Филатов, С. Якобсон, Н. Беглова // Зарубежное военное обозрение. – 2002. – № 1. – С. 17 – 19.
3. Колобродов В. Г. О пространственном разрешении космических ИК-систем дистанционного зондирования Земли // Космічна наука і технологія. – 1997. – Т.3. – № 5 – 6. – С. 55 – 59.
4. Diakides N. A., Bronzino J. D. Medical Infrared Imaging. – New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 452 p.
5. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 364 с.
6. Павлов А. В. Оптико-электронные приборы (основы теории и расчета). – М.: Энергия, 1974. – 360 с.

Надійшла до редакції
05 березня 2015 року

© Гордієнко В. І., 2015

УДК 621.384.3

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО НОРМОВАНОГО РАДІУСА РОЗСІЮВАННЯ ОБ’ЄКТИВА ТЕПЛОВІЗОРА

Колобродов В. Г., Балінський Є. Г., Пінчук Б. Ю.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна*

E-mail: thermo@ukr.net, pinchuk.brus@gmail.com

Дана стаття присвячена вирішенню проблеми визначення оптимального нормованого радіуса кружка розсіювання об’єктива тепловізора, використовуючи запропоновані критерії узгодження. На базі профілакторію НТУУ «КПІ» проведена оцінка впливу нормованого радіуса кружка розсіювання об’єктива тепловізора на якість тепловізійного зображення, за умови узгодження МПФ компонентів системи.

Було розглянуто два критерії узгодження за новим методом, що дозволив узагальнити та узгодити систему, при яких описані в статті об’єктиви, знаходяться в рівних умовах. Отримані результати показали, що нормований радіус першого критерію менший від другого майже втричі. При цьому, за другим критерієм якість отриманого зображення не погіршується, а затрати на компоненти значно менші.

***Ключові слова:** тепловізор, модуляційна передавальна функція, нормований радіус кружка розсіювання об’єктива.*

Вступ

Суттєвим кроком вперед в розвитку теплобачення стало використання неохолоджуваних мікроболометричних матриць [1,2]. Внаслідок чого в значній мірі збільшилася кількість різноманітних сфер, де застосовують тепловізори. Найактуальнішими ж областями їх застосування вважаються військова та медична. В свою чергу, дані галузі є пріоритетними для передових країн світу США, Франції, Китаю та інші.

Якість отриманого зображення залежить від просторової роздільної здатності, в основу якої покладено узгодження параметрів об’єктива та матричного приймача випромінювання (МПВ) [3].

Доволі малу кількість робіт присвячено даній проблемі. Розглянувши і проаналізувавши їх, можна сказати, що вони базуються на власних припущеннях, деяких критеріях та практичних дослідженнях. Майже кожна з цих робіт давала свої результати, які суттєво відрізняються між собою. В той же час в цих роботах недостатньою мірою розглядали проблему узгодження модуляційних передавальних функцій (МПФ) об'єктива і МПВ.

Постановка задачі

Дана стаття присвячена визначенню розміру кружка розсіювання об'єктива в залежності від розміру пікселя МПВ за умови узгодження МПФ компонентів системи. На основі запропонованих критеріїв буде визначено оптимальний нормований радіус кружка розсіювання об'єктива тепловізора.

Аналіз попередніх досліджень

Однією з важливих вимог проектування оптичної системи є узгодження кружка розсіювання об'єктива і розміру пікселя МПВ. В роботі [4] було розглянуто два випадки, які базуються на критерію Релея та його модифікації, яку запропонував Шаде. Для отримання найкращої якості отриманого зображення за їхніми висновками, обидва випадки в основному спираються на те, щоб один кружок розсіювання об'єктива розташовувався на двох пікселях.

В роботі [5] розглянуто вплив на якість зображення відношення між розміром пікселя і діаметром кружка розсіювання об'єктива та його розташуванням на МПВ. Рекомендовано, щоб розмір детектора був менший в порівнянні з кружком розсіювання об'єктива.

Окрім якості отриманого зображення, деякі роботи додатково ще враховують і точність визначення положення кружка розсіювання на МПВ. Було показано, що при гауссовій формі сигналу, дана умова досягається при значенні радіуса кружка розсіювання сигналу порядку 0,6 від розміру пікселя [6]. В іншій же статті [7], це досягається при розмірах кружка розсіювання, який трохи перевищує розміри пікселя. Згідно отриманим результатам оптимальний розмір радіуса розсіювання складає 0,3 – 0,35 від розміру пікселя МПВ [8].

Більшість статей спирається на те, щоб кружок розсіювання був набагато більшим від пікселя [4,5,7], деякі ж дотримуються умови при якій кружок розсіювання повинен бути приблизно рівним пікселю [6]. Але найбільш близькою до оптимальних результатів є робота [8], в якій теоретично і експериментально встановлено, що коли кружок розсіювання об'єктива повинен бути меншим за розмір пікселя. Даний висновок, був зроблений на основі розглянутих варіантів формування зображення системою «об'єктив – МПВ» [9].

Вихідні положення

Передавальну функцію можна застосовувати тільки для лінійних інваріантних систем. Тепловізори, які спостерігають об'єкти з невеликим температурним контрастом в межах обмеженого поля зору, можна вважати лінійними ін-

варіантними системами. Модуляційна передавальна функція таких систем визначається добутком МПФ її окремих елементів [3,9].

За таких умов МПФ тепловізора визначається як:

$$M_S(v_x) = M_O(v_x)M_{Ds}(v_x), \quad (1)$$

де $M_S(v_x)$ – МПФ системи «об’єктив – МПВ»; $M_O(v_x)$ – МПФ об’єктива; $M_{Ds}(v_x)$ – просторова МПФ матричного приймача випромінювання; v_x – просторова частота, mm^{-1} .

МПФ об’єктива будемо апроксимувати двома функціями [10]:

1. Для об’єктива, що має аберації:

$$M_{oa}(v_x) = \exp(-2\pi^2 r_o^2 v_x^2), \quad (2)$$

де r_o – радіус кружка розсіювання на рівні 0,607 від максимального значення функції розсіювання точки ФРТ.

2. Для об’єктива, що дифракційно обмежений [3]:

$$M_{od}(v_x) = 1 - r_E v_x, \quad (3)$$

$$r_E = 1.22\lambda \frac{f'_o}{D_p} = 1.22\lambda K, \quad (4)$$

де f'_o – фокусна відстань об’єктива; D_p – діаметр вхідної зіниці об’єктива; λ – довжина хвилі світла; K – діафрагмове число; r_E – радіус кружка Ейрі.

Одновимірна МПФ матричного приймача випромінювання з пікселями прямокутної форми апроксимується функцією:

$$M_{Ds}(v_x) = \text{sinc}(V_D v_x), \quad (5)$$

де V_D – відстань між сусідніми пікселями (період матриці) або розмір пікселя МПВ вздовж осі.

Таким чином, МПФ тепловізора залежить від радіуса кружка розсіювання і періоду матриці приймача випромінювання. Для досягнення високого просторового розділення тепловізора необхідно узгодити між собою дані параметри.

Критерії узгодження МПФ об’єктива і МПВ

Для узгодження МПФ об’єктива і приймача випромінювання пропонується два критерії [9]:

1. *Перший критерій*. Рівність значень МПФ об’єктива і МПВ на просторовій частоті Найквіста v_N , тобто коли виконується умова:

$$M_O(v_N) = M_{Ds}(v_N) = M_I, \quad (6)$$

$$v_x = v_N = \frac{1}{2V_D}, \quad (7)$$

де v_N – просторова частота Найквіста;

2. *Другий критерій*. Рівність значень МПФ об’єктива і МПВ на просторовій частоті v_x , тобто коли виконується умова:

$$M_O(v_x) = M_{Ds}(v_x) = M_{II}, \quad (8)$$

Пропонується узгоджувати аберації об'єктива і періоду МПФ кожного із критеріїв за новим критерієм:

$$M_{Sa}(v_x) = M_{Sd}(v_x), \quad (9)$$

В (9) записані МПФ тепловізорів з різними об'єктивами. Ця рівність розглядається для знаходження нормованого радіуса, при якому МПФ тепловізорів з різними об'єктивами однакова, тобто точка в якій перетинаються дві функції МПФ тепловізорів з різними об'єктивами. Даний критерій (9) дозволяє узгодити систему і визначити параметри, при яких об'єктиви (2) і (3) знаходяться в рівних умовах для їх порівняння. Ця можливість узагальнює (2) і (3) під єдиним поняттям об'єктив, тобто не залежно від типу об'єктива, ми отримуємо однакове значення нормованого радіуса та його МПФ. Це дозволить більш досконало порівнювати два критерії узгодження та знайти загальне значення нормованого радіуса.

Перший критерій узгодження

В [9] було використано умову (6) і (7), розв'язувалось окремо для кожного об'єктива рівність і при цьому були знайдені значення нормованого радіуса, які відрізняються один від одного, що унеможливило умову, при котрій можна було б порівняти критерії. Скористаємося умовою першого критерію (6), та підставимо (2), (3) і (5) в (9).

$$\begin{cases} M_{Soa} = \frac{2}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{2} \left(\frac{r_o}{V_D}\right)^2\right), \\ M_{Sod} = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{r_E}{V_D}\right) \end{cases}, \quad (10)$$

Введемо заміну для нормованого радіуса, перепишемо (10):

$$\frac{r_o}{V_D} = R_{n,o}; \quad \frac{r_E}{V_D} = R_{n,E}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} M_{Soa} = \frac{2}{\pi} \exp\left(-\frac{\pi^2}{2} (R_{n,o})^2\right), \\ M_{Sod} = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{2} R_{n,E}\right) \end{cases}, \quad (12)$$

Побудуємо графіки до (12) (рис. 1). В результаті побудови отримуємо точку перетину двох графіків, що є розв'язком системи (12). Дана точка – це результат, при якому для обох систем з об'єктивами (2) і (3) однакові МПФ та нормований радіус.

Розв'язавши дану систему (12), ми отримали значення нормованого радіуса за першим критерієм $R_n^I \approx 0.1$. В результаті узгодження системи за таким нормованим радіусом, отримали значення МПФ системи, що дорівнює $M_s^I \approx 0.6$.

Другий критерій узгодження

Основна відмінність критеріїв в тому, що за першим критерієм просторова частота V_x вже наперед задана (7). Дана просторова частота є максимальною і граничною просторовою частотою, на якій може працювати система. У другому ж критерії необхідно визначити робочу просторову частоту, яка не перевищуватиме (7).

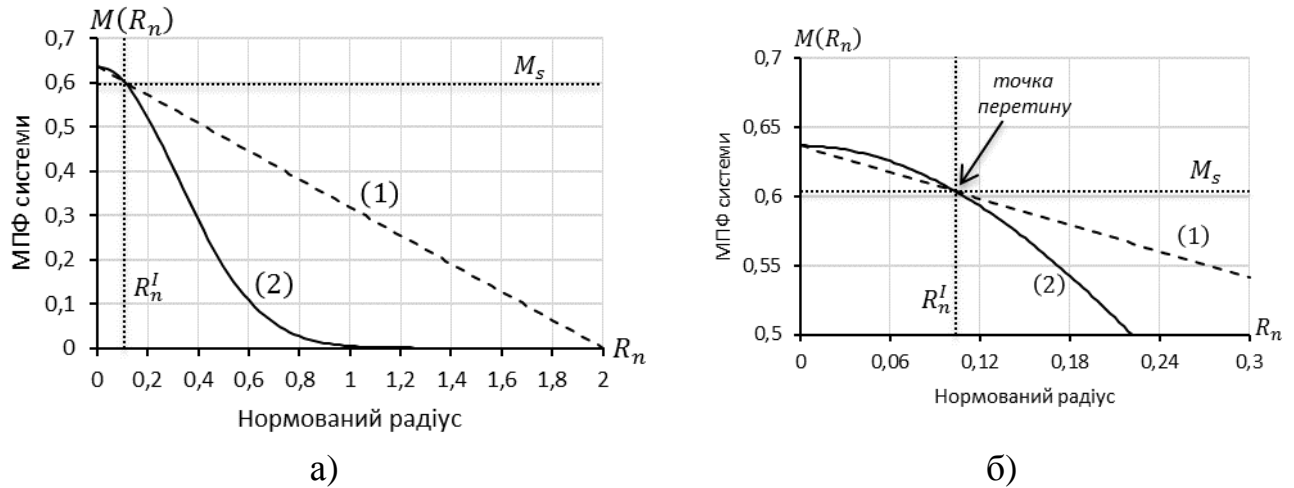


Рис. 1. а) Залежність МПФ системи від нормованого радіусу за 1-м критерієм; б) збільшений масштаб рис. а: 1 – система з об'єктивом (3); 2 – система з об'єктивом (2).

Для визначення просторової частоти скористаємося умовою другого критерію (8) і підставимо (2), (3) і (5) записавши як систему.

$$\begin{cases} \exp(-2\pi^2 r_o^2 v_x^2) = \text{sinc}(V_D v_x) \\ 1 - r_E v_x = \text{sinc}(V_D v_x) \end{cases} \quad (13)$$

У даному випадку необхідно використати радіус кружка розсіювання r_p , сформованої об'єктивом в фокальній площині, в якій розташована дискретна структура МПВ. Точка є зображенням точкового джерела випромінювання, форма якої в основному залежать від аберацій об'єктива. Розміри кружка розсіювання відповідають тому ефективному радіусу кружка розсіювання об'єктива, який використовують для обрахунку МПФ об'єктива.

Дані радіуси являються межами, в яких сфокусована найбільша кількість енергії та містить основний відсоток необхідної інформації про об'єкт.

Для отримання нормованого радіусу для другого критерію, скористаємося ефективними радіусами кружків розсіювання об'єктивів (2) і (3), записавши їх під узагальненим поняттям радіус кружка розсіювання r_p , яка формується на пікселі МПВ. У випадку (3) використовується дифракційна оптична система. А у випадку (2) – звичайна оптична система з аберациями, яка оптимізована до такого моменту, що настає дифракційне обмеження.

Зробимо заміну в (13), використавши узагальнене поняття r_p , де зразу отримуємо рівність, яка є розв'язком системи:

$$(1 - r_{\delta} v_x) \cdot \exp\left(2\pi^2 (r_{\delta} v_x)^2\right) - 1 = 0, \quad (14)$$

Розв'язавши рівняння (14), отримаємо три розв'язки, з яких після аналізу виявили, що два розв'язки технологічно досягти неможливо.

Для спрощення подальших висновків скористаємося заміною, в результаті маємо:

$$r_{\delta} v_x = k_r \approx 0.05, \quad (15)$$

Далі з (13) необхідно виразити просторову частоту, врахувавши (15):

$$\begin{cases} v_x = \frac{1}{V_D} \operatorname{sinc}^{-1}\left(\exp(-2\pi^2 k_r^2)\right) \\ v_x = \frac{1}{V_D} \operatorname{sinc}^{-1}(1 - k_r) \end{cases}, \quad (16)$$

Звідси, маючи всі необхідні дані аналогічно першому критерію, можемо знайти нормований радіус. Скористаємося отриманим результатом (16), та підставимо (2), (3) і (5) в (9).

$$\begin{cases} M_{Soa} = \exp\left(-2\pi^2 \left(\frac{r_o}{V_D}\right)^2 \left(\operatorname{sinc}^{-1}\left(\exp(-2\pi^2 k_r^2)\right)\right)^2\right) \cdot \exp(-2\pi^2 k_r^2) \\ M_{Sod} = \left(1 - \left(\frac{r_E}{V_D}\right) \operatorname{sinc}^{-1}(1 - k_r)\right) \cdot (1 - k_r) \end{cases}, \quad (17)$$

Введемо заміну для нормованого радіуса (11), перепишемо (17):

$$\begin{cases} M_{Soa} = \exp\left(-2\pi^2 (R_{n,o})^2 \left(\operatorname{sinc}^{-1}\left(\exp(-2\pi^2 k_r^2)\right)\right)^2\right) \cdot \exp(-2\pi^2 k_r^2) \\ M_{Sod} = \left(1 - R_{n,E} \operatorname{sinc}^{-1}(1 - k_r)\right) \cdot (1 - k_r) \end{cases}, \quad (18)$$

Побудуємо графіки МПФ для (18) (рис. 2).

Розв'язавши дану систему (18) ми отримали значення нормованого радіусу за другим критерієм $R_n'' \approx 0.29$.

В результаті узгодження системи за таким нормованим радіусом, отримали значення МПФ системи, що дорівнює $M_S'' \approx 0.9$.

Порівнявши отримані результати, маємо перевагу узгодження за другим критерієм на $\Delta M_S = M_S'' - M_S' \approx 0.3$.

Підсумки й аналіз

Визначимо просторову частоту для даного критерію подібно до (7). Для цього використаємо (16) підставивши в неї (15):

$$v_x \approx \frac{0.18}{V_D} \approx \frac{1}{5.58 \cdot V_D}. \quad (19)$$

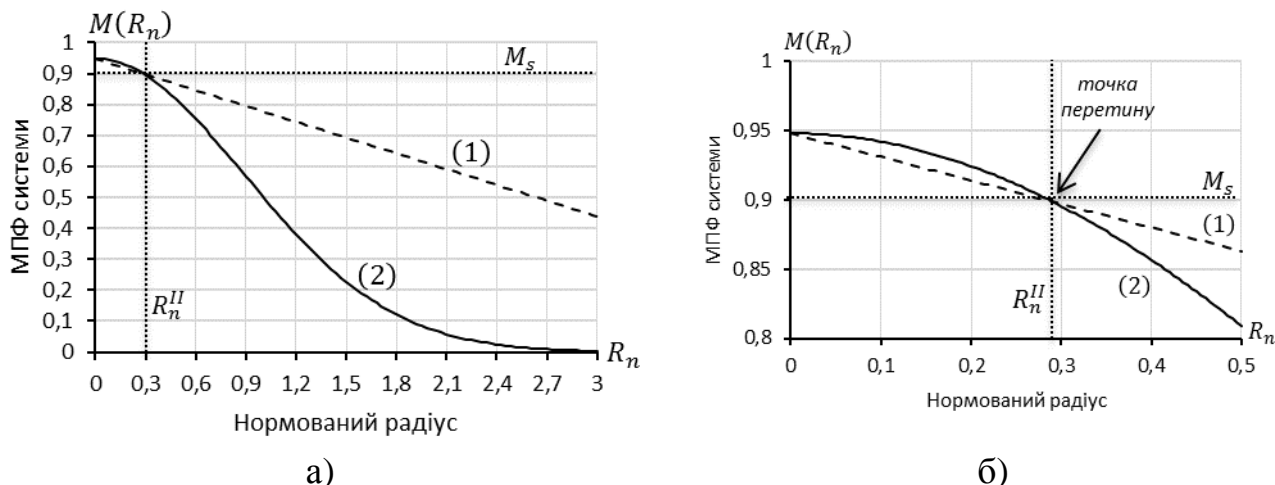


Рис. 2. а) Залежність МПФ системи від нормованого радіусу за 2-м критерієм; б) збільшений масштаб рис. а: 1 – система з об’єктивом (3); 2 – система з об’єктивом (2).

Як згадувалося раніше (7) просторова частота Найквіста є максимальною і граничною просторовою частотою. Отримавши нове значення просторової частоти для другого критерію (19) і порівнявши його з (7), виявили, що $V_x < V_N$, а це означає, що $v_x \in (0; v_N]$ задана робоча просторова частота входить в задані межі. А отже, тепловізор нормально працюватиме при даних умовах.

Аналізуючи отримані нормовані радіуси $R_n^I \approx 0.1$ і $R_n^{II} \approx 0.29$, де нормований радіус другого критерію менший від першого майже втричі. Можна зробити висновок, що використання другого критерію забезпечує значно менші затрати технологічні і економічні.

Висновки

Було розглянуто два критерії узгодження за новим методом відмінним від методу описаного в роботі [3]. Він дозволив узагальнити та узгодити систему, при яких об’єктиви (2) і (3) знаходяться в рівних умовах. Це дозволило визначити значення нормованого радіусу для кожного двох критеріїв.

Отримані результати $R_n^I \approx 0.1$ і $R_n^{II} \approx 0.29$ показали, що нормований радіус першого критерію менший від другого майже втричі. Різниця значень МПФ систем двох критеріїв при узгодженні становить $\Delta M_s \approx 0.3$ на користь другого критерію. А це свідчить про те, що затрати за другим критерієм значно менші, тобто можна використовувати об’єктив гіршої якості відносно того ж МПВ, при цьому не погіршуючи якість отриманого зображення згідно МПФ.

Просторова частота і МПФ системи тепловізора є основними показниками якості отриманого зображення. Але згідно (2), (3), (5) виникає певна проблема: при збільшенні просторової частоти (роздільної здатності) зменшується МПФ системи (контраст), і навпаки. Тому наступні дослідження будуть направлені на визначення оптимальної точки узгодження між МПФ і просторовою частотою для збалансування якості зображення.

Література

1. Тарасов М. М. Инфракрасные системы «смотрящего типа» / М. М. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
2. Хребтов И. А. Неохлаждаемые тепловые матричные приемники ИК излучения / И. А. Хребтов, В. Г. Маляров // Оптический журнал. – 1997. – № 6. – С. 3 – 17.
3. Колобродов В. Г. Узгодження роздільної здатності об'єктива і матричного приймача випромінювання медичного тепловізора / Ахмед Малік Лазім Аль-Мзіраві, Є. Г. Балінський, В. Г. Колобродов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – № 1. – С. 117 – 120.
4. Light D. A Basis for Estimating Digital Camera Parameters / Don Light. // American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. – 2004. – № 3. – С. 297 – 300.
5. Holst, Gerald C. Electro-optical imaging system performance / Gerald C. Holst. - 2nd ed. - Bellingham: SPIE OPTICAL ENGINEERING PRESS, 2000. - 438 p.
6. Федосеев В. И. Анализ оптических сигналов матричными фотоприемниками / В. И. Федосеев // Известия высших учебных заведений «Приборостроение». – 1984. – Т. XXVII, № 7. – С. 70 – 78.
7. Чусляева И. А. Алгоритм оптимального определения координат центра изображения для измерительного оптико-электронного прибора с матричным фотоприемником / И. А. Чусляева // Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение. – 1991. – № 3. – С. 82 – 87.
8. Кружилов И. С. О влиянии относительного размера изображения на погрешность определения координат / И. С. Кружилов // Компьютерная оптика. – 2009. – Том 33, № 2. – С. 210 – 215.
9. Аль-Мзіраві Ахмед Малік Лазім Методи визначення просторової роздільної здатності медичного тепловізора / Ахмед Малік Лазім Аль-Мзіраві, М. С. Колобродов, Б. Ю. Пінчук // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування. – 2014. – Вип. 47. – С. 149 – 156.
10. Колобродов В. Г. Проектування тепловізійних і телевізійних систем спостереження / В. Г. Колобродов, М. І. Лихоліт. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 364 с.

*Надійшла до редакції
02 лютого 2015 року*

© Колобродов В. Г., Балінський Є. Г., Пінчук Б. Ю., 2015.

УДК 615.471.03

**РОЗШИРЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ СУЧАСНИХ
УЛЬТРАЗВУКОВИХ ДІАГНОСТИЧНИХ СИСТЕМ**

Терещенко М. Ф., Румбешта В. О., Матюх Т. В.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
м. Київ, Україна*

Ультразвукове (УЗ) дослідження є одним із найпопулярніших методів діагностики. Головною характеристикою УЗ діагностичних систем є їх інформаційність. Проте наразі не всі потенційно можливі методи удосконалення УЗ візуалізації досліджені і знайдені найкращі технічні рішення для їх реалізації на практиці.

Метою роботи є дослідження методів ультразвукової діагностики шляхом моделювання взаємозв'язків між основними параметрами середовища і результатами УЗ дослідження з урахуванням можливостей використовуваних систем.

В результаті аналізу розроблені датчики, що дозволяють частково вирішити наведені недоліки ультразвукових систем.

Ключові слова: *ультразвукові діагностичні системи, акустичні зображення.*