УДК 519.6 doi: 10.20998/2220-4784.2020.06.08

Н. В. ЧЕРЕМСЬКА

ЗАСТОСУВАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ТЕОРІЇ НЕОДНОРІДНИХ ВИПАДКОВИХ ПОЛІВ ДО ПОШИРЕННЯ ХВИЛЬ В СТАТИСТИЧНО НЕОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

У статті розглянута задача про знаходження поля, яке створюється системою флуктуючих джерел, що знаходяться на екрані. Нехай кореляційна функція джерел не припускається сепарабельною та розподіл поля на екрані є неоднорідним випадковим полем першого рангу або є сумою сепарабельного поля та статистично неоднорідного поля першого рангу. Для знаходження розв’язку в наближенні параболічного рівняння запропоновано метод занурення у відповідний гільбертів простір, який дозволяє швидко та ефективно відшукувати статистичні характеристики розв’язку. Як приклад розглянуто вплив статистичної неоднорідності на функцію інтенсивності екрану, який світиться та має форму круглого диску. Отримана кореляційна функція поза екраном, яка містить інформацію про розмір та характер неоднорідностей випромінюючих джерел на екрані, що світиться. Проведено чисельний аналіз зображення для кореляційної функції у випадку, коли статистична неоднорідність середовища породжується наявністю в спектрі лише одного комплексного числа.

Ключові слова: кореляційна функція, статистична неоднорідність, гільбертов простір, скалярний добуток, дискретний спектр оператора.

Н. В. ЧЕРЕМСКАЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ТЕОРИИ НЕОДНОРОДНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ К РАСПРОСТРАНЕНИЮ ВОЛН В СТАТИСТИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

В статье рассмотрена задача о нахождении поля, создаваемого системой флуктуирующих источников, находящихся на экране. Пусть корреляционная функция источников не предполагается сепарабельной и распределение поля на экране является неоднородным случайным полем первого ранга или является суммой сепарабельного поля и статистически неоднородного поля первого ранга. Для нахождения решения в приближении параболического уравнения предложен метод погружения в соответствующее гильбертово пространство, который позволяет быстро и эффективно находить статистические характеристики решения. В качестве примера рассмотрено влияние статистической неоднородности на функцию интенсивности светящегося экрана, который имеет форму круглого диска. Получена корреляционная функция вне экрана, содержащая информацию о размере и характере неоднородностей излучающих источников на светящемся экране. Проведен численный анализ представления для корреляционной функции в случае, когда статистическая неоднородность среды порождается наличием в спектре лишь одного комплексного числа.

Ключевые слова: корреляционная функция, статистическая неоднородность, гильбертовом пространство, скалярное произведение, дискретный спектр оператора.

N. V. CHEREMSKAYA

APPLICATION OF THE CORRELATION THEORY OF INHOMOGENEOUS RANDOM FIELDS TO WAVE PROPAGATION IN STATISTICALLY HETEROGENEOUS ENVIRONMEN

The article deals with the problem of finding the field created by a system of fluctuating sources on the screen. Let the correlation function of the sources be not assumed to be separable and the field distribution on the screen is an inhomogeneous random field of the first rank or is the sum of a separable field and a statistically inhomogeneous field of the first rank. To find a solution in the approximation of a parabolic equation, a method of immersion in the corresponding Hilbert space is proposed, which allows one to quickly and efficiently find the statistical characteristics of the solution. As an example, the influence of statistical inhomogeneity on the intensity function of a luminous screen, which has the shape of a round disk, is considered. An off-screen correlation function is obtained, which contains information on the size and nature of inhomogeneities of emitting sources on a luminous screen. A numerical analysis of the representation for the correlation function is carried out in the case when the statistical heterogeneous of the environmen is generated by the presence of only one complex number in the spectrum.

Key words: correlation function, statistical inhomogeneity, Hilbert space, scalar product, discrete spectrum of an operator.

Вступ. У сучасній теорії розповсюдження електромагнітних та звукових хвиль в атмосфері в багатьох випадках доводиться звертати увагу на турбулентність, яка спричиняє флуктуації показника заломлення повітря. У деяких випадках турбулентність атмосфери спричиняє флуктуації параметрів хвиль, які розповсюджуються через неї (амплітуди, напрямки поширення, частоти, фази та інші). Ці ефекти є джерелами спотворень та помилок у системах зв’язку, локації, радіонавігації, системах управління. Особливо впливові флуктуації параметрів світлових хвиль, що набуває зараз особливого значення в зв’язку з розвитком оптичних квантових генераторів [1].

При моделюванні статистичних властивостей середовища (атмосфера, океан) виходять зазвичай із припущення, що ці властивості можуть бути описані однорідним та ізотропним полем або випадковим полем з однорідними приростами першого порядку. Структура відповідної кореляційної функції при цьому визначається на підставі розв’язку рівняння однорідної та ізотропної турбулентності, яке можна отримати усередненням рівняння гідродинаміки з використанням будь-якої гіпотези замикання [2, 3]. Флуктуації швидкості руху рідини (вітру) та температури у випадковому середовищі приводять до відповідних флуктуацій тиску або показника заломлення (діелектричної проникності). Тому задача розповсюдження звуку або електромагнітних хвиль стає стохастичною. З математичної точки зору аналіз поширення хвиль у випадковому середовищі зводиться до розв’язку хвильового рівняння (векторного або скалярного) з випадковими коефіцієнтами. У межах кореляційної теорії та з точки зору застосувань (зокрема, у теорії поширення хвиль у випадкових середовищах [4]) основними об'єктами теоретичного дослідження є математичне очікування та кореляційна функція розв'язку хвильового рівняння. Для розв'язку цієї задачі використовуються так званий "нечесний" метод.

Цей метод полягає у тому, що випадковість використовується при безпосередньому усередненні рівнянь із випадковими параметрами, які після усереднення не є замкненими та для замикання вимагають додаткових недоведених припущень про спеціальні статистичні властивості розв'язку. Ці припущення істотно спрощують задачу та дозволяють її розв'язати в явному вигляді. Багато результатів, які були отримані "нечесним" методом, достатньо добре узгоджуються з експериментальними даними, що може служити обґрунтуванням вірогідності припущення про ту або іншу статистичну властивість розв'язку [5].

Проте, моделі, які використовують однорідне та ізотропне поле або випадкове поле з однорідними приростами першого порядку непридатні для опису середовищ, які знаходяться в перехідному стані (наприклад, плазма випадковим чином змінює свій заряд), або коли електромагнітні хвилі поширюються поблизу земної кулі та статистична неоднорідність середовища порушується, а також при розсіянні електромагнітних хвиль на сліді від ракети, при розсіянні хвиль в атмосфері Венери та інших планет Сонячної системи. Розв'язки цих задач потребують відмови використання кореляційної теорії стаціонарних випадкових функцій або однорідних випадкових полів та залучення таких моделей кореляційних функцій, які б враховували статистичну нестаціонарність або неоднорідність.

У цій статті розглянута задача про знаходження поля, яке створюється системою флуктуючих джерел, що знаходяться на екрані. Нехай кореляційна функція джерел не припускається сепарабельною та розподіл поля на екрані є неоднорідним випадковим полем першого рангу або є сумою сепарабельного поля та статистично неоднорідного поля першого рангу. Для знаходження розв'язку в наближенні параболічного рівняння запропоновано метод занурення у відповідний гільбертів простір, який дозволяє швидко та ефективно відшукувати статистичні характеристики розв'язку. Як приклад розглянуто вплив статистичної неоднорідності на функцію інтенсивності екрану, який світиться та має форму круглого диску. Отримана кореляційна функція поза екраном, яка містить інформацію про розмір та характер неоднорідності випромінюючих джерел на екрані, що світиться.

Далі методом плавних збурень аналізуються флуктуації фази та амплітуди плоскої хвилі, яка поширюється в статистично неоднорідній атмосфері.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Проаналізуємо проходження хвилі крізь випадкове середовище або шар такого середовища. Якщо припустити, що товщина середовища або шару достатньо мала, наприклад, екран, що світиться, то можна скористатися наближенням тонкого екрану, ураховуючи, що поле поза екрану створюється системою флуктуючих джерел, які містяться на площині. Імовірнісні властивості джерел припускаються відомими.

У наближенні параболічного рівняння для комплексної амплітуди $A\left(\vec{r},z\right)$ (вісь z спрямована вздовж напрямку поширення хвилі) отримуємо задачу Коші

$$\left(\frac{\partial}{\partial z}+i\frac{1}{2k}\Delta_{\perp}\right)A\left(\vec{r},z\right)=0,\quad A\big|_{z=0}=A_0\left(\vec{r}\right), \qquad (1)$$

де $\vec{r}=\left(x,y\right)$, а $A_0\left(\vec{r}\right)$ випадкове поле з $MA_0\left(\vec{r}\right)\equiv 0$ та відомою кореляційною функцією. Ця задача у випадку, коли поле в площині z=0 є статистично однорідним, досліджена в [6, 7]. Разом із тим практичний інтерес викликають задачі, коли поле $A_0\left(\vec{r}\right)$ є статистично неоднорідним.

Випадок, коли кореляційна функція поля $A_0\left(\vec{r}\right)$ має вигляд $K_{A_0A_0}\left(\vec{r_1},\vec{r_2}\right)=K_0\left(\frac{\vec{r_1}+\vec{r_2}}{2}\right)K\left(\vec{r_2}-\vec{r_1}\right)$ (сепарабельна кореляційна функція) детально досліджено в [8, 9, 10, 11], де побудовано модель турбулентної атмосфери Венери.

Сепарабельність кореляційної функції використовується у випадку, коли $l_{A_0}\ll L$ де L – характерний масштаб змінювання дисперсії поля, середнього поля та коефіцієнту кореляції поля за аргументом $\frac{\vec{r_1}+\vec{r_2}}{2}$, а l_{A_0} – радіус кореляції поля за аргументом $\vec{r_2}-\vec{r_1}$, тобто статистичні характеристики поля плавно змінюються. Таким чином, кореляційна функція однорідного поля моделюється функцією, яка повільно змінюється.

Викладання основного матеріалу досліджень.

У цій статті розглядатиметься більш загальна модель статистично неоднорідного екрана, яка характеризується кореляційною функцією вигляду

$$\begin{aligned}&K_{A_0A_0}\left(\vec{r_1},\vec{r_2}\right)=\widetilde{K}_{AA}\left(\vec{r_1},\vec{r_2}\right)+\\&+\iiint_0^{\infty}\varphi\left(\vec{r_1}+\vec{\tau}\right)\overline{\varphi\left(\vec{r_2}+\vec{\tau}\right)}dV_{\tau}\end{aligned}, \qquad (2)$$

де $\widetilde{K}_{AA}\left(\vec{r_1},\vec{r_2}\right)$ сепарабельна кореляційна функція.

Це зображення відповідає випадковому полю на екрані, що є сумою сепарабельного поля та неоднорідного випадкового поля першого рангу, у якого істотно змінюється радіус кореляції на відстані l_{A_0}. Для з'ясування фізичного змісту сепарабельності кореляційної функції та для з'ясування фізичних можливостей моделей статистично неоднорідних полів, які вивчаються в статті, розглянемо випадкове поле $A_0\left(\vec{r}\right)$, яке створене системою некорельованих статистично неоднорідних джерел:

$$A_0\left(\vec{r}\right)=\sum_{k=1}^{n}A_k\left(\vec{r}\right),\qquad A_k\left(\vec{r}\right)=a_k\left(\vec{r}\right)\xi_k\left(\vec{r}\right),\tag{3}$$

де $a_k\left(\vec{r}\right)$ детерміновані функції, $\xi_k\left(\vec{r}\right)$ некорельовані статистично неоднорідні поля першого рангу [12].

Нехай спочатку джерела мають однаковий закон спадання, тобто $a_k\left(\vec{r}\right)=C_k e^{\vec{\alpha}\vec{r}}$, а $\xi_k\left(\vec{r}\right)$ статистично однорідне поле, тоді

$$K_{A_0A_0}\left(\vec{r_1},\vec{r_2}\right)=F\left(\frac{\vec{r_1}+\vec{r_2}}{2}\right)\widetilde{K_{A_0A_0}}\left(\vec{r_2}-\vec{r_1}\right),\tag{4}$$

тобто кореляційна функція задовольняє умові сепарабельності.

Таким чином, сепарабельність кореляційної функції відповідає не тільки плавності просторового або часового змінювання статистичних неоднорідностей на масштабі кореляції, але означає й некорельованість статистично неоднорідних полів, які мають однакові закони змінювання інтенсивності виду.

Модель (2), яка вивчається в цій статті, не припускає некорельованості джерел та збігу законів змінювання інтенсивностей та тому відповідає системі джерел з істотно відмінними інтенсивностями та законами їхнього змінювання в напрямку поширення хвилі в поперечний площині.

Повернемось до (1) та вкладемо $A_0\left(\vec{r}\right)$ до гільбертового простору H_{A_0}, тоді отримуємо допоміжну задачу у гільбертовому просторі

$$\left(\frac{\partial}{\partial z}+i\frac{1}{2k}\Delta_f\right)\widehat{A\left(\vec{r},z\right)}=0,\quad \widehat{A}\Big|_{z=0}=\widehat{A_0\left(\vec{r}\right)},\tag{5}$$

$$K_{AA}\left(\vec{r_1},\vec{r_2},z\right)=\left\langle\widehat{A\left(\vec{r_1},z\right)},\widehat{A\left(\vec{r_2},z\right)}\right\rangle_{H_{A_0}},\tag{6}$$

де дужки $\langle\cdot,\cdot\rangle$ означають скалярний добуток у гільбертовому просторі H_{A_0}.

Розглянемо випадок еволюційно зображеного поля $\widehat{A_0\left(\vec{r}\right)}=e^{ixB_1+iyB_2}f_0$, $f_0\in H_{A_0}$, та $\left[B_1,B_2\right]=0$. Тоді розв'язок задачі Коші в цьому випадку набуває вигляду

$$\widehat{A\left(\vec{r},z\right)}=e^{\frac{i}{2k}\left(B_1^2+B_2^2\right)z+ixB_1+iyB_2}f_0.\tag{7}$$

Тоді для поперечної кореляційної функції

$$K_{AA}\left(\vec{r_1},\vec{r_2},z\right)=$$
$$=\left\langle e^{\frac{i}{2k}\left(B_1^2+B_2^2\right)z+ix_1B_1+iy_1B_2}f_0,e^{\frac{i}{2k}\left(B_1^2+B_2^2\right)z+ix_2B_1+iy_2B_2}f_0\right\rangle.\tag{8}$$

З (8) видно, що для статистично однорідного поля $\left(B_1=B_1^*,B_2=B_2^*\right)$ поперечна кореляційна функція не залежить від *z*.

У випадку, якщо розв'язок параболічного рівняння обмежений для всіх x_1 та y_1, то оператори B_1 та B_2 є подібними до самоспряжених

$$K_{AA}\left(\vec{r_1},\vec{r_2},z\right)=$$
$$=\left\langle C^*Ce^{\frac{i}{2k}\left(\tilde{B}_1^2+\tilde{B}_2^2\right)z+ix_1\tilde{B}_1+iy_1\tilde{B}_2}\tilde{f}_0,e^{\frac{i}{2k}\left(\tilde{B}_1^2+\tilde{B}_2^2\right)z+ix_2\tilde{B}_1+iy_2\tilde{B}_2}\tilde{f}_0\right\rangle,\tag{9}$$

де $\tilde{B}_j$ самоспряжені оператори, а C оператор, який здійснює подібність.

Надалі для спрощення обмежимось випадком коли $A_0\left(\vec{r}\right)=A_0\left(x\right)$, тобто не залежить від *y*. Нехай $A_0\left(x\right)\equiv 0$ при $x<0$ та $A_0\left(x\right)=e^{iB_1x}f_0$ при $x\geq 0$. Використовуючи (8) для $K_{AA}\left(x_1,x_2,z\right)$ отримуємо вираз

$$K_{AA}\left(x_1,x_2,z\right)=$$
$$=\frac{k}{4z}\int_0^\infty\int_0^\infty e^{-\frac{ik}{2z}\left[\left(x_1-\xi\right)^2-\left(x_2-\eta\right)^2\right]}\left\langle e^{i\xi B_1}f_0,e^{i\eta B_1}f_0\right\rangle d\xi d\eta.\tag{10}$$

Тоді у випадку дискретного спектру оператора B_1, коли дані при $z=0$ є процесом Барі-Ріса [13], для кореляційної функції $K_{AA}\left(x_1,x_2,z\right)$ отримуємо зображення

$$K_{AA}\left(x_1,x_2,z\right)=\frac{k}{4z}\sum_{k=1}^{\infty}\left|C_k\right|^2\Phi_k\left(z,x_1\right)\overline{\Phi_k\left(z,x_2\right)},\tag{11}$$

$$\text{де }\Phi_k\left(z,x\right)=\int_0^\infty e^{-\frac{ik}{2z}\left(x-u\right)^2}e^{iu\lambda_k}du.\tag{12}$$

У випадку дискретного спектру оператора B_1, коли $e^{iB_1x}f_0$ не є процесом Барі-Ріса, також можна отримати вираз для кореляційної функції.

Чисельний аналіз зображення для кореляційної функції

$$K_{AA}\left(x,x,z\right)=\frac{k}{4z\beta_1^2}\left|\int_0^\infty e^{\frac{ik}{2z}\left(x-u\right)^2+i\left(\alpha_1+i\frac{\beta_1^2}{2}\right)u}du\right|^2\tag{13}$$

у випадку, коли статистична неоднорідність середовища породжується наявністю в спектрі лише одного комплексного числа, показує, що залежність (13) від x при різних (але фіксованих) значеннях решти параметрів має монотонно спадаючий характер (рис. 1), однак, ця монотонність порушується, якщо розглядати сімейства кривих, змінюючи α,β,z,k.

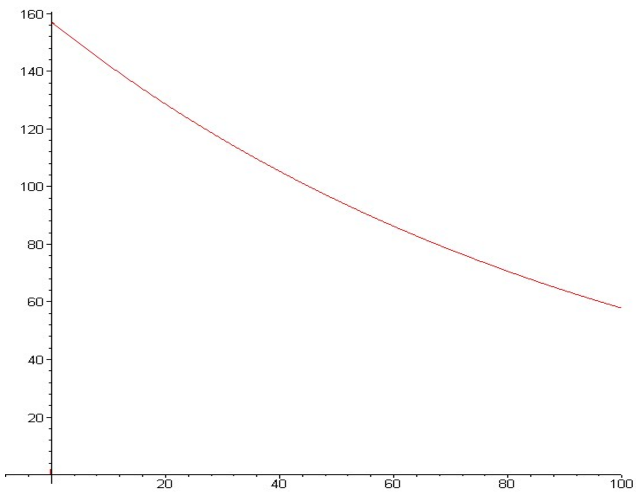

Рис. 1. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від x при $\alpha_1 = 1$, $u = 100000; z = 0,01; \beta_1 = 1; k = 10^5$

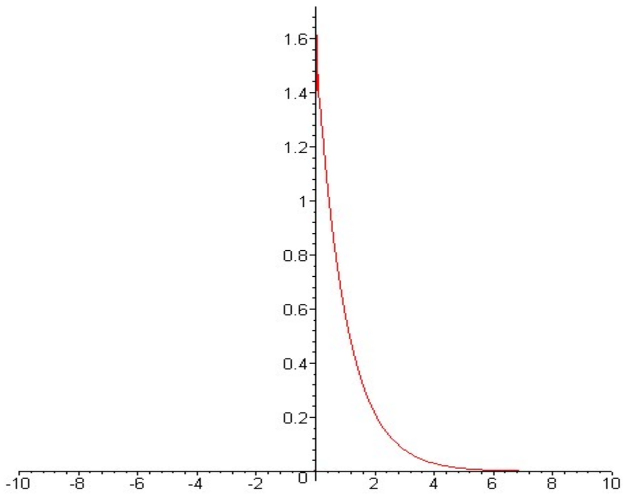

Рис. 2. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від x при $u = 100000; z = 1; \alpha_1 = 10; \beta_1 = 1; k = 10^5$

При цьому з’являються осциляції зі спадаючою обвідною (рис. 2–7).

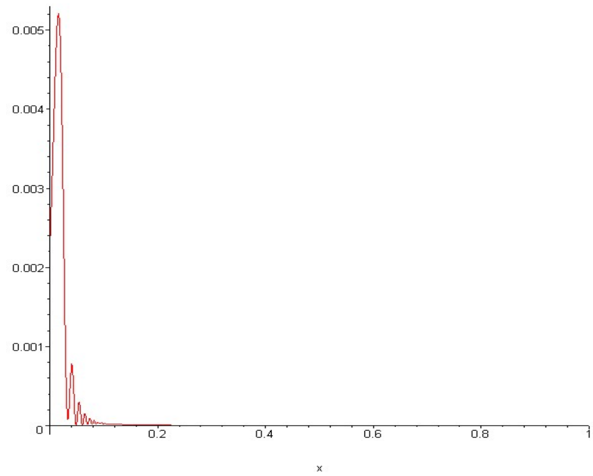

Рис. 3. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від x при $u = 100000; z = 10; \alpha_1 = 1; \beta_1 = 10; k = 10^5$

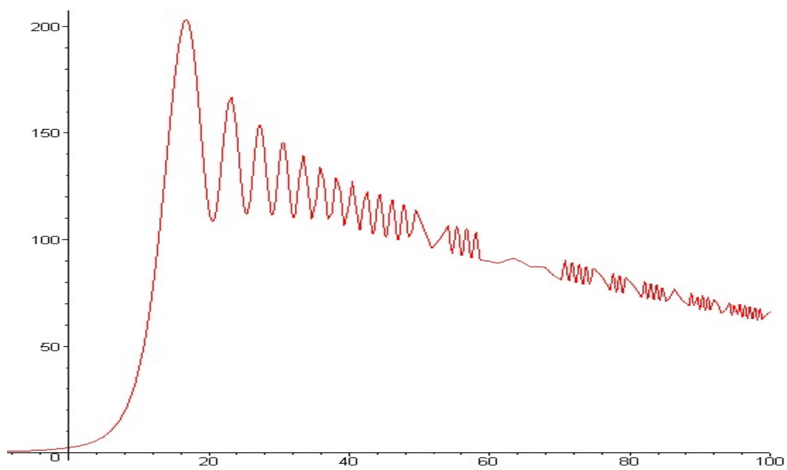

Рис. 4. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від x при $u = 100000; z = 0,01; \alpha_1 = 1; \beta_1 = 0,1; k = 10^{-3}$

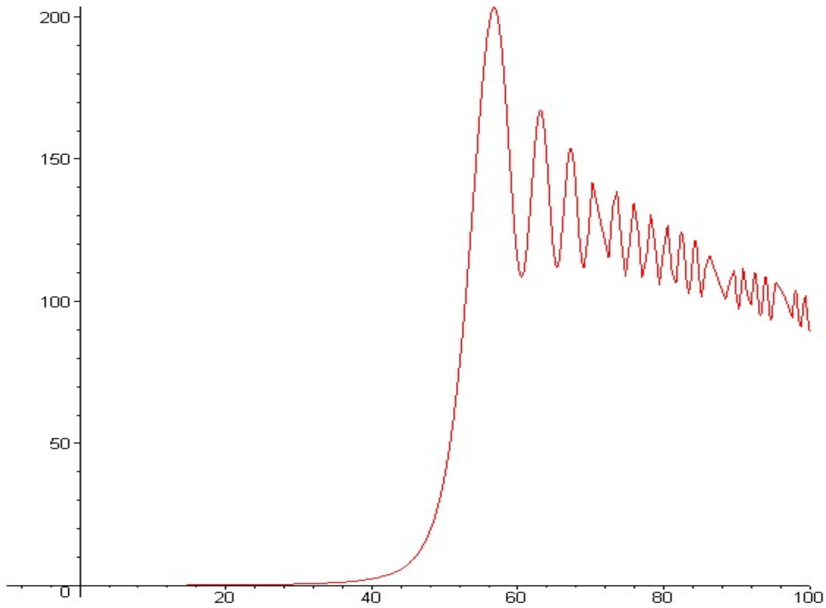

Рис. 5. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від x при $u=100000; z=0,01; \alpha_1=5; \beta_1=0,1; k=10^{-3}$

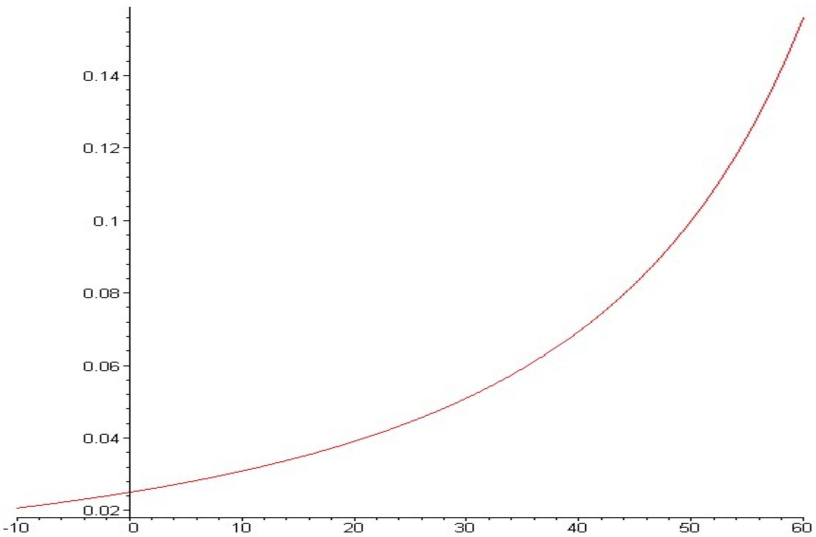

Рис. 6. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від x при $u=100000; z=0,01; \alpha_1=10; \beta_1=0,1; k=10^{-3}$

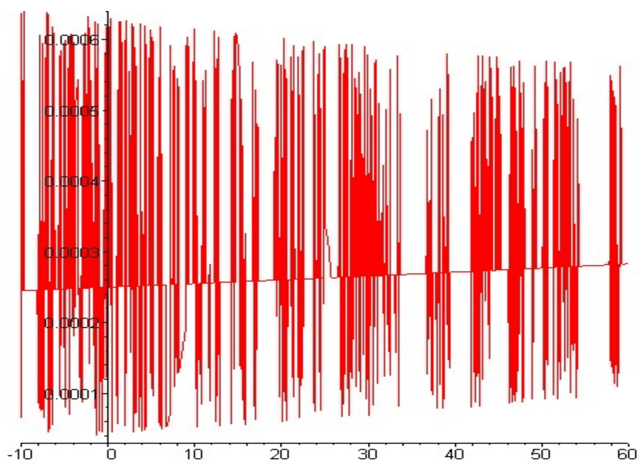

Рис. 7. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від x при $u=100000; z=0,01; \alpha_1=100; \beta_1=0,1; k=10^{-3}$.

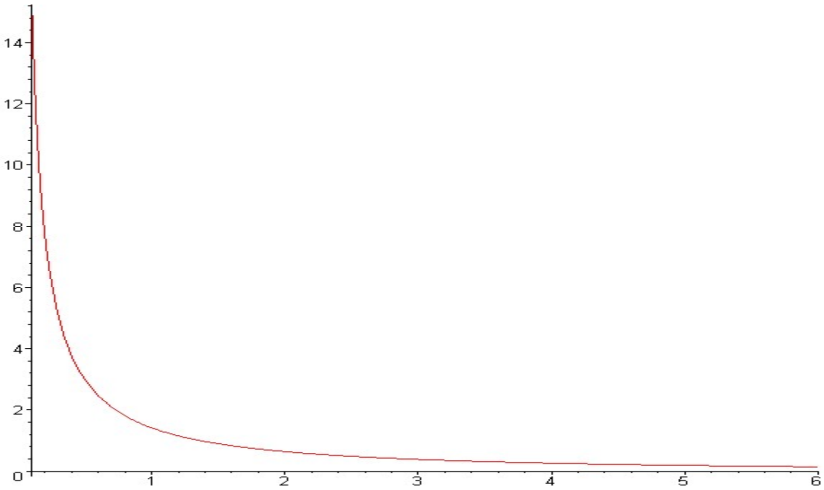

Рис.8. Залежність функції $K_{AA}(x,x,z)$ від β_1 при $u=100000; x=0{,}1; \alpha_1=1; k=10^5$; $z=0{,}1$.

Залежність від β при фіксованих, але різних значеннях решти параметрів має швидко спадаючий монотонний характер (рис. 8). Це цілком природно, через те що розглядається модель середовища, яка має властивість асимптотичного затухання.

З (2) та (10) витікає, що в загальному випадку

$$K_{AA}(x_1,x_2,z)=\frac{k}{4z}\int_0^\infty\int_0^\infty \Phi(z,x_1,\tau)\overline{\Phi(z,x_2,\tau)}d\tau+K^0_{AA}(x_1,x_2,z),$$

де $\Phi(z,x_1,u)=\int_0^\infty e^{-\frac{ik}{2z}(x_1-u)^2}\varphi(u+\tau)d\tau$, $K^0_{AA}(x_1,x_2,z)$ відповідає сепарабельної кореляційної функції, а вираз для $\varphi(u)$ отримано у [12].

Висновки та перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

Моделі нестаціонарних функцій, які отримано в статті, дозволяють урахувати статистичну неоднорідність середовища, наприклад, при дослідженні поширення електромагнітних хвиль поблизу межі випадкового середовища.

Модельні зображення для кореляційної функції можна отримати для часткових випадків спектру нестаціонарних випадкових функцій, зокрема, коли коли B_1 вольтеррів оператор, та побудувати відповідні дійснозначні кореляційні функції, які містять інформацію про комплексний спектр.

Такий вигляд кореляційної функції відповідає, наприклад, або врахуванню впливу області півтіні на структуру випадкового поля на екрані, або врахуванню статистичних нерівностей краю екрану, або присутності статистичної неоднорідності системи випромінювачей.

Ці зображення для кореляційної функції комплексної амплітуди можна використати, зокрема, для побудови моделей різноманітних статистично неоднорідних екранів. Таким чином, розглядаючи завдання, подібні наведеним в даній статті, ми підвищимо зацікавленість і мотивацію майбутніх фахівців до навчання [14–23].

Список літератури

1. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики / М.: Наука, 1985. – 336с.
2. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидродинамика I ч. / М.: Наука, 1965. – 640 с.
3. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидродинамика II ч / М.: Наука, 1967. – 720 с.
4. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / М.: Наука, 1967. – 548с.
5. Келлер Д.Б. Распространение волн в случайных средах. Гидродинамическая неустойчивость / М.: Мир, 1964, – С.265-288.
6. Мініков А.О., Тирнов О.Ф., Статистична радіофізика / Харків: Факт, 2003. – 528с.
7. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. II ч. Случайные поля / М.: Наука, 1978. – 464с.
8. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах т.1 / М.: Мир, 1981. – 279с.
9. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах т.2 / М.: Мир, 1981. – 317с.
10. Ishimaru Akira A New Approach to the Problem of Wave Fluctuations in Smoothly Varying Turbulence // IEEE Trans., Vol. AP-21, №1, 1973, p.47-53.
11. Woo R., Ishimaru A. Effects of Turbulence in a Planetary Atmosphere on Radio Occultation // IEEE Trans., vol. AP-22, №4, 1974 pp 566-573.
12. Шаронова Н.В., Черемская Н.В. Корреляционная теория одного класса неоднородных случайных полей // Вестник Херсонского технического университета.– 2004. – №1(19). – С.343-348.
13. Гохберг И.Ц., Крейн М.Г. Введение в теорию линейных несамосопряженных операторов / М., 1965. – 448с.
14. Пріщенко О.П., Черногор Т.Т., Бухкало С.І. Деякі особливості проведення кореляціійного аналізу Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я: тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019, 15-17 травня 2019 р.: у 4 ч. Ч. II. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – с.320.
15. Бухкало С.І. Деякі моделі процесів хімічного спінювання вторинного поліетилену // Вісник НТУ «ХПІ». Х.: НТУ «ХПІ». 2017. № 18 (1240). – С. 35–45.
16. Говоров П.П., Бухкало С.І., Кіндінова А.К., Говорова К.В. Енергоефективна система знезараження води на основі світлодіодних джерел світла. Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2020. – № 5(1359). С. 19–25.

17. Бухкало С.І. Моделі енергетичного міксу для утилізації полімерної частки ТПВ // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ». 2016. – № 19 (1191). – с. 23–32.
18. Бухкало С.І. Визначення прикладів технологій дослідження у наукових роботах студентів. III міжн. конф. студентів та аспірантів «Сучасні технології харчових виробництв», 14–15 2020, Дніпро, Д.,: Ліра, ДНУ ім. Олеся Гончара, с. 42–46.
19. Бухкало С.І. Агейчева А.О., Агейчева О.О., Бабаш Л.В., Пшичкіна Н.Г. Методичні аспекти реформування дистанційного навчання в системі вищої освіти. Вісник НТУ «ХПІ». Х.: НТУ «ХПІ», 2020. № 5(1359). С. 3–10.
20. Kapustenko P., Klemeš J.J., Arsenyeva O., Bukhkalo S., Fedorenko O., Kusakov S. The Utilisation of Waste Heat from Exhaust Gases after Drying Process in Plate Heat Exchanger. Chemical Engineering Transactions, 81, 589-594.
21. Bilous O., Sytnik N., Bukhkalo S., Glukhykh V., Sabadosh G., Natarov V., Yarmysh N., Zakharkiv S., Kravchenko T., & Mazaeva V. Development of a food antioxidant complex of plant origin. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, (2019), 6(11(102)), 66–73.
22. Бухкало С.І. Синергетичні моделі для екологічнобезпечних процесів ідентифікації-класифікації вторинних полімерів. Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2018. – № 18(1294). – С. 36–44,
23. Bukhkalo, S.I., Klemeš, J.J., Tovazhnyanskyy, L.L., Kapustenko, P.O., Arsenyeva, O.P., & Perevertaylenko, O.Yu. 2018. Eco-friendly synergetic processes of municipal solid waste polymer utilization. Chemical engineering transactions, 70, 2018, 2047–2052.

References (transliterated)

1. Vorontsov M.A., Shmal'gauzen V.I. Printsipy adaptivnoy optiki / M.: Nauka, 1985. – 336 p.
2. Monin A.S., Yaglom A.M. Statisticheskaya gidrodinamika I ch. / M.: Nauka, 1965. – 640 p.
3. Monin A.S., Yaglom A.M. Statisticheskaya gidrodinamika II ch / M.: Nauka, 1967. – 720 p.
4. Tatarskiy V.I. Rasprostraneniye voln v turbulentnoy atmosfere / M.: Nauka, 1967. – 548 p.
5. Keller D.B. Rasprostraneniye voln v sluchaynykh sredakh. Gidrodinamicheskaya neustoychivost' / M.: Mir, 1964, – pp..265-288.
6. Mínikov A.O., Tirnov O.F., Statistichna radíofízika / Kharkív: Fakt, 2003. – 528 p.
7. Rytov S.M., Kravtsov YU.A., Tatarskiy V.I. Vvedeniye v statisticheskuyu radiofiziku. II ch. Sluchaynyye polya / M.: Nauka, 1978. – 464 p.
8. Isimaru A. Rasprostraneniye i rasseyaniye voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh t.1 / M.: Mir, 1981. – 279 p.
9. Isimaru A. Rasprostraneniye i rasseyaniye voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh t.2 / M.: Mir, 1981. – 317 p.
10. Ishimaru Akira A New Approach to the Problem of Wave Fluctuations in Smoothly Varying Turbulence // IEEE Trans., Vol. AP-21, No. 1, 1973, pp .47–53.
11. Woo R., Ishimaru A. Effects of Turbulence in a Planetary Atmosphere on Radio Occultation // IEEE Trans., vol. AP-22, No. 4, 1974, pp. 566–573.
12. Sharonova N.V., Cheremskaya N.V. Korrelyatsionnaya teoriya odnogo klassa neodnorodnykh sluchaynykh poley // Vestnik Khersonskogo tekhnicheskogo universiteta. 2004. – No. 1(19), – pp. 343-348.
13. Gokhberg I.TS., Kreyn M.G. Vvedeniye v teoriyu lineynykh nesamosopryazhennykh operatorov / M., 1965. – 448c.Borisenko A. I., Tarapov I. E. Vektornyj analiz i nachala tenzornogo ischisleniya : ucheb. posobie dlya vuzov. – Har'kov: Vishcha shk.; Izd-vo pri Har'k. gos. un-te, 1986. – 216 p.
14. Prishhenko O.P., Chernogor T.T., Bukhkalo S.I. Dejaki osoblivosti provedennja koreljacijnogo analizu Informacijni tehnologiї: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja: tezi dopovidej XXVII mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferencії MicroCAD-2019, 15-17 travnja 2019.: Ch. II. / za red. prof. Sokola Є.I. – Kh: NTU «KhPI». – p.320.
15. Bukhkalo S.I. Dejaki modeli procesiv himichnogo spinjuvannja vtorinnogo polietilenu // Visnik NTU «KhPI». Kh.: NTU «KhPI». 2017. No. 18 (1240), pp. 35–45.
16. Govorov P.P., Bukhkalo S.I., Kindinova A.K., Govorova K.V. Energoefektivna sistema znezarazhennja vodi na osnovi svitlodiodnih dzherel svitla. Visnik NTU «KhPI». – Kh.: NTU «KhPI», 2020. – No. 5(1359), – pp. 19–25.
17. Bukhkalo S.I. Modeli energetichnogo miksu dlja utilizacії polimernoї chastki TPV // Visnik NTU «KhPI». – Kh.: NTU «KhPI». 2016. – No. 19 (1191), – pp. 23–32.
18. Bukhkalo S.I. Viznachennja prikladiv tehnologij doslidzhennja u naukovih robotah studentiv. III mizhn. konf. studentiv ta aspirantiv «Suchasni tehnologiї harchovih virobnictv», 14–15 2020, Dnipro, D.,: Lira, DNU im. Olesja Gonchara, – pp. 42–46.
19. Bukhkalo S.I. Agejcheva A.O., Agejcheva O.O., Babash L.V., Pshichkina N.G. Metodichni aspekti reformuvannja distancijnogo navchannja v sistemi vishhoї osviti. Visnik NTU «KhPI». Kh.: NTU «KhPI», 2020. No. 5, – pp. 3–10.
20. Kapustenko P., Klemeš J.J., Arsenyeva O., Bukhkalo S., Fedorenko O., Kusakov S. The Utilisation of Waste Heat from Exhaust Gases after Drying Process in Plate Heat Exchanger. Chemical Engineering Transactions, 81, 589-594.
21. Bilous O., Sytnik N., Bukhkalo S., Glukhykh V., Sabadosh G., Natarov V., Yarmysh N., Zakharkiv S., Kravchenko T., & Mazaeva V. Development of a food antioxidant complex of plant origin. Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies, (2019), 6(11(102)), 66–73.
22. Bukhkalo S.I. Sinergetichni modeli dlja ekologichnobezpechnih procesiv identifikacії-klasifikacії vtorinnih polimeriv. Visnik NTU «KhPI». – Kh.: NTU «KhPI», 2018. – No. 18(1294), – pp. 36–44,
23. Bukhkalo, S.I., Klemeš, J.J., Tovazhnyanskyy, L.L., Kapustenko, P.O., Arsenyeva, O.P., & Perevertaylenko, O.Yu. 2018. Eco-friendly synergetic processes of municipal solid waste polymer utilization. Chemical engineering transactions, 70, 2018, 2047–2052.

Надійшла (received) 19.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Черемська Надія Валентинівна (Черемская Надежда Валентиновна, Cheremskaya Nadezhda Valentinovna) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; тел.: (050) 225-15-44; e-mail: cheremskaya66@gmail.com