



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **153180** (13) **U**
(51) МПК (2023.01)
G01S 13/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

| | |
|---|--|
| <p>(21) Номер заявки: u 2022 03872</p> <p>(22) Дата подання заявки: 18.10.2022</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 01.06.2023</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 31.05.2023, Бюл.№ 22</p> | <p>(72) Винахідник(и): Коплик Ігор Володимирович (UA), Марченко Анна Вікторівна (UA), Дрозденко Олексій Олександрович (UA), Сухаревський Олег Ілліч (UA), Василець Віталій Олексійович (UA), Лещенко Сергій Петрович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, вул. Римського-Корсакова, буд. 2, м. Суми, 40007 (UA)</p> <p>(74) Представник: ГУДКОВ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ</p> |
|---|--|

(54) СПОСІБ НАКОПИЧЕННЯ ПАЧКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ДАЛЬНІСНИХ ПОРТРЕТІВ ПРИ ШИРОКОСМУГОВОМУ ЗОНДУВАННІ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ, ЩО РУХАЮТЬСЯ, ДЛЯ НЕКООПЕРАТИВНИХ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

(57) Реферат:

Спосіб накопичення пачки радіолокаційних дальнісних портретів при широкосмуговому зондуванні повітряних цілей, що рухаються, для некооперативних методів розпізнавання повітряних об'єктів, включає випромінювання радіолокаційною станцією (РЛС) широкосмугових сигналів з роздільною здатністю менше одного метра в бік повітряних об'єктів, отримання відображених сигналів, які запам'ятовуються в пам'яті програмного забезпечення РЛС, їх обробку, оцінювання з урахуванням радіальної складової повітряної цілі у відображених сигналах та накопичення повної пачки дальнісних портретів.

UA 153180 U

Корисна модель, що пропонується, належить до галузі радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей в цивільних та військових сферах і призначена для визначення класу (типу) повітряних об'єктів, що рухаються. Некооперативні методи радіолокаційного розпізнавання полягають у визначення класу (типу) рухомих повітряних цілей, екіпажі яких не зацікавлені у вирішенні завдання розпізнавання, на основі аналізу радіолокаційних сигналів, відбитих від елементів корпусу повітряного судна.

Відомий спосіб ідентифікації повітряних об'єктів за структурою дальнісного портрета на основі аналізу надширосмугового лінійно-частотного модульованого зонduючого сигналу. Підвищення якості розпізнавання досягається за рахунок того, що порівняння дальнісного портрета з еталонним здійснюється з урахуванням амплітудно-фазового розподілу інтенсивності блискучих точок за дальністю методом квадратурної згортки в оптимальному накопичувачі, визначенням максимального значення результату згортки та відхилення від симетрії [1]. Підвищення достовірності ідентифікації повітряних об'єктів досягається за рахунок оптимального накопичення та визначення усередненої відмінності дальнісного портрета з урахуванням шумів від еталонного портрета.

Недоліком відомого способу є те, що при ідентифікації повітряних об'єктів виконується накопичення усередненої відмінності дальнісного портрета повітряних об'єктів.

В основу корисної моделі поставлена задача підвищення якості розпізнавання повітряних рухомих об'єктів за рахунок досягнення необхідного рівня відношення сигнал-шум для якісного розпізнавання об'єктів.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі накопичення пачки радіолокаційних дальнісних портретів при широкосмуговому зондуванні повітряних цілей, що рухаються, для некооперативних методів розпізнавання повітряних об'єктів, що включає випромінювання радіолокаційною станцією (РЛС) широкосмугових сигналів з роздільною здатністю менше одного метра в бік повітряних об'єктів, отримання відображених сигналів, які запам'ятовуються в пам'яті програмного забезпечення РЛС, їх обробку, оцінювання з урахуванням радіальної складової повітряної цілі у відображених сигналах та накопичення повної пачки дальнісних портретів.

При порівнянні повних дальнісних радіолокаційних портретів об'єктів з повними еталонними дальнісними радіолокаційними портретами з врахуванням радіальної складової швидкості підвищується якість розпізнавання повітряних рухомих об'єктів за рахунок досягнення необхідного рівня відношення сигнал-шум.

Для пояснення суті способу наводимо графіки та діаграми, де на фіг. 1 наведений зсув відліків у межах вікна, на фіг. 2 - показано пачку з десяти дальнісних портретів від моделі літака Tornado, фіг. 3 - результат накопичення дальнісних портретів за умови відсутності помилки вимірювання радіальної швидкості $\delta_{vr}=0$, фіг. 4 - результат накопичення, якщо помилка виміру радіальної складової швидкості об'єкта $\delta_{vr}=100$ км/год., фіг. 5 - результат накопичення для помилки $\delta_{vr}=200$ км/год., фіг. 6 - результат накопичення, якщо вирівнювання дальнісних портретів взагалі не виконувалося, фіг. 7 - графік залежності для випадку $\delta_v=20$ км/год., фіг. 8 - графік залежності помилки вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта від ракурсу за умови $\delta_\phi = 2^\circ$ та швидкостей об'єкта: 200 км/год. (пунктирна лінія), 800 км/год. (штрихова лінія) та 1500 км/год. (суцільна лінія). Фіг. 9 - графік отриманої залежності σ_{vr} від ракурсу спостереження та різних швидкостей польоту об'єкта для випадку $\sigma_v = 20$ км/ч та $\sigma_\phi = 2^\circ$, фіг. 10 - діаграма залежності величини втрат від величини помилок вимірювання швидкості та курсу, фіг. 11 - діаграма залежності ймовірності правильного розпізнавання від величини помилок вимірювання швидкості та ракурсу цілей, фіг. 12 - Діаграми залежності кількості інформації розпізнавання від величини помилок вимірювання швидкості та ракурсу цілей.

Спосіб накопичення пачки радіолокаційних дальнісних портретів при широкосмуговому зондуванні повітряних об'єктів, що рухаються, для некооперативних методів розпізнавання повітряних об'єктів реалізується наступним чином.

На електронному обладнанні радіолокаційної станції встановлюють спеціальний програмний продукт, за допомогою якого проходить обробка сигналів. Радіолокаційна станція випромінює широкосмугові сигнали з роздільною здатністю менше одного метра. В разі отриманні відображеного сигналу останній запам'ятовується в пам'яті програмного продукту. Аналогічна процедура виконується для всіх відображених сигналів від рухомого об'єкта. При накопиченні пачки дальнісних портретів виконується вирівнювання по дальності, виходячи з оцінки радіальної складової швидкості об'єкта розпізнавання, отриманої за результатами або прямого вимірювання (імпульсно-доплерівських радіолокаційних станцій (РЛС)), або при траєкторній обробці (у когерентно-імпульсних РЛС). Вирівнювання дальнісних портретів можливе лише

через інтервали, рівні кроку дискретизації по дальності Δ_r . Враховуючи, що часи отримання окремих дальнісних портретів у пачці з M портретів t_1, t_2, \dots, t_m , виконується умова $(t_{i+1} - t_i) = 1/F_n$, (1)

де F_n – частота повторення зондуючих імпульсів.

5 Тоді число дискретів дальності, на яке повинен зміщуватися кожен i -й дальнісний портрет визначається

$$N_i = \text{int} \left(\frac{\hat{V}_r(t_i - t_1)}{\Delta_r} + 0,5 \right), \quad (2)$$

де int - функція виділення цілої частини числа, \hat{V}_r - оцінка радіальної швидкості об'єкта.

10 Оскільки розмір кроку дискретизації дальнісного портрета значно перевищує довжину хвилі, при вирівнюванні не вдається зберегти фазову структуру. Це унеможлиблює когерентне накопичення. Тому накопичення дальнісних портретів стає некогерентним.

При виконанні зсуву дальнісного портрета важливим є збереження структури шуму в межах вікна дальності. Для цього відліки, які виходять за межі вікна дальності, необхідно переносити на інший бік вікна, як це показано на фіг. 1.

15 Результат накопичення дальнісних портретів залежатиме від помилок вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта. Цю залежність ілюструють графіки на фіг. 2 - фіг. 6. На фіг. 2 показано пачку з десяти дальнісних портретів від моделі літака Tornado, який виконує політ на РЛС зі швидкістю 900 км/год. Частота повторення зондуючих широкосмугових сигналів 1 кГц, ширина спектра сигналу 200 МГц (роздільна здатність по дальності 0,75 м). Перший дальнісний портрет зображений на малюнку нижнім. На фіг. 3 наведено результат накопичення дальнісних портретів за умови відсутності помилки вимірювання радіальної швидкості $\delta_{vr}=0$. На фіг. 4 показаний результат накопичення, якщо помилка виміру радіальної складової швидкості об'єкта $\delta_{vr}=100$ км/год. Результат накопичення для помилки $\delta_{vr}=200$ км/год. показано на фіг. 5 На фіг. 6 показаний результат накопичення, якщо вирівнювання дальнісних портретів взагалі не виконувалося. На фіг. 7 показаний графік цієї залежності для випадку $\delta_v=20$ км/год. На фіг. 8 показаний графік залежності помилки вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта від ракурсу за умови $\delta_\varphi = 2^\circ$ та швидкостей об'єкта 200 км/год. (пунктирна лінія), 800 км/год. (штрихова лінія) та 1500 км/год. (суцільна лінія). Графік отриманої залежності σ_{vr} від ракурсу спостереження та різних швидкостей польоту об'єкта для випадку $\sigma_v=20$ км/ч та $\sigma_\varphi=2^\circ$ показаний на фіг. 9.

30 Наведені графіки показують, що наявність помилок виміру радіальної складової швидкості об'єкта призводить до спотворення форми накопиченого дальнісного портрета. Незалежно від знака помилки, спостерігається розширення окремих піків дальнісного портрета, що еквівалентно погіршенню роздільної здатності за дальністю або зменшення ширини спектра сигналу.

Числа, на осях ординат графіків накопичених сигналів показують, що зі збільшенням помилки вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта, амплітуда накопиченого дальнісного портрета зменшується. Отже, помилки вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта призводять до енергетичних втрат та зменшення відношення сигнал - шум.

40 У [2] наводяться результати моделювання впливу помилок траєкторних вимірювань на якість розпізнавання повітряних цілей у когерентно-імпульсних РЛС. У таких РЛС неможливий безпосередній вимір радіальної складової швидкості об'єкта з доплерівського зміщення частоти. Однак на етапі траєкторної обробки радіолокаційних сигналів у таких РЛС оцінюються значення швидкості V та напрямки польоту (курсу) об'єкта Θ . Це дозволяє оцінити поточний ракурс спостереження за об'єктом

$$\varphi = \beta - \theta, \quad (3)$$

де β - поточний виміряний азимут об'єкта.

Радіальна складова швидкості об'єкта розраховується як проекція вектора швидкості на лінію візування

$$50 \quad V_r = V \cos \varphi. \quad (4)$$

Значення швидкості та ракурсу спостереження об'єкта РЛС вимірює з помилками. Якщо помилка виміру швидкості δ_v , а помилка виміру ракурсу об'єкта δ_φ , то згідно з (4) помилка виміру радіальної швидкості визначається

$$\delta_{vr} = |V \cos \varphi - (V + \delta_v) \cos(\varphi + \delta_\varphi)|. \quad (5)$$

55 Якщо вимір ракурсу спостереження об'єкта робляться без помилок, тобто $\delta_\varphi = 0$, вираз (5) набуває вигляду

$$\delta_{vr} = |\delta_v \cos \varphi| \quad (6)$$

Відповідно до (6), помилка виміру радіальної складової швидкості залежить від ракурсу спостереження об'єкта. На фіг. 11 показаний графік цієї залежності для випадку $\delta_v = 20$ км/год.

Таким чином, якщо помилка вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта обумовлена лише помилками вимірювання повної швидкості, максимальне її значення відповідає польоту вздовж лінії візування, і дорівнює нулю при польоті цілі впоперек лінії візування.

Якщо $\delta_v = 0$, а $\delta_v \neq 0$, то вираз (5) набуває вигляду

$$\delta_{vr} = |V \cos \varphi - V \cos(\varphi + \delta_\varphi)| \quad (7)$$

Оскільки в загальному випадку величина δ_φ є малою і можна прийняти, що $\cos(\delta_\varphi) \approx 1$. Тоді можна записати

$$\delta_{vr} \approx |V \sin(\varphi) \sin(\delta_\varphi)| \quad (8)$$

Відповідно до (8), помилка вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта залежить від помилок вимірювання ракурсу, значення ракурсу та швидкості об'єкта. На фіг. 12 показаний графік залежності помилки вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта від ракурсу за умови $\delta_\varphi = 2^\circ$ та швидкостей об'єкта 200 км/год. (пунктирна лінія), 800 км/год. (штрихова лінія) та 1500 км/год. (суцільна лінія).

Таким чином, якщо помилка виміру радіальної швидкості обумовлена лише помилками виміру значення ракурсу об'єкта, її максимальне значення відповідає польоту об'єкта поперек лінії візування і істотно залежить від швидкості польоту. Зі збільшенням швидкості помилки зростають. При польоті вздовж лінії візування помилка дорівнює нулю.

Для визначення середньоквадратичного значення помилки вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта σ_{vr} від середньоквадратичних помилок вимірювання швидкості σ_v та σ_φ необхідно виконати усереднення даних за формулою (5). Графік отриманої залежності σ_{vr} від ракурсу спостереження та різних швидкостей польоту об'єкта для випадку $\sigma_v = 20$ км/ч та $\sigma_\varphi = 2^\circ$ показаний на фіг. 9.

Вплив помилок вимірювання радіальної складової швидкості об'єкта на якість розпізнавання радіолокації може бути оцінено тільки шляхом моделювання. Таке моделювання виконано [2]. Моделювалось розпізнавання 13 типів повітряних цілей, що здійснювали політ з крейсерськими швидкостями: літаки F-15, F-16, Tornado, Су-27, МіГ-21 та МіГ-29-950 км/год., літаки В-1В, Boeing 737, Airbus A320-900 км/год., літаки Ту-16, В-52-850 км/год., літак Ан-26 – 450 км/год., гелікоптер АН-64-250 км/год. Моделювалася робота РЛС, що випромінює сигнали із шириною спектра 200 МГц та частотою повторення 1 кГц. Час накопичення пачки дальнісних портретів 50 мс. За цей час моделювалося накопичення 50 окремих портретів.

Некогерентне накопичення здійснювалося з компенсацією усунення окремих дальнісних портретів відповідно (2). Необхідне для цього значення радіальної швидкості розраховувалося (4).

В результаті моделювання була оцінена величина енергетичних втрат $\Delta S_{v, \varphi}$ при некогерентному накопиченні, обумовлена наявністю помилок вимірювання швидкості та ракурсу. Енергетичні втрати оцінювалися як різниця між ставленням сигнал - шум накопичених дальнісних портретів без помилок вимірювань та їх наявності

$$\Delta S_{v, \varphi} = S_{0,0} - S_{v, \varphi} \quad (9)$$

Індекси у виразі означають величину помилок виміру. Так, запис $S_{20,2}$ визначає відношення сигнал - шум накопиченого дальнісного портрета при середньоквадратичній помилці вимірювання швидкості $\sigma_v = 20$ км/год. та середньоквадратичній помилці вимірювання ракурсу $\sigma_\varphi = 2^\circ$.

Дані, наведені на діаграмі, говорять про те, що через наявність помилок вимірювання швидкості та курсу об'єкта енергетичні втрати при некогерентному накопиченні можуть досягати значної величини - до 5,5 дБ. Помилки вимірювання швидкості об'єкта роблять більший внесок у появу енергетичних втрат, ніж помилки виміру ракурсу. Для властивих оглядовим РЛС значенням середньоквадратичної помилки вимірювання швидкості $\sigma_v = 20$ км/год. та середньоквадратичній помилці вимірювання ракурсу $\sigma_\varphi = 2^\circ$, енергетичні втрати можуть досягати 3 дБ.

При моделюванні безпосередньо розпізнавання перелічених моделей повітряних цілей використовувався кореляційний алгоритм прийняття рішень. Відповідні помилки вимірювань швидкості та ракурсу вводилися як на етапі навчання системи, так і на етапі контрольного розпізнавання. Результати моделювання розпізнавання наведені у вигляді діаграм залежності

ймовірності правильного розпізнавання (фіг. 11) та кількості інформації розпізнавання (фіг. 12) від величини помилок вимірювання швидкості та ракурсу цілей.

Наведені дані відповідають усередненню по всіх ракурсних секторах цілей.

Результати моделювання показують, що наявність помилок вимірювання швидкості та ракурсу об'єкта можуть суттєво погіршити показники якості розпізнавання. Можливість правильного розпізнавання може знижуватися до 30 %, а кількість інформації розпізнавання до 50 %. Хоча для властивих оглядовим РЛС значенням середньоквадратичної помилки вимірювання швидкості $\sigma_v = 20$ км/год. та середньоквадратичній помилці вимірювання ракурсу $\sigma_\varphi = 2^\circ$, зниження показників якості розпізнавання відносно невелике - вірогідність правильного розпізнавання знижується на 5 %, а кількість інформації розпізнавання на 1 %.

Необхідний для накопичення дальнісних портретів зсув N_i (2) може бути знайдений за відсутності даних вимірювання радіальної складової швидкості \hat{V}_r . Потрібне для зсуву сусідніх дальнісних портретів число дискретів, може бути знайдено як зсув, який забезпечує максимальне значення коефіцієнта взаємної кореляції (коваріації) між двома сусідніми дальнісними портретами пачки.

$$N_i = \operatorname{argmax}_j \left(\sum_{k=1}^M Y_{k+j}^i Y_k^{i-1} \right), \quad -\frac{M}{2} < j < \frac{M}{2}, \quad (10)$$

де Y_k^i - k - тий відлік i -того дальнісного портрета пачки

M - число відліків дальнісного портрета.

Точність вирівнювання за наведеним співвідношенням знижується при зменшенні відношення сигнал - шум. Крім цього, точність вирівнювання знижується за наявності швидких флюктуацій форми дальнісних портретів, обумовлених наявністю роторної модуляції, особливо таких цілей як вертольоти. Враховуючи той факт, що відношення сигнал - шум окремих (не накопичених) дальнісних портретів зазвичай мало, використання кореляційної процедури для вирівнювання дальнісних портретів необхідно розглядати лише як резервний варіант, за відсутності даних траекторних вимірів.

При некогерентному накопиченні дальнісних портретів необхідно враховувати особливості накопичення шумових відліків. Відомо, що розподіл ймовірності відліків шуму на виході амплітудного детектора підпорядковується закону Релея

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad x \geq 0, \quad \sigma > 0, \quad (11)$$

де σ - дорівнює середньоквадратичному відхиленню нормально розподілених відліків шуму в квадратурних каналах радіолокаційного приймача перед амплітудним детектором.

Розподіл Релея має позитивне значення математичного очікування

$$m = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma. \quad (12)$$

При накопиченні досить великої кількості дальнісних портретів, відповідно до центральної граничної теореми, розподіл відліків шуму буде прагнути до нормального з ненульовим математичним очікуванням

$$m_n = Km = K \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma, \quad (13)$$

де K – число накопичених дальнісних портретів.

Для нормальної роботи більшості алгоритмів розпізнавання необхідно, щоб математичне очікування шумових відліків дорівнювало нулю. При цьому бажано (але не обов'язково) щоб розподіл шумових відліків підкорявся нормальному закону. Для цього, після накопичення з усіх відліків накопиченого дальнісного портрета потрібно відняти величину m_n . На практиці, вважаючи, що відображення від об'єкта не потрапляють на краї вікна дальності, математичне очікування відліків шуму в накопиченому портреті може бути оцінене як середнє арифметичне перших та останніх $L \ll M$ відліків.

$$\hat{m}_n = \frac{1}{2L} \left(\sum_{k=1}^L Y_k + \sum_{k=M-L}^M Y_k \right), \quad (14)$$

де M - число відліків у дальнісному портреті.

Спосіб, що пропонується в порівнянні з аналогом, має наступні переваги: накопичення радіолокаційних дальнісних портретів пачки з урахуванням радіальної швидкості цілі дозволяє

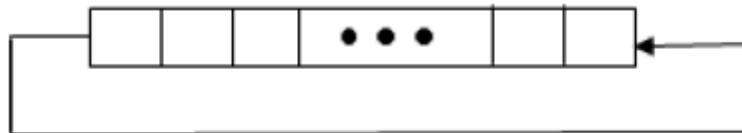
суттєво збільшити якість розпізнавання за рахунок покращення відношення сигнал - шум та збереження форми накопленого портрету.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

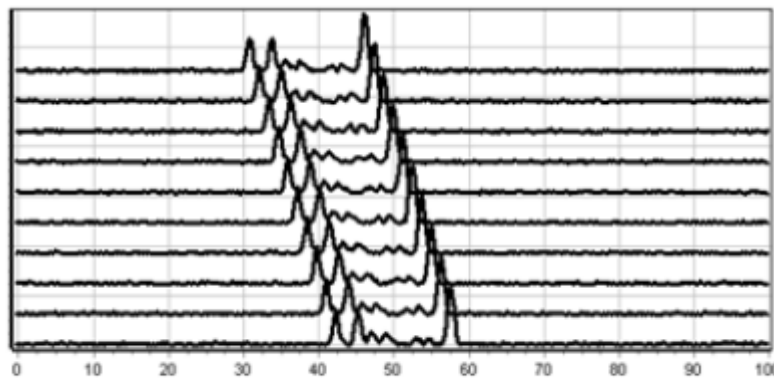
5

Спосіб накопичення пачки радіолокаційних дальнісних портретів при ширококутовому зондуванні повітряних цілей, що рухаються, для некооперативних методів розпізнавання повітряних об'єктів, що включає випромінювання радіолокаційною станцією (РЛС) ширококутових сигналів з роздільною здатністю менше одного метра в бік повітряних об'єктів, отримання відображених сигналів, які запам'ятовуються в пам'яті програмного забезпечення РЛС, їх обробку, оцінювання з урахуванням радіальної складової повітряної цілі у відображених сигналах та накопичення повної пачки дальнісних портретів.

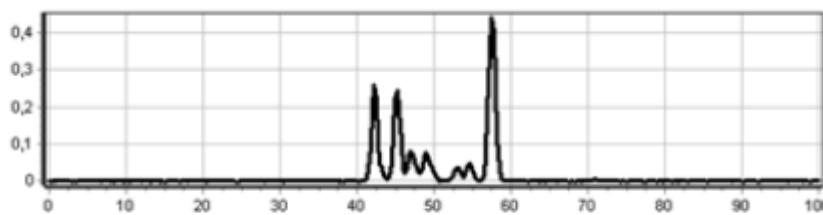
10



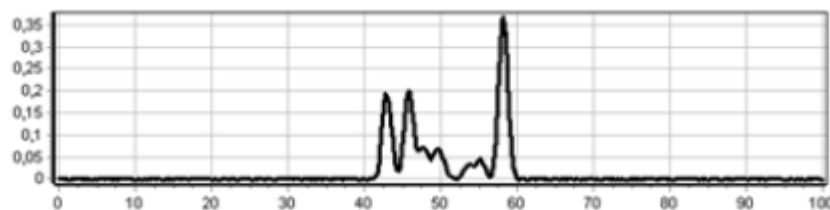
Фіг. 1



Фіг. 2



Фіг. 3



Фіг. 4

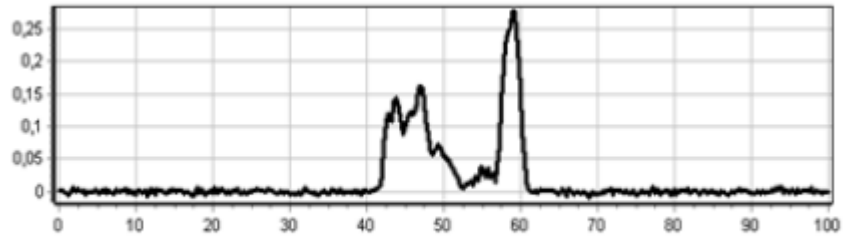


Fig. 5

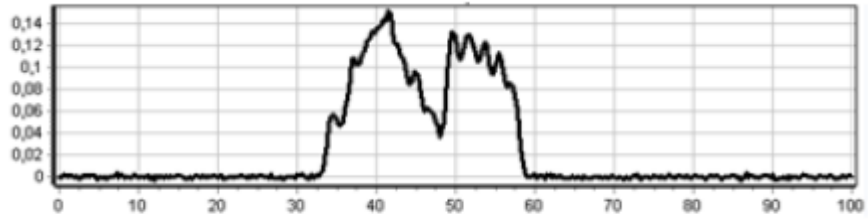


Fig. 6

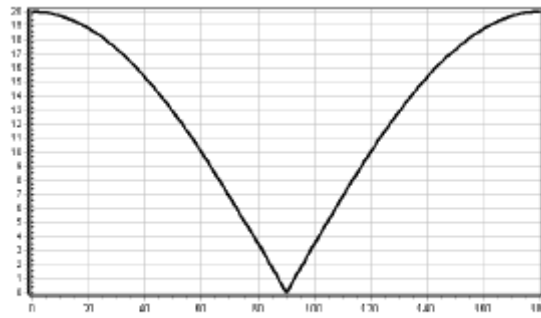


Fig. 7

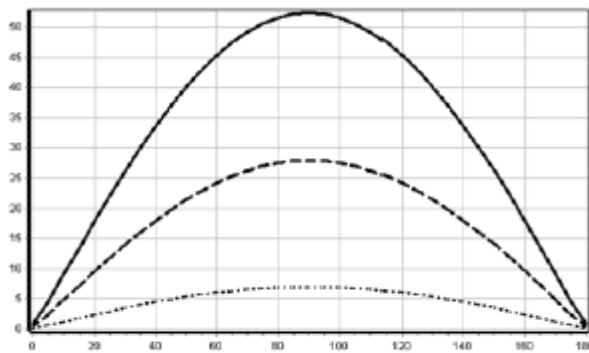
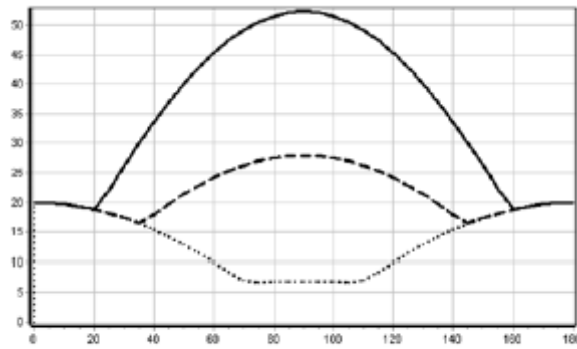
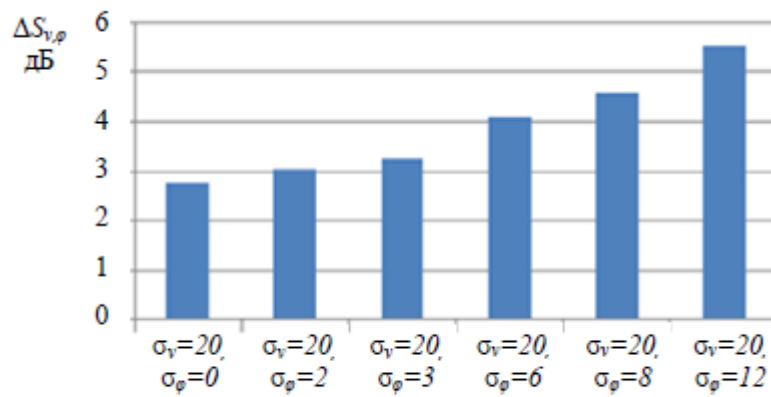


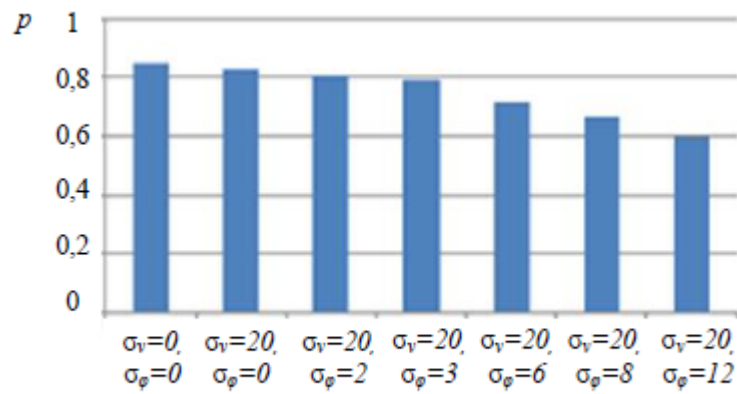
Fig. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11

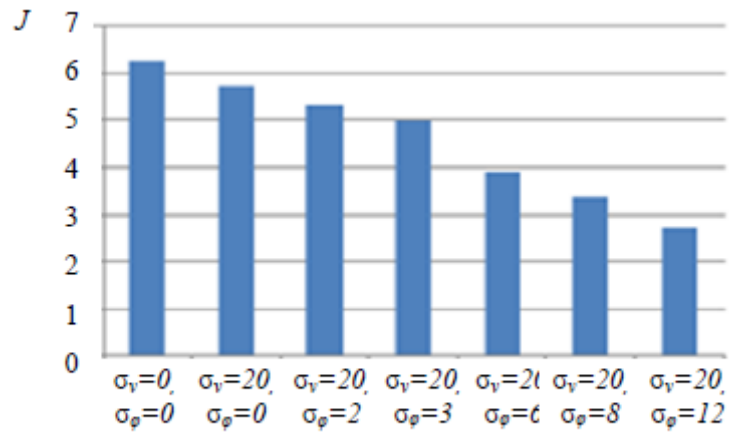


Fig. 12