

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ISSN 0135-1710

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ
СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И
ПРИБОРЫ АВТОМАТИКИ**

**Всеукраинский межведомственный
научно-технический сборник**

Основан в 1965 г.

Выпуск 171

Харьков
2015

СОДЕРЖАНИЕ

ЗУБКО Є.І. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ОПОРІВ ЗАМКНЕНИХ НЕСУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩ ЯК ДОДАТКОВИХ НИЗЬКОРОЗМІРНИХ КОНТАКТНИХ СИСТЕМ НА КРЕМНІЄВИХ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ.....	4
ПОПОВ В.М. ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ПЕРЕДІНВЕСТИЦІЙНОМУ ЕТАПІ ПРОГРАМИ РОЗВИТКУ	18
БАРАННИК В.В., СИДЧЕНКО С.А., ТУПИЦА І.М. ТЕХНОЛОГІЯ НАСЛОЕННЯ БИТОВИХ ЗОН В МЕТОДЕ КРИПТОСЕМАНТИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЛАВАЮЩЕЙ СХЕМЫ.....	22
БАРАННИК В.В., КОМОЛОВ Д.И., ТАРАСЕНКО А.В., МУСИЕНКО А.П. ТЕХНОЛОГІЯ СЕЛЕКЦИИ ЗНАЧИМЫХ ОБЪЕКТОВ КАДРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВИДЕОПОТОКА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИМИ СИТУАЦИЯМИ.....	29
ГУРЖИЙ П.Н. КОМПРЕССИЯ СИЛЬНОНАСЫЩЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ УОЛША В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ.....	34
ПЕТРОВА Л.Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ.....	39
РЫБИН В.В. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УПЛОТНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАТЕРИИ.....	44
ДИКОВА Ю.Л. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ТРАНСПОРТИРОВКИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА.....	50
РЕФЕРАТИ.....	56
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ ДЛЯ АВТОРОВ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО СБОРНИКА.....	59

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКІВ ОПОРІВ ЗАМКНЕНИХ НЕСУЦІЛЬНИХ
СЕРЕДОВИЩ ЯК ДОДАТКОВИХ НИЗЬКОРОЗМІРНИХ
КОНТАКТНИХ СИСТЕМ НА КРЕМНІЄВИХ МОНОКРИСТАЛІЧНИХ
СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТАХ**

Описується методика визначення питомого опору металорганічних напівпровідників РСМ і плівок з них, що утворюють замкнені несущі середовища, за якою плівки РСAl(OH)₂ мали $\rho = 0,030062 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, а РСCu(OH)₂ - $\rho = 0,0266 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ за потоком зміщення струму 0,022333 К. Розробляються методики встановлення значень опорів металізації, розтікання струму за еквівалентними схемами та результатах фрактограм АСМ на низькорозмірних додаткових і основних контактних мережах сонячних елементів.

1. Вступ

Основні тенденції розвитку сучасної напівпровідникової електроніки пов'язують з підвищенням ступеня інтеграції, функціональної складності і швидкодії мікросхем, які забезпечать якісні показники приладів при ефективній техніко-економічній оцінці виробництва. Це вимагає пошуку нових технологічних процесів і нових матеріалів, до яких належать низькорозмірні матеріали, що утворюють замкнені несущі середовища. Серед них слід назвати багатокомпонентні електронні приладові композиції (БЕПК) на основі пористого кремнію (ПК), оскільки вони можуть бути інтегровані в електронні прилади з кремнію, який використовується в 90 % від загального обсягу приладів та пристроїв мікроелектроніки і в 95 % - інтегральних схем.

До таких приладів відносяться кремнієві монокристалічні сонячні елементи (СЕ) з одним р-п переходом і антивідбиттєвим шаром (АВШ) на основі ПК. Їх розвиток розділений на декілька напрямків. Це покращення вихідного монокристалічного кремнію, його текстуризація для формування АВШ на фронтальній і тильній стороні СЕ, поліпшення технологічних операцій з підготовки пластин, процесів дифузії, створення металізації з обох боків СЕ. При цьому питанням формування контактів приділяється досить мало уваги дослідників. Особливо це стосується технологій низькотемпературного осадження контактних систем на ПК, черговості операцій і конструктивних особливостей розташування їх на АВШ з ПК для мілко- і глибокозалягаючих р – n переходів СЕ.

Відомо, що внаслідок осадження контактних мереж фізичними методами з газової фази, магнетронним або терморезистивним напыленням після процесів формування ПК виникає замикання частини структури СЕ, що затінена контактом. Це пов'язано з попаданням металу на межу р-п переходу, а також з міграцією і дифузією металу контакту в результаті високотемпературної обробки поверхні ПК, при якій метал не має поверхневих зв'язків з ПК, тому мігрує по поверхні СЕ з утворенням скупчень агрегатів і швидко дифундує на значну глибину приладу за умов високотемпературного відпалу зразків. Наприклад, одним з таких металів є мідь, яка має високу питому провідність, однак володіє значним коефіцієнтом дифузії, тому обмежено використовується в СЕ.

Також ПК окислюється, «старіє» і змінює властивості, хоча потребує капсуляції для збереження властивостей на даному рівні. При всіх цих процесах напруга холостого ходу U_{oc} може зменшуватись при наявності суттєвого розподіленого послідовного опору, оскільки даний ефект має важливе значення в експериментальних СЕ, на які діє R_s . Площа їх затінення складає значну долю активної поверхні ФЕП. Однак ефект закорочування можливо оминати за рахунок ряду заходів. Це впровадження низькотемпературних технологій осадження контактних систем [1] та формування однорідних і періо-

дичних структур ПК, що здійснюється завдяки операціям мікропрофілювання ПК. До них треба віднести макроструктури ПК і напівеліпсоїди при створенні на їх поверхні контактної мережі [2, 3], тому що дані структури мають однорідний шар $n^+ - Si$ та вищу якість у порівнянні з текстурованими неоднорідними поверхнями ПК.

Окрім удосконалення технології слід розглянути і важливі питання контролю параметрів таких структур СЕ. До них відноситься питомий опір додаткового контактного шару, послідовний опір, контактний опір, опір розтікання і опір металізації СЕ, що значно впливають на ефективність перетворення сонячного випромінювання приладом. Ці параметри характеризують процеси, що виникають в структурі СЕ та можуть дати вичерпну об'єктивну інформацію стосовно доцільності впровадження технології низькорозмірних додаткових контактних систем в конструкцію СЕ. Тому для їх визначення необхідна розробка методик розрахунків, що дозволить оперативно отримати інформацію і може бути застосовано для інших низькорозмірних металорганічних матеріалів з метою визначення електричних параметрів структур СЕ.

2. Постановка задачі

Як відомо, контактний опір СЕ складається з тильного, фронтального опорів металізації та опорів розтікання струму обох боків пластини. При цьому тильний контактний опір технологічно можливо зменшити за рахунок підлегвання до $0,2 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ [4]. Однак якщо існують технології, що дозволяють зменшити тильний опір, то опір розтікання на даний момент змінювався лише за рахунок зменшення довжини СЕ і збільшення товщини переднього шару w . При цьому слід забезпечити умови отримання найбільшого фотоструму. Але збільшення товщини переднього шару виявляється непридатним в зв'язку з допусками за товщиною, які повинні становити не більше 400 нм для мілкозалегаючих р-п переходів СЕ і не більше 1,4 мкм – для глибокозалегаючих р-п переходів СЕ. Отже, при зменшенні довжини приладу також скорочується корисна площа, що не закрита контактом. Іншим підходом вирішення питання є замкнені несучільні середовища на поверхні СЕ у вигляді додаткових контактних систем. Тому їх дослідження і розробка методики по вимірюванню характеристик опорів розглядаються в даній роботі.

Розгляд конструкції СЕ (рис. 1, а) і теоретичних результатів по виявленню залежності між довжиною контактних смуг представляється обернено пропорційною параболою (рис. 1, б (3)).

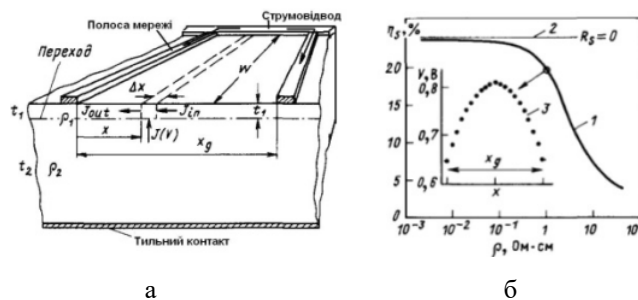


Рис. 1. Схема поперечного перетину СЕ з мереживим фронтальним контактом (а); теоретичні розрахунки залежності η від питомого опору ρ оптичного вікна (1), при $R_S = 0$ (2), розподіл напруги U між двома полосами контактної мережі СЕ в режимі питомого опору, що дорівнює $10 \text{ м} \cdot \text{м}$ (3) [1]

Значення напруги спостерігаються між найменшими значеннями довжин. Якщо смуги контактної мережі сучасного СЕ на поверхні фронтального шару вилучені одна від одної на меншу відстань, ніж дифузійна довжина основних носіїв заряду, то процес їх переносу регулюється дифузією, а не дрейфом в електричному полі, і порядок спадання напруги між смугами сітки дорівнює κT . При використанні ПК як антивідбиттєве покриття слід брати до уваги низькі рухливості заряду, які становлять не більше

$10^{-2} - 10^{-3} \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [6]. При цьому добуток дрейфових величин рухливості на час життя носіїв заряду дорівнює $\mu \cdot \tau \sim 10^{-10} \text{ см}^2/\text{с}$ [7]. Отже, при більших електричних полях довжини дрейфу носіїв повинні становити не більше 1 мкм, тобто для знаходження контактних полів на довжині 1,25 мкм одна від одної напруга буде найбільшою і процес переносу носіїв заряду буде визначатись дрейфом в електричному полі. Такі параметри можуть забезпечити замкнені несучільні покриття з багатокомпонентних електронних приладових композицій на основі пористого кремнію.

Мета роботи: розробка методик розрахунків питомого опору, опору розтікання і металізації додаткових низькорозмірних контактних систем монокристалічних кремнієвих СЕ.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- створення оптимальних шляхів встановлення значень питомого опору низькорозмірного металоутворюючого матеріалу, що складається з безлічі провідників напівциліндричної форми, як замкненого несучільного середовища;

- представлення алгоритму методики визначення опорів металізації і розтікання СЕ через рішення задачі оцінки вкладів фізичних процесів низькорозмірних структур БЕПК на основі ПК за умов адекватності аналітичної моделі реальним умовам роботи сонячних елементів, виходячи з однієї або кількох фрактограм атомно-силової мікроскопії поверхні додаткового контактного шару СЕ;

- дослідження опорів металізації і розтікання на структурах $\text{Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p}^+ \text{-Si/ITO}$, $\text{Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p}^+ \text{-Si/ITO}$ з аналізом результатів порівняння з СЕ без додаткового контактного шару і ПК $\text{Cu/n-Si/p-Si/p}^+ \text{-Si/ITO}$, $\text{Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p}^+ \text{-Si/ITO}$ та $\text{Al/n-Si/p-Si/p}^+ \text{-Si/ITO}$, $\text{Al/por-Si/n-Si/p-Si/p}^+ \text{-Si/ITO}$ відповідно.

3. Основний матеріал та результати

Як контакти в даній роботі застосовувались низькорозмірні багатокомпонентні електронні приладові композиції на основі пористого кремнію. Вони осаджувались на ПК кремнієвої монокристалічної підкладки методом пульверизації і при забезпеченні технологічних умов формування утворювали мережу. Зображення низькорозмірного шару фталоціаніну міді (PcCu), осадженого на пористий кремній в процесі формування шару, представлено на рис. 2, в. Молекули фталоціаніну за умов впливу температури підкладки, дії легування киснем і процесу пульверизації формували структуру рельєфу мережі з краплин розчинів, що приєднувалась одна за одною. В такий спосіб були зібрані стопки (рис. 2, б), які розташовані під 90° до поверхні ПК і мають забарвлення поверхні рожевого кольору, що характерно для міді електролітичної якості [1], тобто рельєф формується шляхом самоорганізації молекул фталоціаніну. Кут розташування молекул представляє нову модифікацію PcCu. Відомі 2 поліморфні форми (α, β) мають кути розташування молекул $26,5^\circ$ і $46,5^\circ$ до поверхні відповідно (рис. 2, г). Третя модифікація χ утворюється роздрібненням α -форми [1]. Отже, шляхом самоорганізації через процес пульверизації з розчинів і створення нерівноважних технологічних умов формується нова модифікація, яка може бути застосована як додатковий контактний шар на антивідбиттєвому покритті ПК, оскільки діаметр таких волокон складає від 3 мкм до 50 нм і має довжину від 30 мкм до 100 нм. Таким чином, з'явилась можливість створити методику розрахунків питомого опору, а також опорів розтікання і металізації композицій СЕ та порівняти результати розрахунків з даними, що виведені для структур СЕ, які не мають додаткового контактного шару.

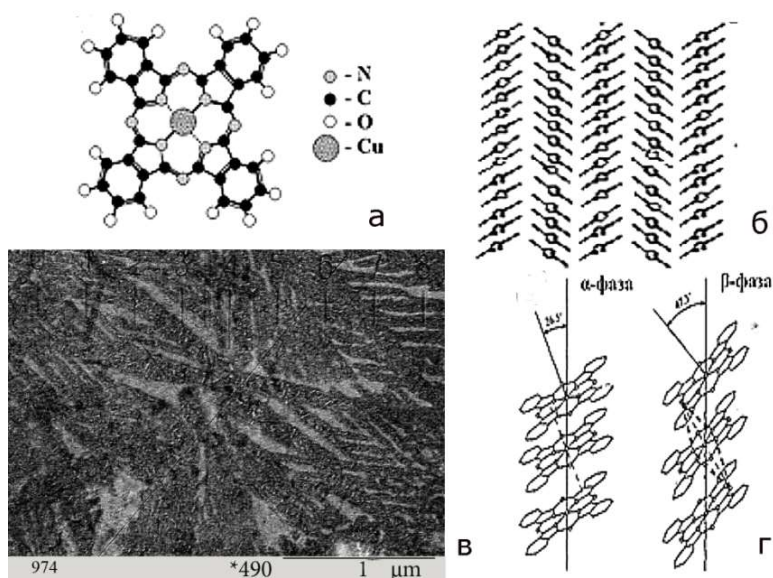


Рис. 2. Молекула фталоціаніну міді PcCu (а), розташування молекул PcCu в стопках (б), низькорозмірний контактний шар на основі PcCu (в), модифікації PcCu (г)

Однак для проведення відповідних розрахунків необхідне знання величини питомого опору, тому було розглянуто шляхи його визначення.

4. Дослідження питомого опору та інших параметрів для замкненого несуцільного середовища плівок з фталоціанінів

Встановлення значень питомого опору і параметрів плівки, що складається з безлічі провідників, є важливим для впровадження їх у прилади електронної техніки. Особливо це стосується СЕ і сенсорних приладів. Оскільки середовище плівки хоча і замкнене, але не суцільне, то емпіричні величини треба обережно порівнювати з розрахунковими, бо вони характеризують несуцільний матеріал без обліку вкладів низькорозмірних структур провідників. Так, з експерименту за чотирьохзондовим методом на площі зразка $50 \times 30 \text{ мм}^2$, який було виготовлено на склі за $T_1 = 308,15 \text{ К}$ товщиною $0,400 \text{ мкм}$, що була визначена на інтерферометрі Лінника, були отримані значення, які становили $0,03 \text{ Ом}$ [10]. Цей результат був порівняний з іншим зразком, на якому $R_2 = 0,035 \text{ Ом}$ при дії $T_2 = 313,15 \text{ К}$. Виходячи з даних, було отримане значення температурного коефіцієнта опору:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} = \frac{0,035 - 0,03}{0,03(313,15 - 308,15)} = \frac{0,005}{0,15} = 0,0333 \quad (1)$$

Оскільки α має позитивне значення, то можливо це пов'язано із суттєвою дією іону металу на ґратку молекули фталоціаніну, що реєструється при підвищенні температури та збільшенні опору плівки. При цьому іон розсіює електрони в ній незначно, що пояснюється розташуванням в центрі гетероциклу. Отже вплив на нього в більшому ступені домішковий. Даний ефект враховується далі в процесі розрахунку питомого опору і кількості теплоти, що виділяється плівкою в простір при нагріванні.

Фталоціанін міді у вигляді низькорозмірної мережі є неоднорідною, ізотропною речовиною, тому у своєму складі має велику кількість провідників довжиною l ($200 \text{ нм} - 30 \text{ мкм}$) і поперечним перетином s ($50 \text{ нм} - 3 \text{ мкм}$). Таким чином, властивості такого матеріалу змінюються від точки до точки. І питомий опір такої плівки буде скалярною функцією – коефіцієнтом, що пов'язує напруженість електричного поля і щільність струму в даній точці:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \rho(\vec{r}) \cdot \vec{J}(\vec{r}) \quad (2)$$

Таким чином, розрахунок питомого опору необхідно проводити з врахуванням даного факту. Також омичний контакт складається з молекулярних стопок органічного напівпровідника, який має деяку ступінь окиснення під впливом легуючих домішок кисню і азоту.

Однак питомий опір треба розраховувати, а не вважати, що він складається тільки із міді. Тому в даній роботі запропонована методика розрахунку питомого опору металорганічного напівпровідника.

Згідно з теорією Максвелла і теоремою Остроградського – Гауса потік зміщення Φ_e крізь довільно замкнену поверхню пропорційний алгебраїчній сумі вільних електричних зарядів q_i , що охоплені цією поверхнею:

$$\Phi_e = \oint_S D_n dS = \sum_i q_i, \quad (3)$$

$$\Phi_m = \oint_S B_n dS = 0, \quad (4)$$

де Φ_e, Φ_m – відповідно потоки електричного зміщення D і магнітної індукції B крізь замкнену поверхню, що охоплює вільний заряд q ; $\sum_i q_i$ – сума вільних зарядів, що охоплюють замкнену поверхню; $\oint_S D_n dS$ – потік зміщення крізь цю поверхню. У формулі (3) кожен заряд дорівнює:

$$q = \frac{1}{l} \sqrt{\frac{Q \cdot V \cdot t}{\rho}}, \quad (5)$$

тут l – довжина провідника; Q – енергія кількості теплоти, що виділяється в провідник; V – об’єм провідника; t – час, за який проходить постійний струм; ρ – питомий опір провідника.

На основі (5) були розраховані Q, V, ρ, l . За законом Джоуля – Ленца знайдена енергія кількості теплоти, що виділяється в провідник, за формулою:

$$Q = 0,24 \cdot I \cdot U \cdot t. \quad (6)$$

Дану величину було розраховано з експериментальних даних при вимірюванні на структурі струму і напруги за визначений час: $I = 4,7 \text{ мкА} / \text{см}^2$, $U = 80 \text{ мВ}$, $t = 1$ мин. Вона дорівнює вала $5,42 \text{ мкДж}$.

При цьому зміщення Φ_e крізь довільно замкнену поверхню, яка не охоплює вільні носії заряду, дорівнює 0. Тому для опису алгебраїчної суми вільних електричних зарядів опишемо об’єм провідника за теоремою Остроградського – Гауса. Спочатку розглянемо один провідник, як замкнену поверхню циліндричної форми. А далі при розрахунку суми зарядів отримаємо потік зміщення Φ_e . Тому провідник представлено як:

$$\iiint_V y \sqrt{x^2 + z^2} dx dy dz. \quad (7)$$

При цьому область обмежена циліндричною функцією $x^2 + z^2 = 2x$ і площинами $z = 0, y = 0, y = a$, то беручи циліндричні координати: $x = \rho \cos \varphi$, $z = \rho \sin \varphi$, $y = a$. Оскільки $\rho^2 \cos^2 \varphi + \rho^2 \sin^2 \varphi = \rho^2$. То приймаючи до уваги обмеження функцією $x^2 + z^2 = 2x$ після перетворень $x^2 - 2x + 1 - 1 + z^2 = 0$ прийме вигляд: $(x - 1)^2 + z^2 = 1$. Введемо обмеження: $0 \leq y \leq a$ і $0 \leq \varphi \leq \pi/2$. Тоді об’єм провідника буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \iiint_V y \sqrt{x^2 + z^2} dx dy dz &= \iiint_V y \cdot \rho \cdot \rho d\rho d\varphi dy = \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{2 \cos \varphi} \rho^2 d\rho \int_0^a y dy = \frac{a^2}{2} \int_0^{\pi/2} d\varphi \left. \frac{\rho^3}{3} \right|_0^{2 \cos \varphi} = \frac{a^2}{2} \int_0^{\pi/2} \frac{8}{3} \cos^3 \varphi d\varphi = \\ &= \frac{4}{3} a^2 \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \varphi) \cos \varphi d\varphi = \frac{4}{3} a^2 \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \varphi) d(\sin \varphi) = \frac{4}{3} a^2 \int_0^{\pi/2} (1 - t^2) dt = \frac{8}{9} a^2 \geq 0. \end{aligned}$$

Таким чином, об'єм провідника $V = \frac{8}{9}a^2$ за умов $y = a$ має фізичний смисл об'єму провідника, що зосереджений на його довжині l .

Для визначення питомого опору провідника треба зауважити, що рід речовини теж має значну залежність від центрального іона металу. Тому розрахунок питомого опору необхідно проводити з урахуванням цієї особливості. У фталоціанінах переважає домішковий механізм розсіювання електронів провідності, тому формула для питомого опору згідно з квантовою теорією електропровідності і у відповідності з правилом Матисена має вигляд:

$$\rho_V = \frac{2\hbar}{(3\pi^2)^{\frac{2}{3}} e^2} n^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{l_{\text{пр}}} \right). \quad (8)$$

Враховуючи, що $n = \frac{\rho Z}{m_H A}$, $l_{\text{пр}} = \frac{1}{n_{\text{пр}} \langle \sigma \rangle}$, $n_{\text{пр}} = n \cdot \text{Ат.}\%$, де Ат.% – атомний процент інших складових молекули фталоціаніну, крім іону металу, та підставляючи відповідні константи в (8), отримаємо вираз для розрахунку питомого опору матеріалу:

$$\rho_V = 1,72 \cdot 10^{12} \left(\frac{\rho}{\text{Аг}} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{\langle \sigma \rangle \text{Ат.}\%}{Z^{\frac{2}{3}}}, \quad [\text{Ом} \cdot \text{м}]. \quad (9)$$

Тут Ат – атомна вага фталоціаніну або її похідної ($\text{Аг}(\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Cu}) = 467$ а.о.м., $\text{Аг}(\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Cu}(\text{OH})_2) = 756$ а.о.м.), $m_H = 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг – маса нейтрона; Z – число валентних електронів, що має один атом металу для приєднання інших молекул в аксіальних напрямках. Для фталоціаніну міді валентних електронів 2, для фталоціаніну алюмінію - 1. При цьому визначимо питомий опір вихідного матеріалу $\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Cu}$ - Ат.% $_{\text{PcCu1}} = 13,5\%$, $\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Al}$ - Ат.% $_{\text{PcAl1}} = 6,26\%$ і питомий опір матеріалу в структурі $\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Cu}(\text{OH})_2$ - Ат.% $_{\text{PcCu2}} = 8,3\%$, $\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Al}(\text{OH})_2$ - Ат.% $_{\text{PcAl2}} = 3,75\%$.

Перетин розсіювання електронів для міді складає $\langle \sigma \rangle = 1,3 \cdot 10^{-21}$, для алюмінію – $\langle \sigma \rangle = 3 \cdot 10^{-21}$ визначається природою центрального іона і від температури не залежить. Тому, на відміну від чистих металів, питомий опір фталоціанінів практично не залежить від температури.

Розрахуємо питомий опір для вихідного і остаточного матеріалів плівки фталоціанінів міді і алюмінію:

$$\rho_{V\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Cu}} = 1,72 \cdot 10^{12} \left(\frac{8900}{467} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{1,3 \cdot 10^{-21} \cdot 13,5\%}{2^{\frac{2}{3}}} = 5,07937 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 0,0507937 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

$$\rho_{V\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Cu}(\text{OH})_2} = 1,72 \cdot 10^{12} \left(\frac{8900}{756} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{1,3 \cdot 10^{-21} \cdot 8,3\%}{2^{\frac{2}{3}}} = 2,65962 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 0,0265962 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

$$\rho_{V\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Al}} = 1,72 \cdot 10^{12} \left(\frac{2700}{431} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{3 \cdot 10^{-21} \cdot 6,26\%}{1^{\frac{2}{3}}} = 5,954604 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 0,05954604 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}};$$

$$\rho_{V\text{C}_{23}\text{H}_{16}\text{N}_8\text{Al}(\text{OH})_2} = 1,72 \cdot 10^{12} \left(\frac{2700}{720} \right)^{\frac{1}{3}} \frac{3 \cdot 10^{-21} \cdot 3,75\%}{1^{\frac{2}{3}}} = 3,006247 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 0,03006247 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

Отримуючи значення Q, V, ρ , також треба виявити кількість, розташування і довжину провідників у циліндричній формі. Середовище замкнене, несучільне і складається з безлічі провідників циліндричної форми, що розташовані, згідно з циркуляцією вектора напруженості, по замкненому контуру. Тому треба врахувати їх розподіл по довжині провідників на поверхні, для цього необхідно ввести початкові і граничні умови. Це пов'язано з тим, як було зазначено вище, об'єм провідника дорівнює $V = \frac{8}{9}a^2$ за умов $y = a = 1$. Таким чином,

запишемо $V = \frac{8}{9}l^2$. Тоді розподіл провідників за об'ємами по поверхні являє собою дивергенцію (або виверження) вектора, фізичний смисл якої заключається в тому, щоб потік вектора D через замкнену поверхню S був розділений на об'єм, що заключений зовні поверхні та гіпотетично стягнутий в точку ζ : $q = \int_V \zeta dV$. Використаємо теорему Гауса:

$$\oint_S A_n dS = \int_V \text{div} A dV \quad (10)$$

і з (3) і (4) отримаємо рівняння Максвелла в диференціальній формі: $\text{div} D = \zeta$ Тому $\text{div} B = 0$.

$$\zeta = \sum_{n=1} N_m \cdot \left(\frac{y}{n} \sqrt{\frac{x^2}{n} + \frac{z^2}{n}} \right), \quad (11)$$

де n – коефіцієнт групи провідників; N_m – скалярна постійна величина кількості провідників у групі.

Рівняння розподілу провідників для замкнених несучільних покриттів має вигляд

$$\begin{aligned} \text{div} D &= \text{div} \sum_{n=1} N_m \cdot \left(\frac{y}{n} \sqrt{\frac{x^2}{n} + \frac{z^2}{n}} \right) = \text{div} \sum_{n=1} \left(\frac{8}{9} N_m y^2 + \text{grad} N_m \cdot \left(\frac{y}{n} \sqrt{\frac{x^2}{n} + \frac{z^2}{n}} \right) \right) = \\ &= \sum_{n=1} \frac{16}{9} N_m y dy + \text{grad} N_m \cdot \left(\left(\sqrt{\frac{x^2}{n} + \frac{z^2}{n}} \cdot \frac{dy}{n} \right) + \frac{y}{n} \cdot \left(\frac{\frac{2}{n} x dx + \frac{2}{n} z dz}{2 \sqrt{\frac{x^2}{n} + \frac{z^2}{n}}} \right) \right), \quad (12) \end{aligned}$$

$$\text{div} B = 0.$$

На основі даних суджень треба проаналізувати поверхню фталоціанінової плівки та представити розподіл провідників за довжиною, перетином, кількістю (табл. 1). З табл. 1 видно, що сумарне значення довжин і об'ємів за кількістю провідників буде дорівнювати деякій складовій алгебраїчної суми зарядів, яка характеризує потік зміщення струму за теорією Максвелла для замкнутих несучільних провідних покриттів, де джерелом виникнення вихрових магнітних полів є змінне електричне поле, а магнітна дія є його параметром.

Так, початкова кількість N для провідників з максимальною довжиною 30 мкм дорівнює 2 та є функцією $2 \cdot n$, що залежить від коефіцієнта n . При цьому їх початковий максимальний перетин визначається з фрактограми зразка і дорівнює 3 мкм². Його можна представити

як функцію $\left(\frac{x}{n}\right)^2 \approx \left(\frac{y}{n}\right)^2$. Функція довжини за даних умов має вигляд $\frac{y}{n}$. З цього виходить, що фізичний смисл об'єму провідника зосереджений на його довжині l і залежить від коефіцієнта n .

Отже, формалізуємо задачу розташування кількості провідників і проведемо дослідження поверхні контактної мережі (рис. 2) та зробимо оцінку провідників за довжиною, перетином, об'ємом, кількістю.

Таблиця 1

Характеризація візуального аналізу провідників, що складають замкнене несучільне середовище

№ з/п	Назва групи провідників	Довжина l, у, мкм	Перетин $x^2 \approx y^2$, мкм ²	Об'єм провідника V, мкм ³	Кількість провідників групи N, шт	Заряд групи провідників, q
1	$y\sqrt{x^2 + z^2} dx dy dz$	3,0	0,3	8	2	0,00233
2	$\frac{y}{2}\sqrt{\left(\frac{x}{2}\right)^2 + \left(\frac{z}{2}\right)^2} dx dy dz$	1,5	0,15	2	6	0,00165
3	$\frac{y}{3}\sqrt{\left(\frac{x}{3}\right)^2 + \left(\frac{z}{3}\right)^2} dx dy dz$	1,0	0,1	0,889	8	0,001345
4	$\frac{y}{4}\sqrt{\left(\frac{x}{4}\right)^2 + \left(\frac{z}{4}\right)^2} dx dy dz$	0,75	0,075	0,5	10	0,001165
5	$\frac{y}{n}\sqrt{\left(\frac{x}{n}\right)^2 + \left(\frac{z}{n}\right)^2} dx dy dz$	$\frac{y}{n}$	$\left(\frac{x}{n}\right)^2 \approx \left(\frac{z}{n}\right)^2$	$\frac{8}{9}y^2$	2 · n	$q = \frac{1}{1 \cdot N} \sqrt{\frac{Q \cdot V \cdot N \cdot t}{\rho}}$

Електричні заряди не утворюються і не зникають; вони можуть переміщатись від одного тіла до іншого або зміщатись усередині тіла чи молекул атомів (закон збереження електричних зарядів). Тому носіями зарядів в будь-яких середовищах можуть бути електрони, що відірвані від атома (в металах), іони – частини молекул або атомів, що мають позитивні і негативні заряди.

Таким чином, розрахунок на ПЕОМ алгебраїчної суми зарядів провідників дав значення потоку зміщення струму для даного фрагмента плівки фталоціаніну міді, що дорівнює 0,022333 К.

Окрім встановлення рівняння для замкнених несучільних мереж та визначення питомого опору і потоку зміщення струму треба розглянути практичне застосування таких покриттів в СЕ як низькорозмірних додаткових контактних мереж і навести алгоритм розрахунків опорів металізації і розтікання струму з атомно-силової мікроскопії.

5. Алгоритм розрахунків опорів металізації і розтікання з АСМ

Для розробки методики визначення опорів металізації і розтікання БЕПК на основі ПК з фрактограм АСМ необхідно розробити алгоритм, за яким поетапно здійснюється розрахунок.

1. Отримання зображення композицій з низькорозмірними волокнами на атомно-силовому мікроскопі.
2. Вимірювання і розрахунок питомого опору матеріалу, якщо величина не відома.
3. Формування початкових даних про розмір, площу і товщину волокон та їх розташування, розмір фрактограм та СЕ, товщину переднього шару СЕ.
4. Розробка спрощеної візуальної, електричної та еквівалентної схем і розрахунок номіналів опорів.
5. Розрахунок опору розтікання згідно з візуальною схемою та формулами.
6. Розрахунок опору металізації згідно зі спрощеною електричною та еквівалентною схемами.
7. Розробка методики визначення опорів металізації і розтікання БЕПК на основі ПК з фрактограм АСМ

Для визначення величин опорів металізації і розтікання струму за запропонованим алгоритмом було використано фрактограму атомно – силової мікроскопії зразка ПК і осадженої

плівки PсCu, яка мала такі розміри - 600-700 нм² (рис. 3). Дане зображення було отримане з проміжної технологічної операції оптимізації формування допоміжного контактного шару на антивідбиттєвому покритті майбутнього СЕ. На ньому наведено паралельне з'єднання трьох П-образних контактів, сформованих з розчинів PсCu, що мали різну товщину контактних пальців (150, 100 і 200 нм). Аналіз фрактограм ПК з осадженим на нього PсAl дав паралельне з'єднання двох П-образних контактів. Тому згідно із зображенням були складені еквівалентні схеми і розраховані номінали опорів. Далі були визначені характеристики – опори розтікання і металізації. Початкові дані для розрахунку опорів розтікання і металізації наведено в табл. 2, 3.

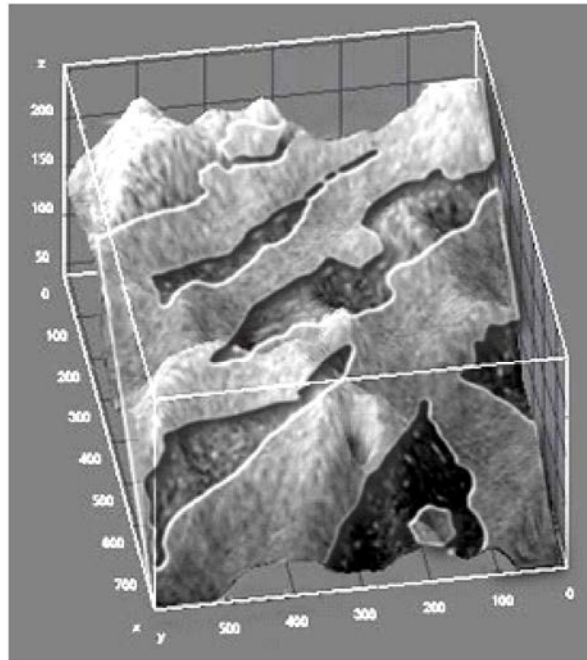


Рис. 3. Фрактограма атомно-силової мікроскопії поверхні ПК, на якій осаджено PсCu

Таблиця 2

Початкові дані для розрахунку опору розтікання

№ з/п	Тип зразка	Електричний питомий опір додаткового контакту, $\rho_1, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Уточнений електричний питомий опір додаткового контакту, $\rho_2, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Товщина переднього шару, w, мм	Довжина фрагменту розрахунку, мм	Ширина фрагменту розрахунку, мм
1	Cu/PсCu/ПК/ n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,01724	0,0265962	0,0014	0,000750	0,000600
2	Cu/ПК/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,01724	0,0265962	0,0014	3	1,7
3	Cu/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,01724	0,0265962	0,0006	3	1,7
4	Al/PсAl/ПК/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0262	0,03006247	0,0014	0,000750	0,000600
5	Al/ПК/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0262	0,03006247	0,0014	3	1,7
6	Al/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0262	0,03006247	0,0006	3	1,7

Зв'язок струму з напругою в кожному і-му діоді еквівалентної схеми визначається рівнянням освітленості р-n-переходу:

$$I_s = \frac{1}{n} \left\{ I_\Phi - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU_s}{AkT}\right) - 1 \right] \right\}, \quad (13)$$

де n - кількість фрагментів у довжину АСМ. Тому процес формування еквівалентної схеми виникає в результаті розділення СЕ на n рівних частин, що є паралельними контактним полоскам [9]. Зокрема, для розрахунків основної контактної мережі структур СЕ прилад розділено на дев'ять частин, що формують профіль фронтального боку СЕ.

Таким чином, еквівалентна схема і спрощені візуальна та електрична схеми для відповідних розрахунків представлені на рис. 4, 5. Однак вважаємо, що розмір СЕ вздовж контактної смужки набагато більший від поперечного, що дозволяє не враховувати шунтуючий вплив шарового опору напівпровідника відповідно до поздовжнього опору смужок R_M . У такий спосіб фотострум буде текти по верхньому шару в напрямку, перпендикулярному до контактних смужок. Величина шарового опору R_c визначається на рис. 4, 5, як $(1/2n)$. Опір контактний R_k характеризує всю площу металевих смужок, згідно з [9].

Побудова еквівалентних схем для обліку впливу розподіленого опору R_M розділилась на декілька етапів, де СЕ ділиться на кілька рівних частин, кожна з яких представлена на еквівалентній схемі окремою ланкою і має діод-генератор фотоструму і 2 опори $(1/2n) \cdot R_c$. Ланки з'єднані між собою відповідними частками опору R_M .

Таблиця 3

№ з/п	Тип зразка	Електричний питомий опір до даткового контакту, $\rho_1, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Уточнений електричний питомий опір додаткового контакту, $\rho_2, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Початкові дані для розрахунку опору металізації					
				Площа провідника $s \cdot (10^{-8}), \text{мм}^2$			Довжина провідника, $l \cdot (10^{-4}), \text{мм}$		
				$s_1 \cdot (10^{-8}), \text{мм}^2$	$s_2 \cdot (10^{-8}), \text{мм}^2$	$s_3 \cdot (10^{-8}), \text{мм}^2$	$l_1 \cdot (10^{-4}), \text{мм}$	$l_2 \cdot (10^{-4}), \text{мм}$	$l_3 \cdot (10^{-4}), \text{мм}$
1	Cu/PcCu/ПК/ n-Si/p-Si/p ⁺ - Si/ITO	0,01724	0,0265962	0,176625	0,0785	0,314	0,150	0,100	0,200
2	Al/PcAl/ПК/n- Si/p-Si/p ⁺ - Si/ITO	0,0262	0,0300625	0,7065	0,962	-	0,710	0,750	-

У свою чергу для обліку впливу розподіленого опору R_c кожна ланка складена з n ланок ($n = 3$) для PcCu. Номінали резисторів на еквівалентній схемі відповідають розбивці фрактограми АСМ, виготовленої на плівках PcCu, на дев'ять однакових прямокутних ділянок візуальної схеми (див. рис. 4). На фрактограмі АСМ для композицій PcAl візуальна схема розділена на дванадцять частин та наведені розраховані номінали опорів на еквівалентній схемі (див. рис. 5).

Виконаємо розрахунки додаткової контактної мережі з фрактограм АСМ. Виходячи з їх розмірів, загальна площа СЕ представляє собою 12 квадрантів – фрактограм, оскільки площа СЕ становить $3 \cdot 1,7 \text{ мм}^2$.

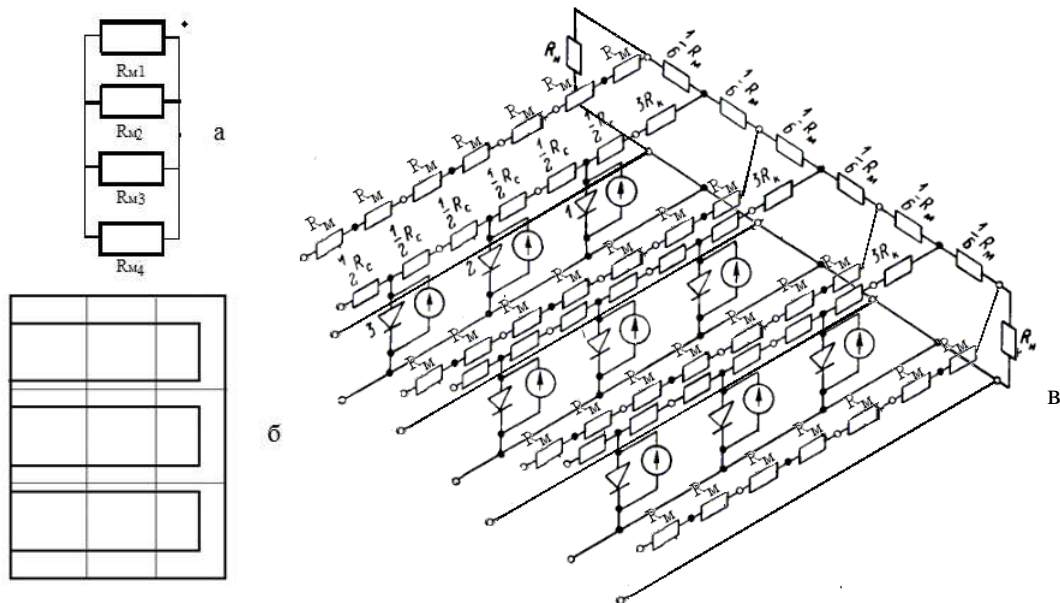


Рис. 4. Спрощена електрична(а), спрощена візуальна (б) і еквівалентна схеми (в) для розрахунку опорів розтікання і металізації додаткової низькорозмірної контактної мережі з Pcsu

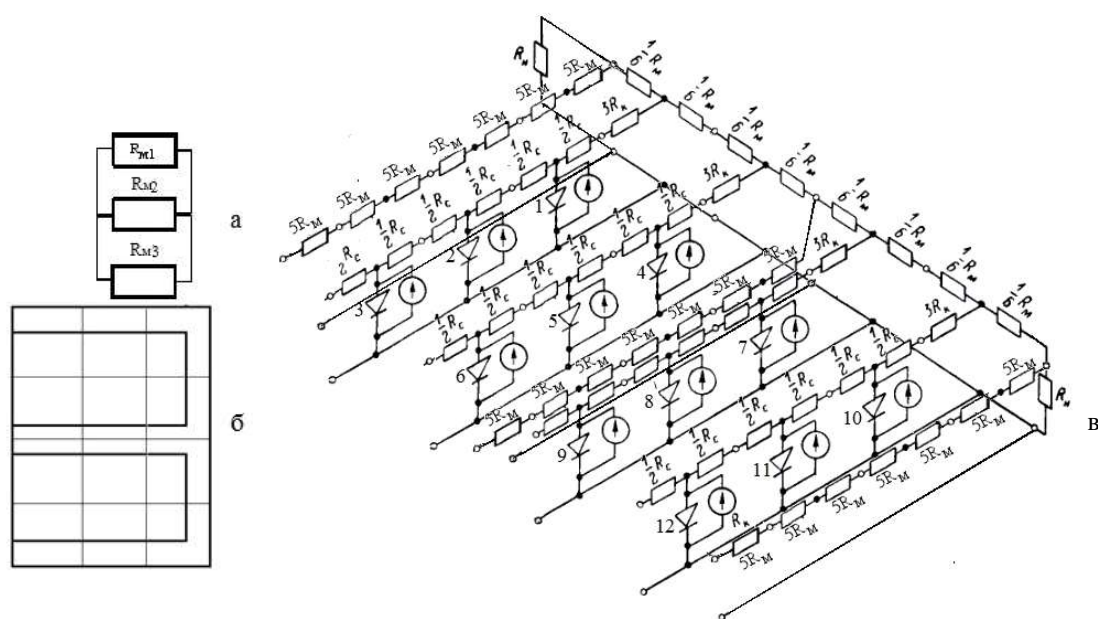


Рис. 5. Спрощена електрична (а), спрощена візуальна (б) і еквівалентна схеми (в) для розрахунку опорів розтікання і металізації додаткової низькорозмірної контактної мережі з PcsAl

6. Дослідження опорів металізації і розтікання БЕПК на основі ПК структур СЕ

Як відомо, для розрахунків послідовного опору R_s необхідне знання значень контактних опорів R_k :

$$R_k = R_{\text{тил.к.}} + R_{\text{фронт.к.}} + R_{p_{\text{тил.к.}}} + R_{p_{\text{фронт.к.}}} \quad (14)$$

де $R_{\text{тил.к.}}$ – опір металізації тильного контакту; $R_{\text{фронт.к.}}$ – опір металізації фронтального контакту; $R_{\rho_{\text{тил.к.}}}$ – опір розтікання тильного контакту; $R_{\rho_{\text{фронт.к.}}}$ – опір розтікання фронтального контакту.

При впровадженні додаткової низькорозмірної контактної мережі контактний опір прийме вигляд:

$$R_{\text{к}} = R_{\text{тил.к.}} + R_{\text{фронт.к.о.к.}} + R_{\text{фронт.к.д.к.}} + R_{\rho_{\text{тил.к.}}} + R_{\rho_{\text{фронт.к.о.к.}}} + R_{\rho_{\text{фронт.к.д.к.}}}, \quad (15)$$

де $R_{\text{тил.к.}}$ – опір металізації тильного контакту; $R_{\text{фронт.к.о.к.}}$ – опір металізації фронтального основного контакту; $R_{\text{фронт.к.д.к.}}$ – опір металізації фронтального додаткового контакту; $R_{\rho_{\text{тил.к.}}}$ – опір розтікання тильного контакту; $R_{\rho_{\text{фронт.к.о.к.}}}$ – опір розтікання фронтального основного контакту; $R_{\rho_{\text{фронт.к.д.к.}}}$ – опір розтікання фронтального додаткового контакту.

Після дослідження поверхні композицій, спрощення задачі формалізації розрахунків і наведення формул для контактної опору в роботі були визначені величини опору розтікання і металізації згідно з еквівалентними схемами, що були отримані раніше.

При цьому розрахунок опору розтікання відбувався за формулами, які використовуються для різних видів контактів всієї поверхні СЕ, що наведено в табл. 4 [4,8].

Таблиця 4

Розрахунок опору розтікання для кожного виду контакту [4,8]

Вид контакту						
Формули розрахунку опору розтікання (R_{ρ})	$\frac{1}{3} \cdot \frac{\rho l_1}{w l_2}$	$\frac{1}{12} \cdot \frac{\rho l_1}{w l_2}$	$\frac{256}{\pi^6} \cdot \frac{\rho l_1 l_2}{w (l_2^2 + l_1^2)}$	$\frac{256}{\pi^6} \cdot \frac{\rho}{w} \cdot \frac{l_1 l_2}{(4l_1^2 + l_2^2)}$	$\frac{64}{\pi^6} \cdot \frac{\rho}{w} \cdot \frac{l_1 l_2}{(l_1^2 + l_2^2)}$	$\frac{1}{8\pi} \cdot \frac{\rho}{w}$ (не залежить від радіуса)

Оскільки геометричний смисл від цього не змінюється, то для порівняння та аналізу опорів розтікання і металізації їх було визначено для всієї площі фронтального боку СЕ з площею СЕ 3Ч1,7 мм², а розмір фрактограм складав 600Ч700 нм².

Опір розтікання СЕ визначався для АСМ, а потім розраховувався для всієї площі СЕ за формулами [4]:

$$\text{– для } \rho_{\text{Cu}} - R_{\rho 1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{256}{\pi^6} \cdot \frac{\rho}{w} \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4 \cdot l_1^2 + l_2^2}; \quad (16)$$

$$\text{– для } \rho_{\text{Al}} - R_{\rho 2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{256}{\pi^6} \cdot \frac{\rho}{w} \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4 \cdot l_1^2 + l_2^2}. \quad (17)$$

Для структур, що не мали в своєму складі додаткового контактної шару, опір розтікання визначався для схеми 2П-подібного основного контакту за формулою:

$$R_{\rho 3} = \frac{1}{2} \cdot \frac{256}{\pi^6} \cdot \frac{\rho}{w} \cdot \frac{l_1 \cdot l_2}{4 \cdot l_1^2 + l_2^2}.$$

Опір металізації був знайдений, згідно з еквівалентними схемами за фрактограмами і при врахуванні довжини та поперечного перетину провідника для низькорозмірної додаткової контактної мережі:

$$R_{\text{м}} = \rho \frac{1}{S}, \quad (18)$$

де ρ – питомий опір провідника, ОмЧмм; l – довжина провідника, мм; S – площа поперечного перетину провідника, мм². Результати, розраховані для СЕ, були занесені в табл. 5, де окрім розрахунків для додаткової контактної мережі залучені дані, отримані для основної контактної мережі СЕ, і порівняні між собою. При цьому СЕ мали паралельне з’єднання двох П-подібних контактів як основної контактної мережі, а СЕ зі структурою Cu/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO – як запобіжні заходи для зменшення дифузії міді, що призводить до зниження електричних характеристик. Попередньо змочували пластини кремнію розчином солі натрію в леткому органічному розчиннику. За цих умов дана операція зберегла час життя неосновних носіїв заряду порядку 100 мкс і зменшила закорочування структури під впливом дифузії атомів міді на декілька порядків.

Аналізуючи отримані результати, спостерігаємо найменші значення опору розтікання для структур з додатковим контактним шаром. Однак поряд з низькими опорами розтікання для них характерні високі значення опору металізації, що пов’язано з малою площею поперечного перетину провідників у наноструктурованій додатковій контактній мережі. Але якщо розглядати кожен такий провідник, він буде мати високий опір внаслідок малого перетину. Наприклад, в нашому випадку при товщинах 100, 150 і 200 нм такі провідники, якщо були б виготовлені з електролітичної міді, мали б опори 1417, 607 і 392 Ом відповідно. Далі зі схем при їх паралельному з’єднанні отримуємо опір металізації порядку 0,004905 Ом. Однак при застосуванні несучільних замкнених низькорозмірних контактних мереж з фталоцианінів міді з підвищеним значенням питомого опору опори металізації становили 2186, 938, 604 Ом відповідно при тих же товщинах. А при паралельному з’єднанні опір металізації дорівнює 0,036032 Ом. При цьому слід зазначити, що опір металізації фталоцианінів значно менший за опір мідь в структурі. Тому такі контактні системи можуть бути застосовані в фотовольтаїці для створення СЕ з великою площею, що є перевагою таких структур перед одиничними контактами.

Таблиця 5

Результати розрахунку опорів розтікання і металізації

№ п/п	Тип структури	Опір розтікання, R_{p1} , Ом	Уточнений опір розтікання, R_{p1} , Ом	Опір додаткової контактної мережі, R_{dk} , Ом	Уточнений опір додаткової контактної мережі, R_{dk} , Ом	Опір основної контактної мережі, R_{ok} , Ом	Опір металізації, R_m , Ом	Контактний опір R_k , Ом	Уточнений контактний опір, R_k , Ом
1	Cu/PcCu/ПК/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0002456	0,0003789	0,0555862	0,036032	0,0015178	0,0375498	0,0573496	0,0379287
2	Cu/ПК/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0004067	0,0004067	-	-	0,0015178	0,0015178	0,0019245	0,0019245
3	Cu/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0009489	0,0009489	-	-	0,0015178	0,0015178	0,0024667	0,0024667
4	Al/PcAl/ПК/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0005599	0,0006425	0,0985035	0,085848	0,0009987	0,0868467	0,1000622	0,0874892
5	Al/ПК/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0006181	0,0006181	-	-	0,0009987	0,0009987	0,0016168	0,0016168
6	Al/n-Si/p-Si/p ⁺ -Si/ITO	0,0014421	0,0014421	-	-	0,0009987	0,0009987	0,0024408	0,0024409

Зокрема, завдяки методиці визначення контактних опорів R_k розраховані опори металізації R_m і опори розтікання додаткових наноструктурованих контактних мереж і основних контактних мереж СЕ (R_{dk} і R_{ok}). Вони характеризуються найменшими значеннями опорів розтікання струму і найбільшими значеннями опору металізації для даних структур. Це підтверджується розрахунками, в яких R_p становить 25,884 % для структур Cu/PcCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і 42,86% для структур Cu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, відносно 100 % розтікання на Cu/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і 38,83 % для структур Al/PcAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і 42,86 % для структур Al/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO,

відносно 100 % розтікання на Al/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO. Опори металізації для структур з додатковим наноструктурованим контактним шаром відрізнялись у 3700 разів від структур без нього. Але вони були менші за опір шару ПК на 700 разів.

Таким чином, типова методика визначення опорів розтікання і металізації для наноструктурованих об'єктів складається з розгляду групи фрактограм АСМ з метою збору даних щодо розрахунку електричних характеристик. Слід зазначити, що фрактограму треба розглядати як можливий приклад розташування контактної мережі, яку згодом необхідно дублювати на певну кількість за площею SE. Також необхідно враховувати послідовне розташування даних ділянок і просумувувати їх результати.

7. Висновок

1. Вперше за моделлю поверхні замкнених несучільних середовищ як додаткових низькорозмірних контактних систем з композицій встановлені питомі електричні опори для металорганічних напівпровідників фталоціанінів, за якою плівки PсAl(OH)₂ мали $\rho = 0,030062 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$, а PсCu(OH)₂ - $\rho = 0,0266 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ при потоці зміщення струму 0,022333 К.

2. Удосконалено методику визначення опорів розтікання і металізації за фрактограмами АСМ, яка дозволяє експресно отримувати дані щодо електричних контактних характеристик композицій з нерівним профілем структури на основі пористого кремнію, що варіюється в межах 300 нм.

3. Доповнено наукові дані про значення опорів розтікання (R_p) і металізації (R_m) для структур Cu/PсCu/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і Al/PсAl/por-Si/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO, що характеризуються зниженням опору розтікання R_p в 4 і 2,6 разу відповідно та підвищенням опору металізації R_m в 3700 раз, відносно Cu/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO і Al/n-Si/p-Si/p⁺-Si/ITO.

Список літератури: 1. *Зубко Є.І.* Спосіб виготовлення контактного шару на антивідбиттєвому покритті сонячного елемента/Патент на корисну модель № 67830 (2012). Україна. 12.03.2012. Бюл. № 5, С. 4. 2. *Єрохов В.Ю.* Модифікування властивостей кремнійових функціональних пористих матеріалів для фотоелектричних перетворювачів: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Львів, 2013. 290 с. 3. *Зубко Є.І.* Вплив фотоанодування на морфологію та електрофізичні властивості шарів пористого кремнію, модифікованих HCl і HBr //Металургія: наукові праці Запорізької державної інженерної академії. Запоріжжя. 2012. Вип. 1 (26), С.117 - 120. 4. *Васильєв А.М., Ландсман А.П.* Полупроводниковые фотопреобразователи. М.: Сов. радио, 1971. 248 с.. 5. *Фаренбух А., Бьюб Р.* Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат. 1987. 280 с. 6. *Казакова Л.Л., Лебедев А.А., Лебедев Э. А.* Переходной ток, ограниченный пространственным зарядом в пористом кремнии // Физика и техника полупроводников. 1997. Т. 31, № 7. С. 609 - 614. 7. *Клнта О., Hlinomaz P., Hospodkovb A., Oswald J., Kouka J.* Electrophysical researches of porous silicon // J. of Non-Cryst. Solids. 1993. № 961. P. 164 – 166. 8. *Бордина Н.М., Зайцева А.К.* Выбор оптимальных размеров и нагрузки кремниевого фотоэлемента при различных вариантах токоотвода.// Радиотехника и электроника. 1965. Т. 10. С. 1356 - 1358. 9. *Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д.* Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. Ленинград: Наука. 1989. 310 с. 10. *Зубко Є. І.* Вплив розчинників на структурні та електричні властивості тонких плівок фталоціаніну міді, отриманих методом пульверизації// Праці Одеського політехнічного університету. 2012. Вип. 2 (39). С. 299 – 304.

Надійшла до редколегії 11.06.2015

Зубко Євгенія Іванівна, пров. фахівець кафедри мікроелектронних інформаційних систем Запорізької державної інженерної академії. Наукові інтереси: технологія виготовлення, дослідження і моделювання низькорозмірних структур для потреб фотовольтаїки і сенсорики. Адреса: Україна, 69000, Запоріжжя, вул. Добролюбова, 22, тел.: (061) 2393987. E-mail: evgeniya-zubko@mail.ru

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ НА ПЕРЕДІНВЕСТИЦІЙНОМУ ЕТАПІ ПРОГРАМИ РОЗВИТКУ

Пропонується оптимізаційна динамічна математична модель структури територіальної системи техногенної безпеки першого рівня ієрархії, а саме - об'єктової підсистеми техногенної безпеки, яка орієнтована на використання при реалізації концепції адаптивного управління програмою розвитку системи. Описуються основні обмеження на область допустимих розв'язків задачі. Турбулентність зовнішнього середовища системи враховується формалізацією стохастичних впливів небезпечних факторів можливої техногенної аварії на екологічну систему території.

1. Вступ

На теперішній час конфігурація програм розвитку об'єктових та територіальних систем техногенної безпеки (ТСТБ) базується, як правило, на використанні стаціонарних моделей, які не враховують динаміку зовнішнього середовища за період виконання програми. З іншого боку, на певних відрізках критичного шляху програми змінюються не тільки значення параметрів зовнішнього середовища, але і їх пріоритетність при прийнятті управлінського рішення. Це є причиною низького рівня об'єктивності при реалізації комплексу заходів стосовно формування оптимального складу та структури ТСТБ як продукту програми розвитку. Підвищення ефективності використання обмежених людських, фінансових, матеріальних, часових та інших видів ресурсів, залучених до виконання програми, можна досягти шляхом розробки конструктивних засобів адаптивного управління програмами розвитку ТСТБ, які враховують зміни параметрів впливу зовнішнього середовища у часі. Одним з можливих шляхів є розробка динамічної моделі оптимальної структури і параметрів ТСТБ, яка є узгодженою з етапами виконання програми модернізації.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Виділимо основні публікації результатів досліджень з даної проблематики [1-7].

Стаття [1] присвячена побудові формалізованого опису основних елементів та значущих факторів системи техногенної безпеки регіону, яка функціонує у взаємодії з динамічним зовнішнім середовищем. В роботі [2] запропоновано оптимізаційну математичну модель структури і параметрів системи техногенної безпеки потенційно небезпечних об'єктів як продукту програми розвитку з урахуванням характеристик множини небезпечних впливів можливої надзвичайної ситуації на навколишнє природне середовище та населення регіону.

В дослідженні [3] вся численність заходів щодо забезпечення техногенної безпеки території, які входять до компетенції ТСТБ, розділена на 2 типи за засобами їх реалізації. Пасивними заходами є раціональні технічні і технологічні параметри на етапі проектування або реконструкції потенційно небезпечних об'єктів (ПНО). До активних заходів забезпечення техногенної безпеки віднесено створення ефективних об'єктових СТБ (ОСТБ) і ТСТБ в цілому завдяки реалізації оптимальної структури і параметрів ТСТБ з врахуванням особливостей регіону в динаміці розвитку на заданому горизонті планування. Публікація [4] присвячена засобам моделювання і методу розв'язання динамічної задачі управління обмеженими ресурсами проекту.

В [5] запропоновано підхід до формування оптимального складу складної технічної системи на стадії її проектування. Стаття [6] присвячена побудові та аналізу математичної моделі оптимізаційної задачі визначення структури складної технічної системи, яка функціонує в умовах впливу зовнішнього середовища. В роботі [7] наведено оцінку якості за критерієм «ефективність-вартість» функціонування складних організаційно-технічних систем.

Отже, аналіз літературних джерел свідчить про значний інтерес до проблеми створення систем техногенної безпеки, оптимальних по заданим критеріям забезпечення потрібного рівня безпеки потенційно небезпечних об'єктів та регіону в цілому. В сучасних умовах

нестабільної економіки та жорсткого обмеження наявних ресурсів розв'язання даної проблеми вимагає зміни підходів до питань побудови та реалізації програм розвитку ТСТБ. Це питання має вирішуватися комплексно, починаючи із вдосконалення методів обробки так званої "якісної", тобто експертної інформації щодо поточного стану складної організаційно-технічної системи, якою є ТСТБ, та конструктивних засобів математичного моделювання оптимального складу і параметрів ТСТБ, узгоджених із різними етапами програми розвитку системи в умовах впливу зовнішнього середовища з параметрами, що змінюються у часі. Ця методологія є підґрунтям реалізації принципів адаптивного управління програмою розвитку ТСТБ.

Метою дослідження є побудова математичної моделі динамічної задачі визначення оптимальної структури територіальної системи техногенної безпеки.

3. Побудова динамічної математичної моделі

Розглянемо задачу побудови оптимальної структури ТСТБ, що функціонує в умовах ймовірнісних впливів зовнішнього середовища протягом заданого інтервалу часу $[t_0, t_0 + T]$. Далі без втрати спільності вважатимемо $t_0 = 0$. Зовнішнім середовищем ТСТБ є сукупність N ПНО території, що розглядається. Кожен з ПНО задається кортежем $SV_t^h, h = \overline{1, N}, t \in [0, T]$ параметрів свого поточного стану, які визначають можливість виникнення техногенної аварії (НС). Зовнішнє середовище ТСТБ складає безліч U небезпечних факторів впливу можливої НС на h -му ПНО на довкілля та населення території вигляду $U = \{U^h\}, h = \overline{1, N}$, де $U^h = \{u_n^h\}, i = \overline{1, N_h}$, або $U = \{u_n\}, n = \overline{1, N}$, де $N = \sum_h N_h$. Враховуючи ієрархічний характер структури ТСТБ, в рамках даного дослідження основна увага приділяється рівню ПНО, тобто ОСТБ.

Структура S деякої ОСТБ визначається набором компонентів $Z(U) = \{z_m\}, m = \overline{1, M}$, що протидіють впливам небезпечних факторів U можливої НС на довкілля та населення території: $S = S(Z)$. Розглядаючи період $[0, T]$ як період проектування і реалізації програми розвитку ТСТБ, покладемо набір компонентів $Z(U)$ незмінним. Разом з тим при моделюванні будемо вважати, що період часу $[0, T]$ розділений на інтервали $[t, t+1], t = \overline{0, T-1}$, на яких впливи зовнішнього середовища U постійні, тобто час є дискретною змінною.

Визначимо через E_{tm}^n ефективність протидії компонента z_m системи дестабілізуючому впливу u_n в період часу $[t, t+1]$. В цілому кожен елемент z_m набору $Z(U)$ можна охарактеризувати матрицею ефективності $E_m = (E_{tm}^n)_{t=\overline{1, T}, n=\overline{1, N}}$. Зміна характеру параметрів U у моменти t генерує зміну структури системи і необхідність включення до її складу нових компонентів $Z^{t, in}$, а також виключення компонентів $Z^{t, out}$, неефективних на наступному етапі, $Z^{t, in} \cup M \cup Z$.

Оскільки в ТСТБ мають включатися тільки ті компоненти, які протидіють хоча б одному дестабілізуючому впливу протягом заданого інтервалу часу $[0, T]$, то на елементи матриці E_m накладається така умова:

$$\sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N E_{tm}^n > 0. \quad (1)$$

Величини E_{tm}^n є безрозмірними і можуть бути визначені на підставі обробки статистичних даних або з використанням експертних оцінок [6, 7]. Відзначимо, що при реалізації певних етапів програми розвитку ТСТБ і зміни умов функціонування системи, тобто зміни значень характеристик SV_t^h величини E_{tm}^n також можуть змінюватися, як, власне, і їх кількість M , тобто $M = M(t)$ відповідно до вимоги (1).

Ендогенні змінні моделі. Використовуючи термінологію [2], позначимо через \bar{s}_t вектор, який визначає деякий варіант структури ОСТБ h -го ПНО в період часу t . Компоненти вектора \bar{s}_t в загальному випадку можуть приймати дискретну множину значень [2]. При цьому, якщо $s_{tm} = 0$, то компонент z_m відсутній у складі ОСТБ, що моделюється.

Припущення. Будемо далі вважати, що виконується така умова:

$$\exists t \in [0, T]: s_{(t-1)m} \neq s_{tm} \Rightarrow \forall \tau \in [t+1, T]: s_{t\tau} \geq s_{tm}. \quad (2)$$

Генезис розвитку складу ТСТБ представляється матрицею $\Sigma = (s_{tm})_{t=1, \overline{T}, m=1, \overline{M}}$, яка визначає склад ТСТБ протягом усього інтервалу часу $[0, T]$. Рядками матриці S є вектори \bar{s}_t .

Екзогенні параметри моделі. На побудову ТСТБ необхідно затратити безліч ресурсів $\mathfrak{R} = \{r_j\}$, $j = \overline{1, J}$, включаючи матеріальні, фінансові, часові та ін. Ресурси \mathfrak{R} витрачаються як на включення в структуру системи нових компонентів Z^{t-in} , так і на виключення неефективних компонентів Z^{t-out} зі структури системи. Нехай для включення нового компонента в систему потрібно c_{jm} одиниць ресурсу r_j , а на вилучення з системи компонента z_m з Z^{t-out} необхідно b_{jm} одиниць цього ресурсу. Вартість ρ_{jt} одиниці ресурсу r_j є функцією часу та

дорівнює $\rho_{jt} = \rho_{j0}(1 + \xi)^t$, де ξ – відсоткова ставка. Тоді величини $c_{mt} = \sum_{j=1}^J c_{jm} \cdot \rho_{jt}$ і

$b_{mt} = \sum_{j=1}^J b_{jm} \cdot \rho_{jt}$ визначають вартість включення (вилучення) компонента z_m відповідно.

Зауваження. При проектуванні оптимального варіанту ТСТБ доцільно враховувати також витрати на експлуатацію компонентів в системі протягом терміну її амортизації.

Вплив зовнішнього середовища. Розглянемо моделювання впливу u_n в умовах ризику.

Позначимо через l_{ti} випадкову величину, яка в грошовому вираженні характеризує ступінь впливу u_i зовнішнього середовища на систему в період часу t . Величина l_{ti} може приймати велику кількість значень $L_{ti} = \{l_{ti}^{b_{ti}}\}$, $b_{ti} = \overline{1, B_{ti}}$, з ймовірностями $p_{ti}(l_{ti}^{b_{ti}})$, $0 \leq p_{ti}(l_{ti}^{b_{ti}}) \leq 1$. Для кожного впливу зовнішнього середовища виконується умова нормування:

$$\sum_{b_{ti}=1}^{B_{ti}} p_{ti}(l_{ti}^{b_{ti}}) = 1.$$

Оцінка наслідків впливів зовнішнього середовища v_{ti} , представлена в грошовому вираженні, для умов ризику має вигляд: $v_{ti} = \sum_{b_{ti}=1}^{B_{ti}} l_{ti}^{b_{ti}} \cdot p_{ti}(l_{ti}^{b_{ti}})$.

Підсумовуючи сказане вище, поставимо задачу визначення оптимальної структури системи за заданим критерієм якості $F(E, b, c, \Sigma, v)$:

$$F(E, b, c, \Sigma, v) \rightarrow \underset{G \in R^M}{\text{extr}}, \quad (3)$$

де G - безліч допустимих розв'язків задачі.

Аналіз системи обмежень. Множина G допустимих розв'язків оптимізаційної задачі (3) формується системою обмежень, що поряд з обмеженнями (1)-(2) містить такі умови:

– обмеження на величину ресурсів, які використовуються для побудови варіанту системи

$$C_{jt}(\Sigma) \leq C_{jt}^{\max}, \quad j = \overline{1, J}, \quad (4)$$

де C_{jt}^{\max} – наявна кількість j -го ресурсу у період часу t з урахуванням дисконту;

$$C_{jt}(\Sigma) = \sum_{m=1}^M (s_{(t-1)m} - s_{tm}) b_{jtm} + c_{jm} (s_{tm} - s_{(t-1)m}), \quad t = \overline{1, T};$$

– обмеження на сумарну вартість варіанту системи

$$C(\Sigma) \leq C^{\max}, \quad (5)$$

де C^{\max} – загальна кількість ресурсів, доступна для побудови варіанту системи;

$$C(\Sigma) = \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{jt}(\Sigma) p_{jt};$$

– обмеження на мінімальний допустимий рівень ефективності компонентів системи з протидії дестабілізуючим впливам навколишнього середовища:

$$\exists i | E_{tim} > E_{tig} \text{ для } \forall m, g | m \neq g, s_{tm}^k = 1, s_{tg}^k = 1; \quad (6)$$

– обмеження на мінімальний допустимий рівень ефективності системи з протидії дестабілізуючим впливам навколишнього середовища:

$$E_{ti}^k \geq E_{ti}^{\min}, \quad (7)$$

де E_{ti}^{\min} – мінімальна допустима ефективність протидії варіанту системи i -му впливу навколишнього середовища в період часу t .

– обмеження по можливих сполученнях компонентів системи [5]

$$\text{для } \forall t \ o_{km}(s_{tk} + s_{tm}) \leq s_{tk} s_{tm} \ \forall t, \quad (8)$$

де $o_{km} \in \{0, 1\}$ – елемент матриці O забороненого поєднання компонентів системи, причому $o_{km} = 1$ визначає можливість одночасного використання компонентів z_k та z_m у складі системи.

Для визначення структури критерію $F(E, b, c, \Sigma, v)$ можна використовувати форму відомих критеріїв, що дозволяють тим або іншим чином оцінити економічну ефективність функціонування різних систем техногенної безпеки, наприклад, критерій максимуму середньорічного запобігання збитків; критерій економії від збитку; критерій мінімізації сумарних витрат на оснащення та експлуатацію систем безпеки [2].

4. Висновки та напрямки подальших досліджень

Розглянуто побудову динамічної стохастичної моделі оптимальної структури ОСТБ. В цілому сформульована задача (5) є задачею дискретної (дискретно-неперервної) багатокритеріальної оптимізації. Її розв'язання засноване на використанні методу послідовного аналізу варіантів. Зважаючи на ієрархічний характер побудови ТСТБ, параметри \bar{s}_h^* опти-

мальної структури h -го СТБ ПНО, $h = \overline{1, H}$, у сукупності є екзогенними для задачі визначення оптимальних характеристик ТСТБ на рівні території. Такий підхід дозволяє організувати ітераційний алгоритм визначення бажаних параметрів продукту програми розвитку ТСТБ.

Список літератури: 1. *Попов В.М.* Концептуальное представление системы техногенной безопасности региона / В.М. Попов, И.А. Чуб, М.В. Новожилова // Системи управління, навігації та зв'язку. 2012. Вип. 3(23). С. 206-209. 2. *Попов В.М.* Оптимізація структури системи техногенної безпеки на етапі формування місії програми її розвитку / В.М. Попов // Науковий вісник НЛТУ України. 2015. Вип. 25.4. С. 363-367. 3. *Попов В.М.* Структура имитационной модели устойчивости производственной системы с потенциально опасными объектами / В.М. Попов, М.В. Новожилова // Радиоэлектроника и информатика. 2014. №4. С. 24-29. 4. *Чуб И.А.* Постановка и решение оптимизационной динамической задачи управления ограниченными ресурсами проекта / И.А. Чуб, А.С. Иванилов, М.В. Новожилова // Проблемы машиностроения. 2010. Т. 4, №2. С. 79-85. 5. *Новожилова М.В.* Методы выбора варианта построения автоматизированной системы предупреждения чрезвычайных ситуаций / М.В. Новожилова, К.А. Овечко // Проблемы надзвичайних ситуацій. 2006. Вип. 4. С. 172-178. 6. *Овечко К.А.* Динамическая задача определения оптимальной структуры сложной технической системы / К.А. Овечко // Науковий вісник будівництва. 2007. Вип. 43. С. 48-51. 7. *Новожилова М.В.* Оценка систем защиты информации в компьютерных информационных системах по критерию “эффективность-стоимость” / М.В. Новожилова, К.А. Овечко // Системи обробки інформації. 2004. Вип. 1. С. 115-119.

Надійшла до редколегії 11.06.2015

Попов Вадим Михайлович, канд. техн. наук, доцент, проректор Національного університету цивільного захисту України. Наукові інтереси: управління проектами та програмами розвитку складних організаційно-технічних систем. Адреса: Україна, 61000, Харків, вул. Чернишевського, 94, тел. 706-20-49

ТЕХНОЛОГИЯ НАСЛОЕНИЯ БИТОВЫХ ЗОН В МЕТОДЕ КРИПТОСЕМАНТИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПЛАВАЮЩЕЙ СХЕМЫ

Исследуется метод криптосемантического представления изображений на основе плавающей схемы полиадического кодирования в базисе по верхним границам. Метод представляет собой комбинированную систему для скрытия видеоинформационного ресурса на основе технологий устранения избыточности с сохранением целостности и оперативности доставки информации. Рассматривается процесс наслоения битовых зон в разработанном методе с позиции скрытия видеоинформационного ресурса.

1. Введение

Существующие системы компрессионного преобразования изображений [1, 2] не соответствуют требованиям относительно создания комбинированных систем, стойких к несанкционированному дешифрированию. Это обусловлено такими проблемными недостатками: наличие остаточной и собственной избыточности в скрытом представлении изображений; отсутствие криптографических механизмов перемешивания и рассеивания; невозможность разделения информационной и служебной составляющей компрессионного представления; наличие зависимости служебной части от информационной; отсутствие значимого влияния служебной компоненты на информационную; зависимость технологической структуры компрессионного представления от их степени насыщенности; снижение коэффициента сжатия в зависимости от повышения степени насыщенности изображения.

Поэтому, сокращение времени на цифровую обработку и доставку видеоданных, повышение уровня защиты семантической информации, передаваемой на основе изображений является актуальной научно-прикладной задачей.

Необходимо разработать систему компрессии на принципиально новой основе. Одним из таких подходов является организация систем сжатия на основе полиадического кодирования [3–6].

Цель исследования заключается в изучении влияния криптографических механизмов перемешивания и рассеивания в процессе наслоения битовых зон в методе криптосемантического представления изображений на основе плавающей схемы системы полиадического кодирования в базисе по верхним границам.

2. Основная часть

Исходное изображение разбивается на фрагменты размерностью $m \times n$, где m – количество строк фрагмента изображения, а n – количество столбцов. Фрагмент изображения рассматривается как двумерная матрица $A = \{a_{i,j}\}$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, которую можно преобразовать в одномерный вектор:

$$A = \{a_{i,j}\} = \{a_{\tau}\}_{\tau=\overline{1, mn}} = \{a_{m(j-1)+i}\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

На предварительном этапе определяется система оснований $G^{(m)} = \{g_i\}$, $i = \overline{1, m}$, исходного фрагмента изображения по строкам. Основание элементов i -й строки g_i определяется как максимальный элемент строки исходного массива, увеличенный на 1:

$$g_i = \max_{1 \leq j \leq n} (a_{i,j}) + 1 = \max_{1 \leq j \leq n} (a_{m(j-1)+i}) + 1. \quad (2)$$

Для удобства проведения расчетов и для определения взаимно-однозначного соответствия элементов фрагмента изображения с основаниями предлагается расширить систему

оснований до мощности исходного фрагмента изображения в одномерном векторном виде. Для этого воспользуемся формулой:

$$S^{(m \times n)} = \{s_\tau\} = \{g_{\tau-m \lfloor \frac{\tau-1}{m} \rfloor}\}, \quad \tau = \overline{1, mn}. \quad (3)$$

Процесс представления данных в полиадической системе в базе по верхним границам на основе плавающей схемы задается следующими выражениями:

$$N = \sum_{\tau=1}^Q a_\tau V_\tau; \quad (4)$$

$$V_\tau = \begin{cases} \prod_{\xi=\tau+1}^Q s_\xi = \prod_{\xi=\tau+1}^Q g_{\xi-m \lfloor \frac{\xi-1}{m} \rfloor}, & \tau < Q; \\ 1, & \tau = Q, \end{cases} \quad (5)$$

$$Q \leq mn, \quad (6)$$

где Q – плавающее количество элементов полиадического числа, принимающих участие в формировании кода-номера в базе по верхним границам на основе плавающей схемы с учетом проверки на переполнение кодового слова; $\lfloor \bullet \rfloor$ – целая часть.

Рассмотрим процесс формирования битов кодограммы кода-номера с учетом особенностей полиадического кодирования. Для этого необходимо учитывать, что значение кода-номера записывается как накопленная сумма величин $a_\tau V_\tau$, т.е.:

$$N = a_1 V_1 + \dots + a_\tau V_\tau + \dots + a_{Q_{np}} V_{Q_{np}} = a_1 V_1 + \dots + a_\tau V_\tau + \dots + a_{Q_{np}}. \quad (7)$$

Тогда процесс формирования кодограммы кода-номера в полиадической системе можно рассматривать как процесс наложения (наложения) битовых зон $C_\tau = \{a_\tau V_\tau\}_2 = \{a_{m(j-1)+i} V_{m(j-1)+i}\}_2$ (рис. 1):

$$C(A) = N_2 = \{a_1 V_1\}_2 + \dots + \{a_\tau V_\tau\}_2 + \dots + \{a_{Q_{np}}\}_2 = \sum_{\tau=1}^{Q_{np}} C_\tau, \quad (8)$$

где N_2 – двоичная запись значения кода-номера, определяющая содержание выходной кодограммы; $\{a_1 V_1\}_2$ – двоичная запись величины $a_1 V_1$, на базе которой формируется основная первая битовая зона C_1 длиной, равной q_1 бит; $\{a_\tau V_\tau\}_2$ – двоичная запись величины $a_\tau V_\tau$, определяющая $(\tau = m(j-1) + i)$ -ю битовую зону C_τ длиной, равной q_τ двоичных разрядов; $\{a_{Q_{np}}\}_2$ – двоичная запись, на базе которой формируется последняя битовая зона $C_{Q_{np}}$ длиной, равной $q_{Q_{np}} = \lceil \log_2 a_{Q_{np}} \rceil + 1$ двоичных разрядов.

Длина $q_\tau = q_{m(j-1)+i}$ битовой зоны C_τ вычисляется как количество разрядов на представление величины $a_\tau V_\tau$:

$$q_\tau = \lceil \log_2 a_\tau V_\tau \rceil + 1. \quad (9)$$

Начальная (первая) битовая зона C_1 имеет самую большую длину $q_1 = \lceil \log_2 a_1 V_1 \rceil + 1$ и по мере добавления новых битовых зон C_τ их длина уменьшается, если значение элемента исходного фрагмента изображения a_τ не равно нулю:

$$\lceil \log_2 a_1 V_1 \rceil + 1 > \dots > \lceil \log_2 a_\tau V_\tau \rceil + 1 > \dots > \lceil \log_2 a_{Q_{np}} \rceil + 1, \text{ если } a_\tau > 0. \quad (10)$$

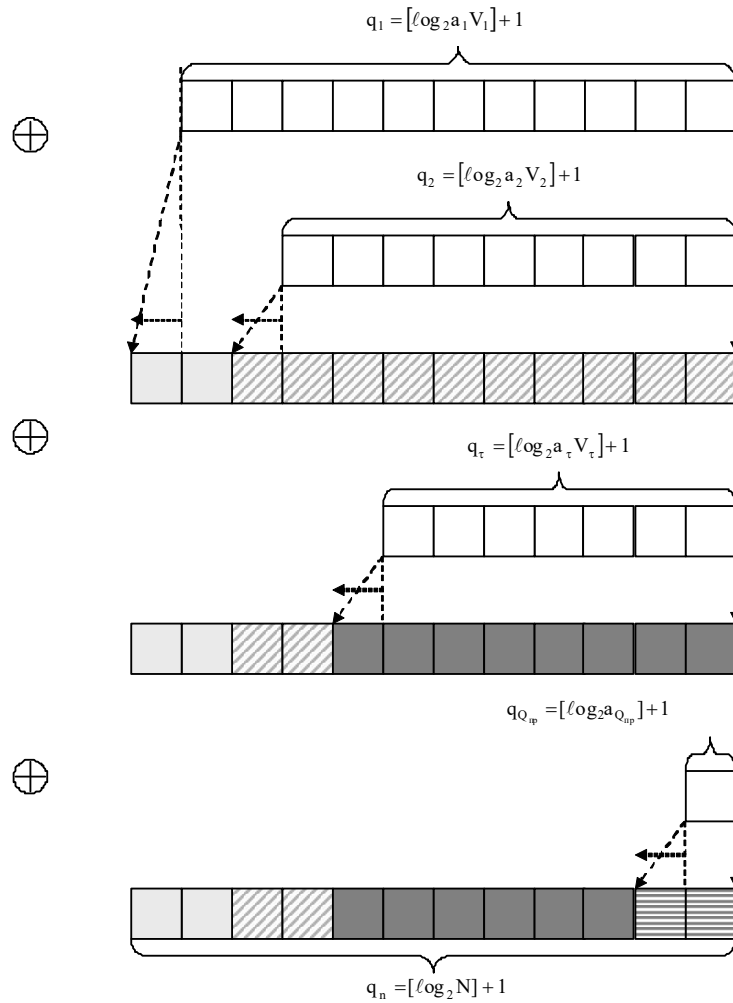


Рис. 1. Схема наложения битовых зон в процессе формирования кодограммы для полиадической системы

На рис. 1 приняты следующие обозначения: \oplus – операция наложения битовых зон на основе сложения двоичных чисел; \leftarrow – направление растяжения битовой зоны в сторону старших разрядов в результате операции сложения двоичных чисел (при сложении двоичных чисел 1+1 дает результат 0 в текущем разряде и 1 переносится в старший разряд); пустые клетки – исходное состояние начальной (первой) и добавляемых битовых зон; разноцветные клетки – изменение состояния начальной (первой) битовой зоны в результате наложения (наслоения) битовых зон друг на друга.

Действительно, исходя из соотношения (4) $V_\tau \geq V_{\tau+1}$; тем, что учитывая что $V_\tau = V_{\tau+1}$ только тогда, когда $s_{\tau+1} = g_{\tau-m \left[\frac{\tau-1}{m} \right] + 1} = 1$, а это, исходя из соотношений (2) и (3), возможно

только тогда, когда все элементы $(i+1)$ -й строки исходной матрицы фрагмента видеоданных $a_{(i+1),j}$, включая $a_{\tau+1} = a_{m(j-1)+i+1}$, равны нулю. Соответственно, если значение элемента фрагмента изображения $a_{\tau+1}$ равно нулю, то и сама битовая зона $C_{\tau+1}$ тоже принимает нулевое значение, а соответственно и длина этой битовой зоны тоже равна нулю.

Суммарное значение кодов-номеров, последующих за N_τ , исходя из соотношения (4) можно определить с помощью выражения:

$$N_{\tau+1} = \sum_{\xi=\tau+1}^{Q_{np}} a_{\xi} V_{\xi}, \quad \tau = \overline{1..Q_{np}}. \quad (11)$$

При этом значение элемента фрагмента изображения, исходя из соотношений (2) и (3), не превышает величину максимального основания:

$$a_{\tau} \leq s_{\tau} - 1 = g_{\tau-m \left[\frac{\tau-1}{m} \right]} - 1.$$

Следовательно, соотношение (5) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} N_{\tau+1} &\leq \sum_{\xi=\tau+1}^{Q_{np}} (s_{\tau} - 1) V_{\xi} = \sum_{\xi=\tau+1}^{Q_{np}} (s_{\tau} V_{\xi} - V_{\xi}) = \sum_{\xi=\tau+1}^{Q_{np}} (V_{\xi-1} - V_{\xi}) = \\ &= (V_{\tau} - V_{\tau+1})(V_{\tau+1} - V_{\tau+2}) \dots (V_{Q_{np}-2} - V_{Q_{np}-1})(V_{Q_{np}-1} - V_{Q_{np}}) = V_{\tau} - V_{Q_{np}} = V_{\tau} - 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Отсюда, значение весового коэффициента, участвующего в формировании более младшей зоны, превышает суммарное значение кодов-номеров более младших битовых зон как минимум на 1:

$$V_{\tau} \geq N_{\tau+1} + 1, \quad \tau = \overline{1..Q_{np}}. \quad (13)$$

Наложение битовых зон основано на операции сложения, в битовом виде заключающейся в переносе битов из младших разрядов в старшие. Процесс наложения битовых зон заключается в пошаговом изменении начальной (первой) битовой зоны C_1 .

При наложении битовых зон влияние элементов старшей битовой зоны $C_{\tau+1}$ на младшую C_{τ} и первую C_1 происходит в области младших разрядов начальной битовой зоны C_1 на длину, не меньшую длины $q_{\tau+1}$ старшей битовой зоны, если переноса битов из младших разрядов в старшие не происходит, и на длину $(q_{\tau+1} + 1)$ – в противном случае.

Перенос битов из младших разрядов в старшие заканчивается при достижении первого нулевого бита в старших разрядах младшей C_{τ} или первой C_1 битовой зоны.

Изменению не подвергается только отрезок младшей битовой зоны длиной не более, чем $q_{\tau} - q_{\tau+1} = \lceil \log_2 a_{\tau} V_{\tau} \rceil - \lceil \log_2 a_{\tau+1} V_{\tau+1} \rceil$ бит.

Битовая зона C_{τ} формируется на основе последовательности значимых двоичных разрядов, отводящихся для представления результата умножения значения элемента исходного фрагмента изображения a_{τ} на весовой коэффициент V_{τ} :

$$C_{\tau} = \{a_{\tau} V_{\tau}\}_2 = \left\{ a_{\tau} \prod_{\xi=\tau+1}^{Q_{np}} s_{\xi} \right\}_2 = \left\{ a_{\tau} \prod_{\xi=\tau+1}^{Q_{np}} g_{\xi-m \left[\frac{\xi-1}{m} \right]} \right\}_2. \quad (14)$$

Формирование битовой зоны C_{τ} основано на выполнении операции умножения, которая в битовом виде может быть представлена как последовательное выполнение операций битового сдвига и битового суммирования. При этом формирование весового коэффициента основано на выполнении $Q_{np} - (\tau + 1)$ операций умножения. Схема построения битовой зоны в процессе формирования кодограммы для полиадической системы представлена на рис. 2.

Более наглядно наложение битовых зон можно рассмотреть на основе рекуррентной схемы построения кода-номера (рис. 3):

$$N_1 = a_1; \quad (15)$$

$$N_{\tau} = N_{\tau-1} s_{\tau} + a_{\tau} = N_{\tau-1} g_{\tau-m \left[\frac{\tau-1}{m} \right]} + a_{\tau}, \quad (16)$$

где N_{τ} , $N_{\tau-1}$ – код-номер для τ -го и $(\tau - 1)$ -го элементов.

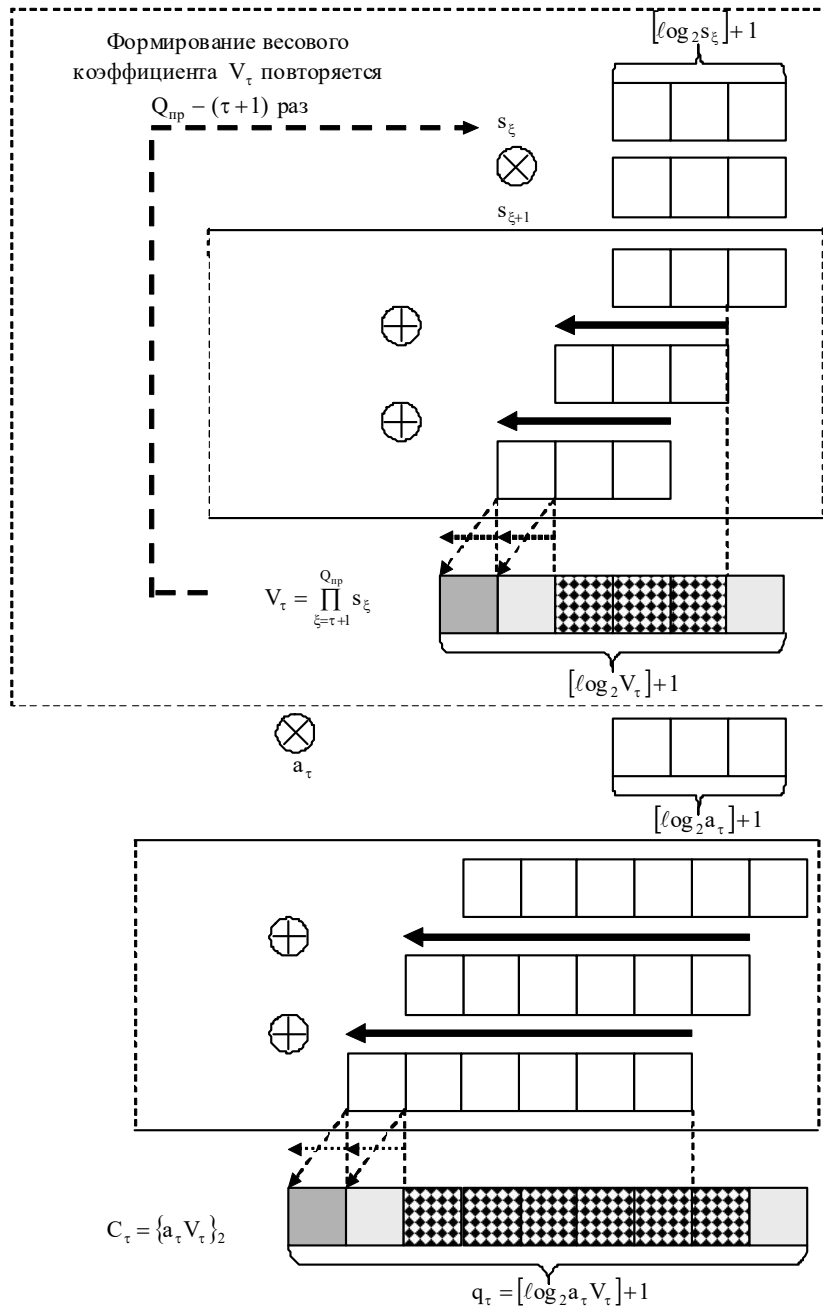


Рис. 2. Схема построения отдельной битовой зоны в процессе формирования кодограммы

На рис. 2. приняты следующие обозначения: \otimes – операции умножения двоичных чисел; \oplus – операции сложения двоичных чисел; \leftarrow – операция битового сдвига; $\leftarrow \dots$ – направление единичного сдвига в сторону старших разрядов в результате операции сложения двоичных чисел (при сложении двоичных чисел 1+1 дает результат 0 в текущем разряде и 1 переносится в старший разряд); \square – исходное (не измененное) значение блока битовых данных или битовой зоны; \blacksquare – блок битовых данных или битовой зоны, полученный на основе перемешивания значений бит в результате наложения (наслоения) битовых зон друг на друга или битовых операций над блоками; \square – блок битовых данных или битовой зоны, который может остаться без изменения в результате наложения битовых зон или битовых операций над блоками; \blacksquare – дополнительный блок битовых данных или битовой зоны, полученный в результате добавочного сдвига в сторону старших разрядов в результате операции сложения двоичных чисел.

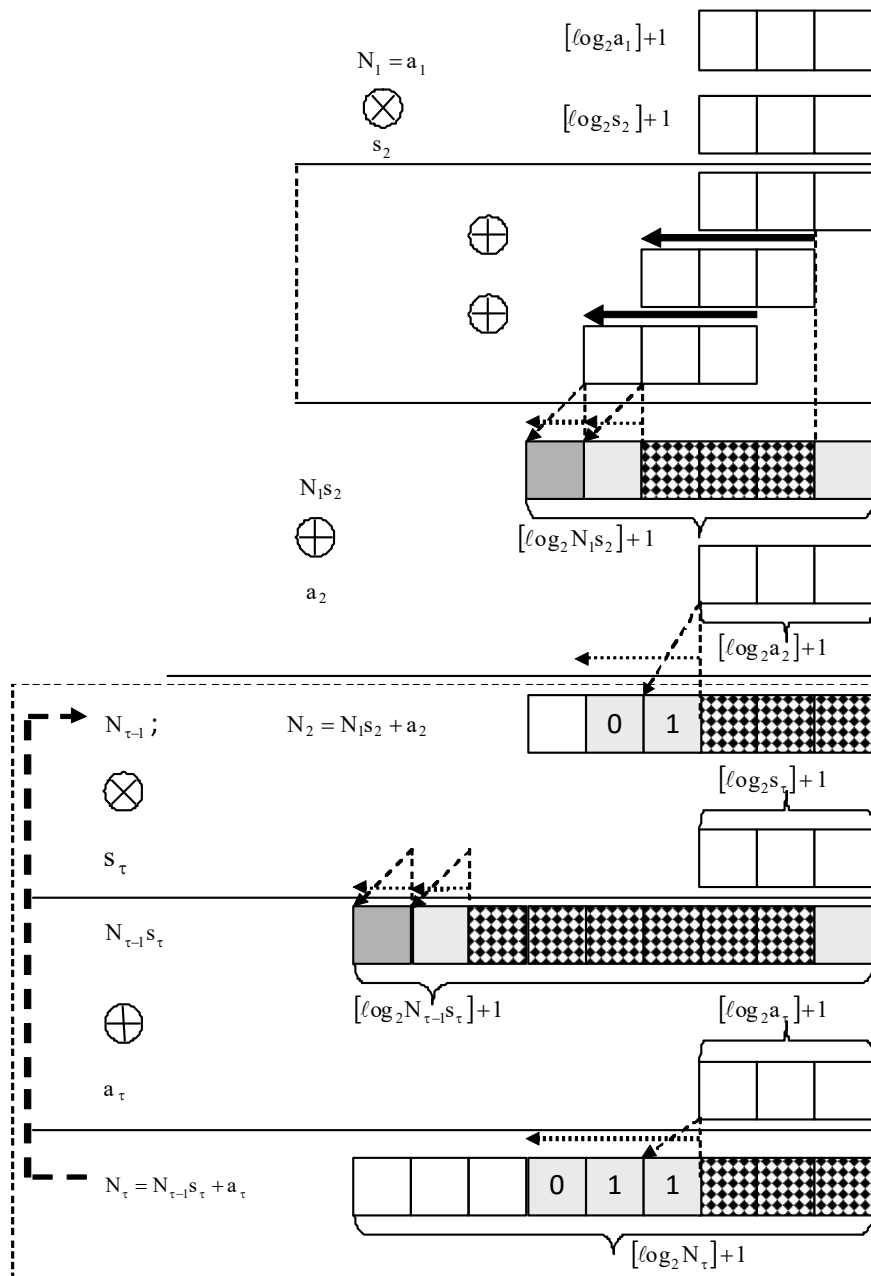


Рис. 3. Схема наложения битовых зон в процессе формирования кодограммы на основе рекуррентной схемы

В процессе наложения (наложения) битовых зон друг на друга достигается перемешивание двоичных разрядов. Результат перемешивания будет тем эффективнее, чем больше отличаются разряды кода-номера на логическом уровне от значений исходных элементов изображений. На уровне кодового представления оценка эффективности перемешивания определяется специальными тестами, используемыми в криптографических системах. В этом случае полная информация в доступном виде будет содержаться в двоичном числе, так как запись числа в двоичном виде и есть его кодовое представление на физическом уровне. Например, такая ситуация возникает при рассмотрении значений отдельных пикселей.

Механизм рассеивания позволяет реализовать распространения влияния одного элемента исходного сообщения на множество двоичных разрядов кодограммы, вплоть до все

элементы кодограммы. Такое свойство обеспечивает скрытие статистических свойств открытого в смысловом плане фрагмента изображения.

Данное свойство обеспечивается в результате:

- одновременного перемешивания на логическом и на физическом уровнях представления кодограммы полиадической системы;
- неравномерного рассеивания двоичных разрядов за счет многослойного смещения битовых зон относительно младших разрядов кодограммы как следствие их наложения друг на друга;
- добавления старшего разряда относительно начальной битовой зоны кодограммы.

3. Выводы

В процессе наложения (наложения) битовых зон друг на друга реализованы криптографические механизмы рассеивания и перемешивания двоичных разрядов, которые обеспечивают:

- одновременное перемешивание на логическом и на физическом уровнях представления кодограммы полиадической системы;
- неравномерное рассеивание двоичных разрядов за счет многослойного смещения битовых зон относительно младших разрядов кодограммы как следствие их наложения друг на друга;
- добавление старшего разряда относительно начальной битовой зоны кодограммы.

Разработанный метод криптосемантического представления изображений на основе плавающей схемы полиадического кодирования в базисе по верхним границам обеспечивает:

- одновременное выполнение процессов сжатия и шифрования (кодирования) видеоданных;
- исключение избыточности одновременно без внесения погрешности;
- уменьшение количества незначимых элементов (незначимых нулевых бит) в начале каждой битовой последовательности кодов-номеров;
- формирование кодограмм равномерной длины на основе переменного (заранее неопределенного) количества элементов исходного изображения;
- дополнительное снижение исходного объема изображений.

Список литературы: 1. *Миано Дж.* Форматы и алгоритмы сжатия изображений в действии: учебное пособие / Дж. Миано; пер. с англ. М. : Триумф, 2003. 336 с. 2. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. М. : Техносфера, 2005. 1073 с. 3. *Баранник В.В.* Методология создания криптографических преобразований на базе методов исключаящих избыточность / В.В. Баранник, С.А. Сидченко, В.В. Ларин // Сучасна спеціальна техніка. 2009. №4. С. 5-17. 4. *Королева Н.А.* Обоснование комбинированной системы сжатия и шифрования видеоданных в инфокоммуникационных системах / В.В. Баранник, С.А. Сидченко, В.В. Ларин // Збірника наукових праць УкрДАЗТ. 2010. Вип. 116. С. 61-65. 5. *Barannik V.V.* The Model of Avalanche – relating effect in the process of images reconstruction in the combined cryptosemantic systems on the base of Polyadyc presentation / V.V. Barannik, S.A. Sidchenko, V.V. Larin // Наукоємні технології. 2010. № 1(5). С. 68-70. 6. *Баранник В.В.* Метод криптосемантического представления изображений на основе комбинированного подхода / В.В. Баранник, С.А. Сидченко, В.В. Ларин // Сучасна спеціальна техніка. 2010. Вип. 3 (22). С. 33-38.

Поступила в редколлегию 10.06.2015

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. 050-303-89-71.

Сидченко Сергей Александрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник научного центра Харьковского университета Воздушных Сил. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. 066-299-82-73.

Тупица Иван Михайлович, заместитель начальника учебно-тренировочного комплекса Харьковского университета Воздушных Сил. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Сумская, 77/79, тел. 096-795-57-39.

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЛЕКЦИИ ЗНАЧИМЫХ ОБЪЕКТОВ КАДРА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВИДЕОПОТОКА В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКИМИ СИТУАЦИЯМИ

Описывается селективный метод обработки видеоданных, который основан на закрытии не всего базового видеокadra, а только его наиболее значимых составляющих. Энергетическая значимость этих составляющих оценивается по степени семантической и структурной насыщенности блоков яркостной составляющей, входящих в ее состав. Впервые вводится понятие структурной единицы. Она формируется из трех макроблоков по одному от каждой цветовой составляющей YCrCb базового видеокadra. Также разрабатывается методологическая база для определения энергетической значимости структурной единицы видеокadra на основе оценки информации, содержащейся в суммарных значениях низкочастотных компонент трансформанты дискретного косинусного преобразования блока яркостной составляющей.

1. Введение

В ведомственных телекоммуникационных системах сегодня происходит активное внедрение различных мультимедийных сервисов и услуг (защищенные системы видеоконференцсвязи, трансляции потокового видео). Для этих систем являются актуальными проблемы по обеспечению:

- качественной видеоинформации;
- конфиденциальности (скрытие информации от неавторизированных пользователей);
- целостности (предотвращение возможности изменения информации);
- оперативности доставки видеоданных.

Существуют различные технологии и решения, которые применяются для защиты видеоданных. Однако применяемые методы имеют такие недостатки:

- закрытие видеопотока происходит не в он-лайн режиме;
- ограничения, накладываемые на производительность вычислительных систем, не позволяют применять современные методы сжатия и шифрования;
- объем закрытых видеоданных зачастую значительно превышает объем исходных.

Процесс шифрования может быть реализован на разных этапах формирования, обработки и передачи видеоданных [1,2], а именно:

- 1) до сжатия видеопотока;
- 2) после того, как сформировано компрессионное представление видеоданных;
- 3) в процессе сжатия.

Вариант с шифрованием исходных данных до сжатия обладает следующими недостатками:

- не учитывается сокращение избыточности в исходных видеоданных;
- после сжатия происходит увеличение первоначального объема видеоданных в результате разрушения структуры видеопотока из-за предварительного шифрования;
- увеличение объема сжатого представления шифрованных видеоданных влечет за собой увеличение времени на передачу этих данных в канале связи.

Вариант с применением шифрования к уже сжатым видеоданным позволяет сократить предварительную избыточность исходного видеопотока и снизить время на шифрование. Он обеспечивает высокий уровень закрытия информации, но при этом имеет существенные недостатки:

- при ошибках в канале связи происходит размножение ошибок;
- криптографической обработке подлежит вся видеоинформация, из-за чего увеличивается суммарное время обработки формируемых видеоданных на передающей стороне и время обработки видеоданных на принимающей стороне.

Поэтому для устранения недостатков предлагается применять вариант, в котором данные закрываются в процессе их сжатия – селективный подход.

При использовании селективного подхода, основанного на закрытии базового I-кадра, с одной стороны, выполняются требования по обеспечению конфиденциальности и целостности видеoinформационного ресурса. Но с другой – реализация такого подхода приводит к увеличению интенсивности передаваемых закрытых видеоданных, в результате чего снижается пропускная способность закрытого видеоканала. Это делает невозможным выполнение требований, установленных для ведомственных систем видеоконференцсвязи по обеспечению необходимой пропускной способности скрытого канала. В этом случае снижается эффективность проведения ведомственных сеансов видеоконференцсвязи.

Удельный вес закрытого базового кадра значительно (до 80%) влияет на интенсивность всей группы видеокадров. Это объясняется тем, что процесс сжатия с помощью алгоритма MPEG после закрытия I-кадра практически отсутствует. Такое происходит в результате разрушения статистических, психовизуальных, структурных закономерностей в процессе шифрования.

Значит, необходимо дополнительно снизить интенсивность закрытого видеопотока в условиях обеспечения требуемой достоверности и конфиденциальности.

Таким образом, целью исследования является разработка метода, обеспечивающего снижение пропускной способности закрытого видеоканала для систем видеоконференцсвязи.

2. Основное содержание исследования

Селективный подход, основанный на закрытии I-кадра, относится к варианту межкадровой селекции. Межкадровая селекция находится на уровне структуры потока видеокадров, где закрытию подлежит не весь видеоряд, а определенное количество кадров. В таком подходе закрытия основным недостатком является увеличение интенсивности (снижение пропускной способности видеоданных до 70%). Поэтому для повышения пропускной способности предлагается дополнительно рассматривать подход, основанный на закрытии видеопотока на базе внутрикадровой селекции.

Под понятием внутрикадровой селекции подразумевается закрытие не всего видеокадра, а только значимых $S_{зн}$ его составляющих. Таким образом, видеокадр K_I представляет собой множество Ψ значимых $S_{зн}$ и незначимых $S_{незн}$ составляющих:

$$K_I = \Psi_{зн} \cup \Psi_{незн},$$

где $\Psi_{зн} = \{S_{зн}^{(1)}, \dots, S_{зн}^{(s)}, \dots, S_{зн}^{(|\Psi_{зн}|)}\}$, а $\Psi_{незн} = \{S_{незн}^{(1)}, \dots, S_{незн}^{(s)}, \dots, S_{незн}^{(|\Psi_{незн}|)}\}$, $\Psi_{зн}$ – множество значимых составляющих; $|\Psi_{зн}|$ – количество значимых составляющих в множестве значимых составляющих; $\Psi_{незн}$ – множество незначимых составляющих; $|\Psi_{незн}|$ – количество незначимых составляющих в множестве незначимых составляющих.

Под значимой $S_{зн}$ составляющей понимается такая составляющая базового видеокадра, которая несет в себе наибольшую семантическую и структурную информативность. В процессе автоматической селекции значимых $S_{зн}$ составляющих предлагается учитывать структурные особенности формирования видеопотока. Для этого предлагается выделять наиболее значимые $S_{зн}$ составляющие на основе цветовой модели видеокадра.

Для селекции значимых структурных единиц $S_{зн}$ предлагается выявлять наиболее информативные, в плане структурного и семантического содержания, составляющие базового кадра. Поскольку наиболее полную информацию несет яркостная составляющая видеокадра K_I , то значимые структурные единицы предлагается выявлять на базе яркостных компонент. Поэтому принятие решения по закрытию структурной единицы предлага-

ется осуществлять по результатам анализа информационной составляющей совокупности блоков $V(Y)_\varphi^{(\xi,\gamma)}$ яркостной составляющей.

Для определения энергетической насыщенности блоков $V(Y)_\varphi^{(\xi,\gamma)}$ предлагается ввести понятие блоков трех типов:

- слабонасыщенные блоки (блоки, в которых присутствуют равномерные участки изображения);
- средней насыщенности (блоки, в которых имеются незначительные отличия между пикселями, соответственно присутствуют плавные переходы контрастности);
- сильнонасыщенные блоки (блоки, в которых присутствуют резкие переходы яркости и контрастности изображения).

Энергетическую насыщенность блоков предлагается определять после ДКП. С помощью дискретного косинусного преобразования осуществляется переход от пространственно-временного представления видеокadra в пространственно-спектральное. Компоненты трансформанты ДКП являются интегральными характеристиками структурного содержания фрагмента изображения, причем интегральные свойства компонент зависят от их положения в трансформанте (рис 1). На рис. 1 представлено расположение низкочастотных

и высокочастотных компонент трансформанты ДКП в блоках $V(Y)_\varphi^{(\xi,\gamma)}$ яркостной составляющей макроблока.

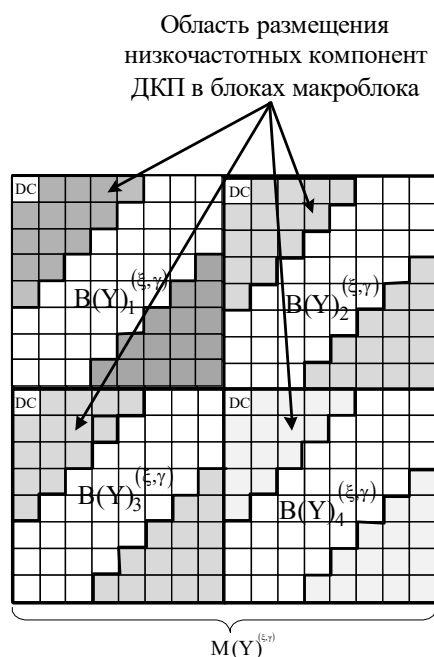


Рис. 1. Схема расположения низкочастотных и высокочастотных компонент трансформанты ДКП в блоках $V(Y)_\varphi^{(\xi,\gamma)}$ яркостной составляющей макроблока

Из рис. 1 видно, что низкочастотные компоненты находятся в области первых пяти диагоналей, среднечастотные компоненты расположены в пределах пятой-девятой диагоналей, а высокочастотные компоненты – между девятой и тринадцатой диагоналями.

Интегральная зависимость компонент трансформанты ДКП выглядит следующим образом:

1. Значения компонент в верхнем левом углу трансформанты ДКП пропорциональны средней яркости изображения. Они характеризуют степень насыщенности блока изображения низкочастотными перепадами. К ним относят ступенчатые изменения уровня яркости или координаты цвета.

2. Компоненты в средней части трансформанты определяют степень насыщенности блока изображения линейными, равномерными изменениями уровня яркости.

3. Значения компонент в нижней правой области трансформанты ДКП характеризуют степень насыщенности высокочастотными перепадами блока изображения. К высокочастотным перепадам относят импульсные изменения значений элементов изображений.

Поэтому можно сделать вывод о том, что энергией блока называется величина, характеризующая наличие неоднородно визуальных контуров блока изображения.

Значения компонент изменяются по мере преобладания в изображении различных структурных особенностей.

Широкий класс изображений содержит в основном линейные, монотонные и ступенчатые структурные изменения уровня яркости. Импульсные изменения занимают меньшую площадь изображения. Кроме того, они могут быть вызваны шумами дискретизации. Поэтому наибольшие значения имеют компоненты, расположенные в верхней левой части трансформанты. Компоненты в нижней части трансформанты соответствуют высокочастотным изменениям и поэтому имеют меньшие значения.

На рис. 2 показано расположение компонент в трансформанте ДКП блока яркостной составляющей видеокadra.

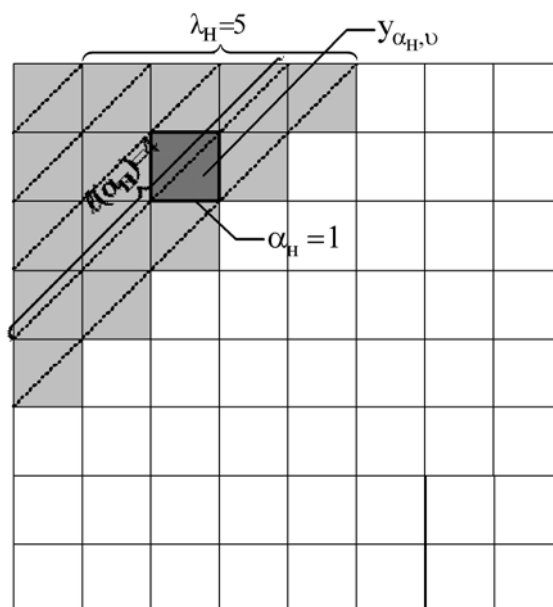


Рис. 2. Схема расположения компонент в трансформанте ДКП блока яркости видеокadra

Для трансформанты ДКП в сильнонасыщенных блоках изображения характерны следующие особенности:

– значения компонент ДКП уменьшаются по диагональному зигзагу слева - направо, сверху – вниз;

– компоненты ДКП с большими значениями сконцентрированы в относительно малой области трансформанты. Компоненты с минимальными значениями занимают большую площадь трансформанты;

- при большой площади изображения, имеющей мало изменяющуюся яркость, размер области трансформанты с большими значениями компонент имеет маленькую площадь.

Предлагается оценивать структурную и семантическую информативность структурной единицы с позиции спектральных характеристик. Очевидно, что чем больше размер однородной яркостной площади и чем меньше площадь, заполненная мелкими деталями, тем меньше степень структурной и семантической информативности обрабатываемого блока видеокadra. Наоборот, чем чаще яркостные перепады и чем больше площадь, отводимая под мелкие детали и контурные перепады, тем выше структурная и семантическая информативность. В связи с этим для оценки значимости структурных единиц предлагается использовать информацию, содержащуюся в спектральном представлении изображения.

Для определения блоков с выраженными яркостными ступенчатыми перепадами предлагается использовать информацию, содержащуюся в совокупности низкочастотных компонент. Такую информацию предлагается оценивать с помощью показателя $Z(B_n)_\varphi^{(\xi, \gamma)}$ суммарных значений низкочастотных компонент, которые находятся в первых 4-х диагоналях ($1 \leq \lambda_n \leq 5$). Показатель $Z(B_n)_\varphi^{(\xi, \gamma)}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$Z(B_n)_\varphi^{(\xi, \gamma)} = \frac{\log_2 \sum_{\alpha_n=1}^{\lambda_n} \sum_{v=1}^{\ell(\alpha_n)} y_{\alpha_n, v}^2}{\sum_{\alpha_n=1}^{\lambda_n} \ell(\alpha_n)}, \quad (1)$$

где $Z(B_n)_\varphi^{(\xi, \gamma)}$ – показатель, который определяет суммарное значение низкочастотных компонент ДКП блока $B(Y)_\varphi^{(\xi, \gamma)}$ яркости; $y_{\alpha_n, v}$ – значение компоненты трансформанты; λ_n – количество диагоналей с низкочастотными компонентами в трансформанте; v – индекс элемента внутри α_n -й диагонали; α_n – индекс низкочастотной λ_n -й диагонали; $\ell(\alpha_n)$ – длина низкочастотной α_n -й диагонали.

Выражение (1) позволяет определить наличие значительных яркостных перепадов в блоках яркости.

3. Выводы

1. Разработана технология, позволяющая выявлять наиболее энергетически значимые структурные единицы базового видеокadra, которая базируется на оценке информации, содержащейся в низкочастотных компонентах трансформанты ДКП блока яркостной составляющей.

2. Разработана система показателей (метрика) для выявления наиболее значимых блоков яркостной составляющей видеокadra по степени семантической и структурной насыщенности на основе оценки информации, содержащейся в суммарных значениях низкочастотных компонент трансформанты ДКП. Использование метода внутрикадровой селекции, основанного на закрытии наиболее значимых структурных единиц, позволяет снизить интенсивность закрытого видеoinформационного ресурса на 30-70% по сравнению с закрытием всего базового видеокadra.

Получил дальнейшее развитие способ селекции значимых составляющих кадра на основе оценки степени их информативности. Отличительной характеристикой данного способа является оценка информативности для структурных единиц в спектральной области на основе иерархии порогового взвешивания низкочастотных составляющих. Это создает условие для закрытия видеопотока на основе технологии внутрикадровой селекции.

Список литературы: 1. *Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео М.: Диалог-Мифи, 2003. 381с. 2. *Ричардсон Ян* Видеокodирование. H.264 и MPEG-4 — стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005. 368с. 3. *Баранник В.В.* Кодирование трансформированных изображений в инфокоммуникационных системах. Х.: ХУПС, 2010. 212 с. 4. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.

Поступила в редколлегию 26.05.2015

Баранник Владимир Викторович, д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба. Научные интересы: системы, технологии преобразования, кодирования, защиты и передачи информации, семантической обработки изображений. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

Комолов Дмитрий Иванович, главный специалист отдела связи Главного управления Национальной полиции в Харьковской области. Адрес: Украина, 61000, Харьков, ул. Совнаркомовская, 5.

Тарасенко Анатолий Васильевич, соискатель, Черкасский институт пожарной безопасности им. Героев Чернобыля.

Мусиенко Александр Павлович, адъюнкт Харьковского университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба. Адрес: Украина, 61023, Харьков, ул. Сумская, 77/79.

КОМПРЕССИЯ СИЛЬНОНАСЫЩЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ УОЛША В СИСТЕМАХ МОНИТОРИНГА ЗЕМЛИ

Обосновывается направление повышения степени сжатия сильнонасыщенных изображений. Излагаются основные этапы метода компактного представления трансформант ортогональных преобразований на основе сокращения статистической избыточности.

1. Введение

Система сбора и передачи информации на основе аэрокосмического мониторинга – это одна из важнейших составляющих общегосударственных географических информационных систем, что обуславливает необходимость использования в них самых современных технологий обработки и передачи информации. Основным элементом для передачи в аэрокосмическом мониторинге являются статические изображения местности, которые представляют собой фотореалистичные, имеющие большое количество мелких деталей и соответственно сильнонасыщенные изображения. Следовательно, общий объем данных такого рода информации будет достигать сотни Мбит, что не всегда соответствует низкой пропускной способности существующих каналов передачи в системах аэрокосмического мониторинга и может привести к невозможности своевременной доставки информации [1 - 4]. Поэтому цель исследования заключается в необходимости разработки метода сжатия сильнонасыщенных изображений для уменьшения объемов видеоданных при заданном уровне качества для обеспечения соответствий пропускной способности существующих каналов передачи данных.

2. Разработка метода сжатия сильнонасыщенных изображений

Критерий эффективности подсистемы обработки и передачи данных должен строиться с учетом времени, затрачиваемого на сжатие $T_{сж}$, времени восстановления $T_{в}$ изображений и времени передачи $T_{п}$ сжатых изображений по каналам связи. Также для оценки качества необходимо использовать среднеквадратический показатель погрешности для выполнения алгоритма сжатия/восстановления изображения. Следовательно, выражение для критерия эффективности примет вид:

$$T_{и} = T_{сж} + T_{п} + T_{в} . \quad (1)$$

Поэтому метод сжатия, для которого, с одной стороны, выполняется равенство: $\delta^{разр} \approx \delta^{сущ}$, а с другой – одна из систем неравенств:

$$K_{сж}^{разр} \geq K_{сж}^{сущ} ; (T_{сж} + T_{в})^{разр} < (T_{сж} + T_{в})^{сущ} ; \quad (2)$$

$$K_{сж}^{разр} \leq K_{сж}^{сущ} ; (T_{сж} + T_{в})^{разр} < (T_{сж} + T_{в})^{сущ} ,$$

$$T_{и}^{разр} < T_{и}^{сущ} , \quad (3)$$

будет эффективным.

Методы, учитывающие психовизуальную избыточность и двумерные корреляционные зависимости в обрабатываемых блоках изображений, позволяют обеспечить наибольшую степень сжатия данных [1-3]. Поэтому предлагается использовать ортогональные преобразования как основу для совершенствования методов сжатия. Это позволит: снизить степень корреляционных зависимостей; повысить неравномерность распределения; распределить погрешность преобразования внутри блока.

Если в качестве критерия использовать сложность машинной реализации, то при обработке сильнонасыщенных изображений применение базиса кусочно-постоянных функций является более эффективно по сравнению с базисом тригонометрических функций. Это возникает из-за сложности практической реализации и оценивается временной сложностью аппроксимации последовательности элементов изображений.

Поэтому предлагается разработать метод сжатия изображений, основанный на совершенствовании тех методов, которые базируются на основе двумерных ортогональных преобразований и энтропийном кодировании.

Для решения поставленной задачи предложен метод сжатия изображений, который включает дискретное ортогональное преобразование Уолша. При этом исходное изображение предварительно разбивается на блоки размерностью 16x16 пикселей. Полученные трансформанты кодируются с помощью целочисленного арифметического преобразования Уолша. Это позволяет достичь значения коэффициента сжатия для сильнонасыщенных изображений в среднем до 3,2.

Дополнительно повышение значения коэффициента сжатия достигается при использовании классификационного кодирования трансформант преобразования Уолша. Он реализован на основе перегруппировки весовых коэффициентов низкочастотных составляющих трансформант в отдельный массив и проводит отдельную обработку высокочастотных и низкочастотных составляющих трансформант. Это дает возможность учитывать различия в их динамических диапазонах и позволяет увеличить коэффициент сжатия в среднем на 20%, что, в свою очередь, приводит к снижению объема данных изображений, поступающих в канал связи.

Следовательно, при использовании ортогонального преобразования Уолша, кроме снижения степени статистических взаимосвязей, существенно снижается психовизуальная избыточность.

Предлагается вести построение процесса сжатия изображений с предварительной разбивкой исходного изображения на блоки размерностью 16x16 пикселей и дальнейшей их обработкой с помощью дискретного ортогонального преобразования Уолша:

$$Y(n, n) = \frac{1}{n^2} F_y(n) X(n, n) F_y(n) ; F_y(k, \ell) = (-1)^{\sum_{\xi=0}^{\log_2 n - 1} v_{\xi}(k) \ell_{\xi}} ; \quad (4)$$

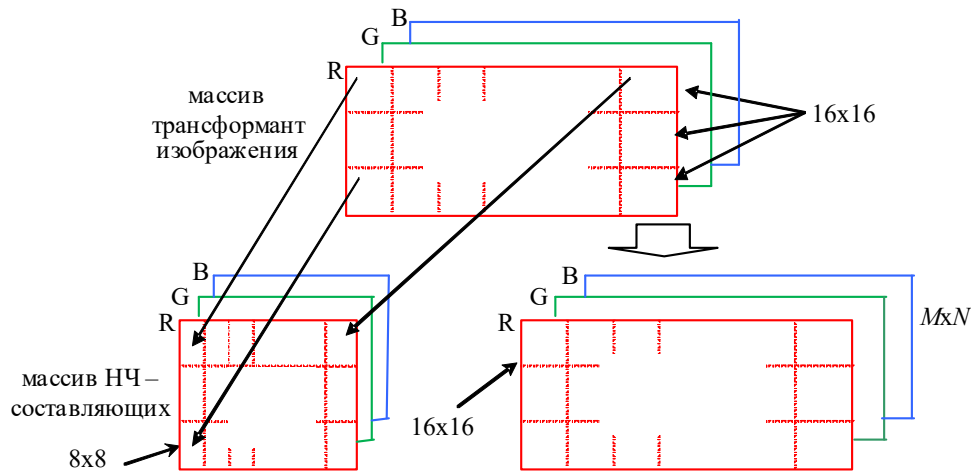
$$k, \ell = \overline{0, n - 1} ; v_0(k) = k_{q-1} ; v_1(k) = k_{q-1} + k_{q-2} ,$$

где $Y(n, n)$ – трансформанта ортогонального преобразования Уолша размерностью $n \times n$; $X(n, n)$ – массив размером $n \times n$, составленный из элементов исходного изображения; $F_y(n)$ – столбец матрицы дискретных значений базисной функции преобразования Уолша; $v_0(k)$ – учитывает особенности трансформант ДПУ, заключающиеся в том, что [4]:

1) низкочастотные и высокочастотные составляющие трансформант ДПУ содержат разный значимый объем информации. Максимальное значение компоненты приходится на элемент матрицы, расположенный в верхнем левом углу;

2) законы распределения вероятностей появления значений низкочастотных и высокочастотных компонент трансформант преобразования ДПУ реалистических изображений эффективно аппроксимируются соответственно нормальным законом и законом распределения Релея.

Учитывая рассмотренные особенности, предлагается осуществлять отдельную обработку низкочастотных и высокочастотных компонент (рисунок).



Разделение массива трансформант изображения на НЧ- и ВЧ- составляющие из трансформант Уолша

До такой разбивки количество информации $H_{тр}$ в трансформанте ДПУ равнялось [58, 59]:

$$H_{тр} = -n^2 H_{тр}^{(y)} = -n^2 \sum_{y(k;l)=0}^{S_{тр}} P(y(k;l)) \log_2 P(y(k;l)) , \quad (5)$$

где $S_{тр}$ – мощность трансформанты, равная количеству различных значений компонент;

$H_{тр}^{(y)}$ – количество информации, приходящееся в среднем на одну компоненту ДПУ.

Поскольку значение, которое принимает низкочастотная составляющая, отличается от значений других трансформант, то, в случае разделения трансформанты, количество информации $H_{тр}^{(b)}$ в оставшихся компонентах будет равно

$$H_{тр}^{(b)} = -(n^2 - 1) \sum_{y(k;l)=0}^{S_{тр}-1} P(y(k;l)) \log_2 P(y(k;l)) , \quad (6)$$

т.е.

$$H_{тр} = H_{тр}^{(b)} + P(y(1;1)) \log_2 P(y(1;1)) . \quad (7)$$

Поскольку $P(y(1;1)) = \frac{1}{n^2}$, то соотношение (7) примет вид

$$H_{тр} = H_{тр}^{(b)} + \frac{1}{n^2} \log_2 \frac{1}{n^2} . \quad (8)$$

Из сравнения выражений (5) и (8) вытекает, что

$$H_{тр} > H_{тр}^{(b)} . \quad (9)$$

Для того чтобы количество информации $H^{(h)}$, содержащееся в низкочастотной составляющей $y(1;1)$, удовлетворяло условию

$$H^{(h)} < P(y(1;1)) \log_2 P(y(1;1)) , \quad (10)$$

требуется осуществить дополнительную обработку низкочастотных составляющих. Для этого необходимо учитывать то, что низкочастотные составляющие являются характеристикой средней яркости в фрагменте изображения. При этом данная характеристика локальных фрагментов является относительно однородной для соседних частей кадра

изображения. В связи с этим предлагается формировать массивы низкочастотных компонент. На рисунке также представлен механизм извлечения коэффициентов низкочастотных спектральных составляющих из трансформант размерностью 16x16 пикселей в отдельные матрицы размерностью 8x8 пикселей (размерность исходного изображения цветовой модели RGB 128x128 пикселей). При выборе способа обработки низкочастотных компонент необходимо учитывать то, что человеческий глаз воспринимает реалистическое изображение по частоте цветовых границ. Отсюда следует важность низкочастотных коэффициентов трансформанты ДПУ. Следовательно, потеря части низкочастотных коэффициентов может привести к значительной потере информации.

Поэтому предлагается осуществлять сжатие массивов низкочастотных составляющих на основе исключения статистической избыточности путем их арифметического кодирования. Количество информации $H^{(H)}$, приходящееся на один элемент матрицы низкочастотных составляющих, равно

$$H^{(H)} = - \sum_{y(k;\ell)=0}^{S_M^{(H)}} P_H(y(k;\ell)) \log_2 P_H(y(k;\ell)), \quad (11)$$

где $S_M^{(H)}$ – мощность массива низкочастотных компонент, равная количеству различных значений компонент; $P_H(y(k;\ell))$ – вероятность появления низкочастотной компоненты со значением $y(k;\ell)$.

Такая обработка позволяет увеличить коэффициент сжатия на 20%. Сравнительная оценка разработанного и известных методов сжатия изображений представлена в таблице.

Зависимость качества сжатого/восстановленного изображения от типа исходных изображений

Тип изображения (коэффициент корреляции)	Сильнонасыщенные (0,7)			Средненасыщенные (0,85)			Слабонасыщенные (0,95)		
	JPEG	JPEG-2000	разработ.	JPEG	JPEG-2000	разработ.	JPEG	JPEG-2000	разработ.
Метод сжатия									
$K_{сж}$	2,5	4,1	4,11	7,5	6,6	6,61	62	47	54,7
Вpp	3,2	1,95	1,94	1,06	1,21	1,21	0,13	0,17	0,15
RMS, %	1,98	1,98	1,97	1,2	1,22	1,25	1,68	1,93	1,72
PSNR, дБ	45,1	45,1	5,2	7,3	47,3	47,1	5,9	45,3	45,8

3. Выводы

Разработанный метод сжатия, основанный на классификационном кодировании и преобразовании Уолша, обеспечивает:

1) В случае равенства RMS:

– выигрыш по коэффициенту сжатия относительно метода, реализованного в формате JPEG, для сильнонасыщенных изображений в среднем на 38 %;

– по сравнению с методом, реализованным в формате JPEG 2000, выигрыш по степени сжатия для слабонасыщенных изображений составляет в среднем 14 %, а для средне- и сильнонасыщенных изображений степень сжатия отличается незначительно (в среднем не превышает 1%).

2) Потеря качества сжатого/восстановленного изображения не превышает 2% по критерию RMS или не хуже 45 дБ по критерию PSNR, что не ощутимо для человеческого глаза.

3) Разработанный метод компрессии предусматривает только целочисленный тип арифметических операций, что существенно отражается на скорости выполнения алгоритма компрессии и снижении ошибок округления при вычислениях на ЭВМ по сравнению с существующими компрессорами.

4) Выигрыш по времени доведения сжатых изображений на основе разработанного метода относительно известных методов достигает в среднем 2 раза. Данный выигрыш обусловлен тем, что при незначительном отличии в коэффициенте сжатия сильнонасыщенных изображений в сравнении с методом JPEG-2000 для разработанного метода время обработки будет меньше минимум на 34%. При этом с ростом объемов передаваемых изображений и скорости передачи данных по каналу связи выигрыш по времени доведения для разработанного метода будет увеличиваться.

Список литературы: 1. *Ахмед Н., Рао К.Р.* Ортогональные преобразования при обработке цифровых сигналов / Под ред. И.Б. Фоменко. М.: Связь, 1980. 248 с. 2. *Бондарев В.Н., Трестер Г., Чернега В.С.* Цифровая обработка сигналов: методы и средства. Учебное пособие для вузов. Харьков: Конус, 2001. 398с. 3. *Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В.* Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2003. 384с. 4. *Красноруцкий А.А., Яценко С.Я.* Метод арифметического классификационного кодирования трансформант Уолша// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. Харьков: НАКУ «ХАИ», 2006. Вып. 31. С. 138-141.

Поступила в редколлегию 11.05.2015

Гуржий Павел Николаевич, начальник научно-исследовательского отдела электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств Научного центра связи и информатизации. Военный институт телекоммуникаций и информатизации. Научные интересы: обработка и сжатие изображений и видеоданных. Адрес: Украина, Киев, ул. Московская, 45/1, тел. 066-469-15-63.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ

Рассматриваются вопросы моделирования динамических аспектов распределенного представления знаний. Распределенное представление является основой многоуровневых архитектур, используемых при решении задач глубокого обучения. Предлагается модель процессов вычисления целевой функции для распределенного представления знаний. Модель задает множество состояний, составляющих представления знаний, допустимые отношения между ними, а также наборы допустимых переходов между состояниями. Модель обеспечивает возможность верификации процессов параллельных вычислений целевой функции для распределенного представления знаний.

Введение

Одной из важных проблем, которые возникают при формировании представления знаний для высоковариативных зависимостей посредством машинного обучения, является обобщающая способность. Данная проблема связана со способностью алгоритма обучения обобщать исходные данные, не входящие в обучающую выборку. Для обучающей выборки алгоритм обучения позволяет строить правильные зависимости, однако для тех объектов, которые в эту выборку не входят, вероятность ошибки значительно увеличивается.

В работах [1, 2] показано, что «плоские» архитектуры представления знаний имеют ряд недостатков, не позволяющих достичь требуемого уровня генерализации при решении задач, у которых число состояний значительно превышает число входных данных. В результате при применении таких архитектур возникает проблема переобучения. Поэтому в настоящее время активно развиваются так называемые глубокие архитектуры [1, 3-5], у которых закономерности распределяются по нескольким уровням, образуя иерархию абстрактных концепций или понятий. Такие архитектуры основаны на использовании распределенного представления знаний [6]. При практической реализации глубокие архитектуры требуют значительных вычислительных ресурсов, что и определяет актуальность проблемы обоснованного выбора количества элементов для представления знаний, а также распределения этих элементов по уровням представления.

Постановка задачи

Проблематика построения многоуровневых архитектур требует рассмотрения не только статических аспектов представления знаний (количество уровней, взаимосвязь элементов и т.п.), но и процессов функционирования распределенного представления при вычислении целевой функции. Последние являются процессами параллельных вычислений, что позволяет использовать соответствующие методы для формирования ограничений на архитектуру представления знаний.

Задача данного исследования заключается в разработке модели, позволяющей оценить темпоральные аспекты процесса вычисления целевой функции в рамках заданной архитектуры.

Модель процесса вычисления целевой функции

Для обоснования предлагаемого подхода к моделированию динамических аспектов распределенного представления знаний кратко уточним проблематику машинного обучения и связанные с ней особенности построения распределенного описания знаний с учетом свойств многоуровневых архитектур.

Машинное обучение представляет собой раздел искусственного интеллекта, связанный с построением обучающихся алгоритмов. Общая идея машинного обучения заключается в том, что по имеющемуся описанию прецедентов (т.е. по частным случаям) необходимо выявить такие закономерности, которые характерны не только для имеющегося множества прецедентов, но и для тех прецедентов, которые не вошли в выборку. Оценивание полученной модели выполняется с помощью заданной функции оценки качества [7, 8].

Целью машинного обучения (или обучения по прецедентам) является получение функции F , определяющей зависимости между множествами исходных данных (объектов, ситуаций, процессов) X и допустимых результатов (ответов, управляющих воздействий и т.п.) Y .

Целевая функция $Y = F(X)$ строится на основе известного подмножества пар $v_i = (x_i, y_i) \in V, x_i \in X^V, y_i \in Y^V, i = \overline{1, I}, X^V \subset X, Y^V \subset Y | \forall v_i x_i \notin (X - X^V)$, называемых прецедентами. Совокупность прецедентов составляет обучающую выборку W .

Традиционно для формализации прецедентов используется признаковое описание. Под признаком p понимают значение некоторой характеристики исходного объекта x_i . Формально признак можно представить через отображение, которое связывает обозначение j – признака i – исходного объекта $x_{i,j}^p$ с множеством его допустимых значений D^p :

$$x_{i,j}^p \rightarrow D^p | \forall p \exists D^p, D^p = \{d^p\}. \quad (1)$$

Тогда исходный объект, процесс, ситуация в системе ИИ отождествляется с его признаковым описанием:

$$x_i \equiv \{x_{i,j}^p\} | \forall x_{i,j}^p \exists d_{i,j}^p : \{d_{i,j}^p\} \subset (\times_p D^p). \quad (2)$$

Обучающая выборка, которая содержит набор исходных объектов в форме, доступной части признаков объектов x_i , описывается матрицей D размерности: $D = (d_{i,j}^p)_{i=1, j=1}^{I, J}$. Каждая строка матрицы содержит J значений признаков i – объекта из обучающей выборки.

Значение признака может отображать реальные характеристики объекта (как прямые, так и косвенные), а также некоторые абстрактные концепции, которые позволяют представить знания о его свойствах. В первом случае значение признака может быть измерено или вычислено (т.е. преобразовано в результате предварительной обработки результатов измерений). Основные типы значений: бинарные; конечное (упорядоченное) множество; количественные; изображения; графы, выборки из базы данных; функции. Дальнейшие рассуждения приводятся для признаков бинарного типа. Во втором случае для получения системы абстрактных концепций используются методы глубокого обучения, поскольку количество внутренних состояний S для полученного представления знаний будет значительно превышать количество элементов матрицы D . Плоские архитектуры в данном случае позволяют аппроксимировать целевую функцию, однако не решают проблемы генерализации.

Методология многоуровневого обучения связана с построением иерархии концепций для описания мира в системах искусственного интеллекта. В основе такой иерархии лежат наиболее простые концепции, знания более высокого уровня определяются в терминах их связей с концепциями нижележащих уровней. Данный подход позволяет системе искусственного интеллекта вывести более сложные знания из простых концепций, без формальной спецификации этих знаний человеком. В результате получается многоуровневая иерархия знаний, которая обеспечивает формализацию целевой функции F .

Задача обучения по прецедентам заключается в построении решающей функции α , которая бы на основе обучающей выборки W аппроксимировала функцию F на всем множестве исходных данных X . С учетом требований практической реализации эта функция должна представляться алгоритмом.

Основная проблема обучения, как уже отмечалось, связана с качеством работы алгоритма для новых исходных данных, не входивших в выборку W . Качество работы определяется через функцию потерь, которая принимает истинное значение только в том случае, если алгоритм α позволяет получить истинное значение для пары v_i . Очевидно, что для проверки истинности пары используется целевая функция F . Функция потерь принимает истинное значение в том случае, если значение y_i^* , полученное для исходного набора признаков x_i с помощью целевой функции, совпадает со значением y_i из пары v_i , либо же расхождение между ними не превышает заданного порога.

Рассмотренная проблематика машинного обучения показывает, что ограничения в применении типичных архитектур представления знаний для вариативных функций связаны в первую очередь с недостаточной глубиной архитектуры. Однако увеличение глубины архитектуры значительно повышает затраты при вычислении целевой функции.

Отметим, что возможности «плоского» представления ограничивает также принцип локальности функции оценивания[1].

Данная работа посвящена реализации подхода к моделированию динамических аспектов архитектуры, что позволяет обосновать выбор архитектуры достаточной глубины.

Рассмотрим возможности оценки глубины и сложности архитектуры в рамках предлагаемого подхода. Для определения глубины архитектуры схему вычисления функции F целесообразно представить в виде набора узлов обработки V^F и взаимосвязей между ними E^F . Тогда процесс получения функции F представляется ациклическим графом G^F :

$$G^F = (V^F = \{v_i\}, E^F = \{e_{i,j} \mid i \neq j\}). \quad (3)$$

Формализация процесса решения в виде графа G^F позволяет рассматривать его как граф потока управления и в этом качестве использовать для оценки глубины архитектуры. Поточковые графы широко применяются в области анализа программного обеспечения, в частности для оценки путей тестирования программного модуля или программной системы в целом[9, 10].

Адаптируем семантику потокового графа применительно к задаче оценивания глубины архитектуры. Граф G^F отражает управляющие потоки при вычислении функции F . Каждая вершина v_i графа соответствует одному атомарному вычислительному элементу архитектуры. Следует подчеркнуть, что в общем случае один вычислительный элемент может выполнять несколько последовательных действий, однако согласно данному подходу мы будем рассматривать это множество действий как одну процедуру и отражать его одной вершиной графа G^F . Дуги E^F отражают последовательность обработки при расчете целевой функции. Вершины графа могут быть двух типов: с одной или несколькими выходящими из вершины дугами. В первом случае в узле, моделируемом вершиной графа, выполняется линейная обработка. Во втором случае выбор подмножества последующих узлов зависит от выполнения условий, вычисляемых в текущей вершине. Для упрощения одну вершину второго типа можно разделить на несколько бинарных вершин, из которых выходят только две дуги. При таком подходе для определения глубины архитектуры выполняются следующие шаги:

- 1) выделение независимых путей π_k в потоковом графе в соответствии с условием:

$$\pi_k = \{(v_i, e_{i,j})\} \mid \forall k \pi_k \Delta \pi_{k+1} \neq \emptyset, k = \overline{1, K-1}, v_i, v_j \in V^F, e_{i,j} \in E^F, \quad (4)$$

- 2) выбор пути π_k^* с максимальным количеством вершин: $\pi_k^* : \forall l \neq k \mid \pi_k^* \cap V^F \mid > \mid \pi_l \cap V^F \mid$.

На первом шаге, как видно из условия (4), выявляются пути, которые отличаются хотя бы одной дугой. На втором шаге находится путь с максимальным числом обрабатываемых элементов.

Применение потокового графа для оценки глубины архитектуры позволяет оценить сложность распределенного представления знаний с учетом динамического аспекта. Действительно, при использовании потокового графа мы можем применять показатель O_π цикломатической сложности архитектуры, чтобы получить верхнюю оценку количества независимых путей для расчета целевой функции. Оценка цикломатической сложности представлена в работе [11]. Данная метрика имеет вид $O_\pi = \mid E^F \mid - \mid V^F \mid + 2$ для единственной архитектуры и $O_\pi = \mid E^F \mid - \mid V^F \mid + 2C$ – для набора из C архитектур. Количество независимых путей определяет и количество составляющих представления знаний. Так, при добавлении нового пути в алгоритм вычисления целевой функции мы добавляем, как минимум, дугу $e_{i,j}$, отображающую новую взаимосвязь между узлами вычислений. Иными словами, способы вычисления целевой функции зависят от порядка взаимодействия элементов распределенного представления знаний. Приведенные оценки позволяют вычис-

литель сложность архитектуры представления знаний в том случае, если нам известен граф G^F . Поэтому следующий шаг моделирования динамических аспектов представления знаний заключается в моделировании последовательности взаимодействия атомарных вычислительных элементов, отображаемых вершинами графа G^F . Предлагаемый подход основан на формализации переходов между вычислительными элементами. После каждого такого перехода изменяется состояние процесса вычисления целевой функции. Обобщая, можем утверждать, что модель представления знаний должна отображать как статические зависимости между вычислительными элементами, так и динамику изменения состояний при расчете F . Зависимости первого вида определяются выбранным математическим аппаратом для представления знаний: нейронные сети, деревья решений, ансамбли правил и т.п. Зависимости второго вида отражают темпоральные взаимосвязи между состояниями процесса вычислений, обеспечивающие в том числе параллельные вычисления и потому могут быть представлены на основе структур Крипке [12].

Модель представления знаний о процессе вычисления целевой функции определяется следующим образом:

$$M = (S_0, S = \{s_i\}, E(s_i, s_j) | s_i, s_j \in S, I, R), \quad (5)$$

где S - множество состояний элементов $v_i \in V^F$, реализующих отдельные процедуры по вычислению целевой функции F ; S_0 - множество начальных состояний; E - отношение переходов между состояниями s_i элементов v_i ; $I(s)$ - функция разметки (интерпретации), которая задает множество атомарных высказываний, истинных в состоянии s логических формул в модели M ; R - ограничения реализуемости (справедливости).

Каждый элемент v_i в рамках модели M считается атомарным, хотя и может выполнять некий алгоритм вычисления функции F или ее составляющих. Набор состояний S представляет собой множество оценок в форме атомарных высказываний об элементах v_i : $s_j(v_i)$ может быть либо истинным, либо ложным. Функция интерпретации задает истинность атомарных логических выражений для состояний s_i модели M . Ограничения реализуемости задают требования к внешней среде [13], а также позволяют отсеять заведомо нереалистичные действия (вычисления) при вычислении целевой функции [14]. В соответствии с предлагаемым подходом ограничения реализуемости позволяют задать подмножества недопустимых входных объектов.

Множество E обладает следующими свойствами. Во-первых, потоковый граф G^F является направленным, поскольку задает последовательность вычисления целевой функции. Поэтому данное множество содержит только отношение следования для вычислительных элементов. Во-вторых, при формировании представления знаний следует исключить циклы (граф должен быть ациклическим). Действительно, в общем случае не следует отрицать возможность использования циклов при вычислении целевой функции. Однако эти циклы не отображаются в модели по следующим причинам:

1) Циклические вычисления возможны в рамках вычислительного элемента. Однако, как уже отмечалось ранее, такой элемент считается атомарным в модели и потому все вычисления в данном случае «прозрачны» с точки зрения представления знаний.

2) Циклическое выполнение может быть реализовано с использованием двух вычислительных элементов. Первый проверяет условие повторения цикла, а второй – выполняет действия цикла. В таком случае мы остаемся в рамках приведенной выше модели.

Модель (4) позволяет выявить допустимые потоки управления процесса вычисления F с отображением темпоральных свойств посредством учета последовательности смены состояний.

Распределенная модель процесса вычисления целевой функции представляет собой параллельную композицию M'' моделей M и определяется следующим образом: $M'' = M_1 \parallel M_2 \dots M_i \dots \parallel M_j$, при выполнении для любой пары моделей $(M_i \parallel M_j) \in M''$ следующих ограничений $S'' = \{(s_i, s_j)\}$ при условии идентичности пересечений функций разметки

для состояний s_i, s_j с множеством атомарных высказываний. Множество начальных состояний композиции объединяет все комбинации множеств начальных состояний исходной пары при условии, что эти комбинации входят в состав множества состояний композиции. Функция интерпретации композиции объединяет функции интерпретации исходной пары моделей. Отношения упорядоченности для пар нескольких состояний композиции задаются только при наличии таких отношений в исходных моделях. Реализуемость пары параллельных путей возможна только в случае реализуемости каждого из пути пары.

Выводы

Предложен подход к моделированию динамических аспектов распределенного представления знаний, которое является основой многоуровневых архитектур, используемых при решении задач глубокого обучения. Подход предполагает моделирование состояний процесса вычисления целевой функции.

Предложена модель процесса вычисления целевой функции для распределенного представления знаний, которая задает множество состояний атомарных элементов представления знаний (вычисления целевой функции), допустимые отношения между элементами, а также множество атомарных логических высказываний, истинных для соответствующих состояний элементов представления знаний. Модель обеспечивает возможность верификации процессов параллельных вычислений целевой функции для распределенного представления знаний.

Список литературы: 1. *Bengio Y.* Learning deep architectures for AI. // Foundations and Trends in Machine Learning. 2009. № 2(1). P. 1–127. 2. *Anthes G.* Deep learning comes of age// Communications of the Association for Computing Machinery (ACM). 2013. № 56(6). P. 13–15. 3. *Bengio Y.* Deep learning of representations for unsupervised and transfer learning// Journal of Machine Learning Research Workshop and Conference Proceedings. 2012. № 27. P. 17–37. 4. *Deng L.* An overview of deep-structured learning for information processing// Proceedings of Asian-Pacific Signal & Information Processing Annual Summit and Conference (APSIPA-ASC). October 2011. 5. *Deng L.* A tutorial survey of architectures, algorithms, and applications for deep learning// Asian-Pacific Signal & Information Processing Association Transactions on Signal and Information Processing. 2013. 6. *Handbook of Knowledge Representation*// Edited by F. van Harmelen, V. Lifschitz, B. Porter/Foundations of artificial intelligence. 2008. 1004 p. 7. *Загоруйко Н. Г.* Прикладные методы анализа данных и знаний. Новосибирск: ИМ СО РАН, 1999. 270 с. 8. *Hastie T.* The Elements of Statistical Learning / T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. Springer. 2001. 739 p. 9. *Reese T.* Applications of Boolean matrices to the analysis of flow diagrams/ IRE-AIEE-ACM '59 (Eastern) Papers presented at the December 1-3, 1959. P. 133–138. 10. *Abrahams J. R.* Chapter 1: Elements of a flow graph// J. R. Abrahams, G. P. / Coverley Signal flow analysis. 2014. P. 1-20. 11. *McCabe T. J.* A Complexity Measure/ IEEE Transactions on Software Engineering. Apr 1976. Vol. 2. № 4. P. 308-320. 12. *Kripke S. A.* Semantical considerations on modal logic /Acta Philosophica Fennica. № 16. 1963. P. 83 – 94. 13. *Clarke E. M.* Model Checking// E. M. Clarke, O. Grumberg, D. Peled/ The MIT Press. 1999. 330p. 14. *Queille J. P.* Fairness and related properties in transition systems - a temporal logic to deal with fairness// J. P. Queille, J. Sifakis /Acta Inf. 1983. № 19. P. 195–220.

Поступила в редколлегию 11.06.2015

Петрова Лариса Григорьевна, доцент кафедры информационно-коммуникационных технологий. Сумской областной институт последипломного педагогического образования. Научные интересы: методы машинного обучения. Адрес: Украина, 40007, Сумы, ул. Римського-Корсакова, 5, тел. (0542) 33-40-67.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УПЛОТНЕНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ МАТЕРИИ

Рассматривается гравитационное взаимодействие уплотнений ЭММ на примере системы, состоящей из двух электронов. Электрон в первом приближении представляется объемным вихрем с однонаправленным вращением электромагнитной массы внутри ограниченного объема. Стабилизация массы и размера такого вихря происходит за счет внутренней энергии электрона, которая пополняется посредством энергообмена с внешней средой. Процесс стабилизации сопровождается пульсацией массы (объема) и излучением электромагнитной энергии в радиальных направлениях. Далее электрон рассматривается как элементарный изотропный сферический излучатель. Отмечается целесообразность проведения экспериментальной проверки предложенной гипотезы.

1. Введение

Об актуальности поднимаемой темы свидетельствует тот факт, что многие выдающиеся физики ставили вопросы о связи гравитационных и электромагнитных явлений. В частности, Ричард Фейнман в популярных лекциях [1] писал: “До сих пор никому не удалось представить тяготение и электричество как два разных проявления одной и той же сущности ...”. До сих пор проблема единой теории поля не решена. В данной работе сделана попытка построить физическую модель явления гравитации, исходя из предположения об электромагнитной природе гравитационного взаимодействия элементарных электрических частиц.

Цель работы состоит в выявлении электромагнитной природы гравитационного взаимодействия и представлении тяготения и электричества одной и той же сущностью на примере системы, состоящей из двух взаимодействующих электронов.

Сила гравитационного взаимодействия двух тел с массами m_1 и m_2 описывается зависимостью [1]:

$$F_H = k\gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2},$$

где $[k] = \text{см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-2} = 10^{-3} \text{м}^3 \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$ – коэффициент размерности; R – расстояние между тяготеющими массами; $\gamma = 6.67259 \cdot 10^{-8}$ – безразмерный коэффициент, характеризующий интенсивность взаимодействия тяготеющих масс.

2. Электромагнитная природа гравитационного взаимодействия

Электрон, порожденный турбулентностью движения непрерывной электромагнитной материи, в первом приближении представляется объемным вихрем с однонаправленным вращением электромагнитной материи (ЭММ) внутри ограниченного объема. Стабилизация массы и размера такого вихревого образования происходит за счет внутренней энергии электрона, которая пополняется посредством энергетического обмена с окружающей ЭММ. Процесс стабилизации сопровождается пульсацией массы (объема) и излучением электромагнитной энергии в радиальных направлениях. Далее неподвижный электрон рассматривается как элементарный изотропный сферический излучатель.

Энергия излучения каждого из статически взаимодействующих электронов за секунду определяется в соответствии с гипотезами Планка и де Бройля выражением:

$$E_{\text{изл.}} = k_1 \cdot h \cdot f_n = m_e c^2, \quad (1)$$

где $h = 6.6260755 \cdot 10^{-27}$ – постоянная Планка, $[k_1] = \text{см}^2 \cdot \text{г} \cdot \text{с}^{-1} = 10^{-7} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$, f_n – частота пульсаций массы электрона, с^{-1} ; m_e – масса электрона, c – скорость распространения непрерывной части ЭММ и движения ЭММ внутри электрона.

Из (1) следует, что частота пульсаций (излучений) и соответствующая ей длина волны пульсаций λ_n определяются следующим образом:

$$f_n = \frac{m_e c^2}{k_1 \cdot h} \cong 1.23559 \cdot 10^{20} \text{с}^{-1} \left(\lambda_n = \frac{k_1 \cdot h}{m_e c} = \frac{c}{f_n} \cong 2.42631 \cdot 10^{-10} \text{см} \right). \quad (2)$$

Излучаемая электроном энергия воздействия в области локализации другого электрона (плотность потока энергии)

$$E_{\text{вз.1}} = \frac{m_e c^2}{4\pi \cdot R^2}, \text{ при } R = 1 \text{ см } E_{\text{вз.1}} \cong \frac{m_e c^2}{4\pi}. \quad (3)$$

Представим электрон в виде системы автоматического регулирования (стабилизации) его параметров – массы, объема и, в соответствии с выражением (1), его частоты пульсаций. В высокоточной системе авторегулирования запаздывание стабилизирующего воздействия $t_{\text{зап.}}$ как отклика на возникающее отклонение стабилизируемого параметра должно быть меньше характерного времени нестационарности – в рассматриваемом случае периода пульсаций с указанной частотой f_n . Таким образом, необходимо, чтобы выполнялось условие: $t_{\text{зап.}} \cdot f_n \ll 1$.

Учитывая, что запаздывание определяется размером электрона (обозначим некий эффективный диаметр электрона $d_{\text{эф.е}}$) и длина волны пульсаций связана с периодом пульсаций соотношением $T_n = \lambda_n / c$, получаем $t_{\text{зап.}} / T_n = d_{\text{эф.е}} / \lambda_n \ll 1$.

По аналогии с выражением для полной мощности, излучаемой диполем Герца, примем, что для массы излучаемой ЭММ допустимо выражение:

$$M_{\text{изл.}} = m_e \frac{\pi}{3} \cdot \left(\frac{d_{\text{эф.е}}}{\lambda_n} \right)^2.$$

В системе, состоящей из двух электронов, расположенных на расстоянии $R = 1$ см и обменивающихся массами, “излученная” плотность потока массы одного из электронов в области локализации другого равна

$$M'_{\text{изл.}} = \frac{M_{\text{изл.}}}{4\pi \cdot R^2} = \frac{M_{\text{изл.}}}{4\pi}.$$

Ввиду того, что $M'_{\text{изл.}} = 0.5 \cdot (d_{\text{эф.е}} / \lambda_n)^2 \cdot m_e / 6$, плотность потока массы ЭММ, излучаемой двумя электронами и обеспечивающей взаимодействие, можно записать как $2M'_{\text{изл.}} = (d_{\text{эф.е}} / \lambda_n)^2 \cdot m_e / 6$. Поскольку коэффициенты $(d_{\text{эф.е}} / \lambda_n)^2 / 6$ и γ в законе всемирного тяготения характеризуют интенсивность взаимодействия, то можно предположить следующее равенство:

$$\gamma = \frac{1}{6} \left(\frac{d_{\text{эф.е}}}{\lambda_n} \right)^2, \quad (4)$$

откуда $d_{\text{эф.е}} \cong 1.5352 \cdot 10^{-13}$ см. Тогда $M'_{\text{изл.}} = 0.5 \cdot \gamma m_e$, что подтверждается и законом всемирного тяготения.

Закон всемирного тяготения запишем следующим образом (положив $R = 1$ см):

$$F_H = k' \frac{\gamma}{2} \cdot m_{e1} \cdot m_{e2} + k' \frac{\gamma}{2} \cdot m_{e2} \cdot m_{e1}, \quad (5)$$

где $m_{e1} = m_{e2} = m_e$ – массы гравитирующих электронов, $k' = k \cdot \text{см}^{-2}$.

Из приведенной записи (5) закона всемирного тяготения можно предположить, что гравитационное воздействие каждого из электронов друг на друга происходит за счет “излучения” массы, равной $0.5\gamma \cdot m_e$, испытывающей тяготение со стороны противоположного электрона. Суммарная же масса $m_{\text{сум.}} = \gamma \cdot m_e$, расходуемая на осуществление взаимодействия, характеризуется энергией $E_{\text{вз.}} = m_e c^2 / 2\pi$ в соответствии с (3). Тогда:

$$\gamma \cdot m_e \cdot v_{\text{гр.}}^2 = \frac{1}{2\pi} m_e c^2.$$

Отсюда можно найти величину скорости квантов гравитационного поля:

$$v_{\text{гр.}} = c / \sqrt{2\pi \cdot \gamma} \cong 4.63 \cdot 10^{11} \text{ м/с}. \quad (6)$$

Энергия, излучаемая первым электроном с эквивалентной массой $0.5 \cdot \gamma m_e$, воздействует на второй электрон. Используя концепцию диполя Герца, можно записать для воспринимаемой вторым электроном массы ЭММ M' , движущейся внутри электрона со скоростью света c :

$$(0.5 \cdot \gamma m_e) \cdot \frac{1}{2} \frac{1}{6} \left(\frac{d_{\text{эф.е}}}{\lambda_{\text{гр.}}} \right)^2, \quad (7)$$

где $\lambda_{\text{гр.}} = v_{\text{гр.}} / f_n = \lambda_n (v_{\text{гр.}} / c)$ – длина волны гравитационного излучения.

С учетом последнего выражение (7) можно записать в виде:

$$M' = (0.5 \cdot \gamma m_e) \cdot \frac{\gamma \cdot c^2}{2 v_{\text{гр.}}^2} = \frac{\pi \cdot \gamma^3}{2} \cdot m_e, \quad (7')$$

В течение 1 с электрон излучает кванты ЭММ с общей массой, равной $4\pi \cdot (\gamma/2) \cdot m_e \cdot g$. По аналогии: масса, воспринимаемая вторым электроном, равная $0.5 \cdot \pi \cdot \gamma^3 m_e$, “излучает” по направлению воздействующей массы кванты ЭММ с массой, равной

$$M = 2\pi \cdot \gamma \cdot \frac{\pi \cdot \gamma^3}{2} m_e.$$

Это является следствием тормозного излучения, вызванного потерей скорости массой M' .

Полная энергия этой излученной массы, распространяющейся со скоростью гравитационного взаимодействия, равна $E = M \cdot v_{\text{гр.}}^2$ или, расписывая:

$$E = 2\pi \cdot \gamma \cdot \frac{\pi \cdot \gamma^3}{2} m_e \cdot \frac{c^2}{2\pi \cdot \gamma} = \frac{\pi \cdot \gamma^3}{2} m_e c^2.$$

Под действием этой энергии возникает силовое воздействие на второй электрон по направлению к первому (“притяжение”).

Воспользуемся полученным результатом для выяснения величины энергии электростатического взаимодействия электронов, используя известное соотношение силового взаимодействия электростатического и гравитационного электронов:

$$\frac{F_K}{F_H} \cong 4.16688 \cdot 10^{42} \text{ или } F_K = \gamma \cdot \left(m_e \cdot \sqrt{\frac{F_K}{F_H}} \right) \cdot \left(m_e \cdot \sqrt{\frac{F_K}{F_H}} \right).$$

Примем энергию электростатического воздействия одного электрона на другой равной

$$E' = k_2 \cdot m_e c^2,$$

где k_2 – безразмерный коэффициент.

Тогда, поскольку в соответствии с (7) первый и второй электроны для силового воздействия используют массу величиной M' , то можно записать:

$$\frac{k_2 \cdot m_e c^2}{M' c^2} = \frac{2k_2}{\pi \gamma^3} = \sqrt{\frac{F_K}{F_H}}. \quad (8)$$

Из (8) следует, что $k_2 = 0.952596$, тогда $E \cong 0.952596 \cdot m_e c^2$.

Взаимная потенциальная энергия системы, состоящей из двух электронов при расстоянии между их центрами, равном $R = d_{\text{эф.е}}$, определяется выражением из [2]:

$$E_{\text{п.}} = F_K d_{\text{эф.е}} = \frac{e^2}{4\pi \cdot \varepsilon_0 d_{\text{эф.е}}}.$$

С другой стороны, $E_{\text{п.}} = 2 \cdot E'$, тогда имеем

$$\frac{e^2}{4\pi \cdot \varepsilon_0 d_{\text{эф.е}}} \approx 2 \cdot 0.952596 \cdot m_e c^2.$$

Отсюда получаем $d_{\text{эф.е}} = 1.4795 \cdot 10^{-13}$ см и $r_{\text{эф.е}} = d_{\text{эф.е}}/2 \approx 0.739775 \cdot 10^{-13}$ см.

Определенное из выражения $\gamma = (d_{\text{эф.е}}/\lambda_n)^2/6$ значение эффективного диаметра $d_{\text{эф.е}} = 1.5352 \cdot 10^{-13}$ см близко полученному выше, что указывает на физическую допустимость предлагаемой модели.

Далее, баланс энергии электрона осуществляется в течение периода пульсаций со скоростью “света”. Объемная плотность окружающей электромагнитной среды должна быть не менее

$$\rho_{\text{в.ср.}} = \frac{m_{\text{кв.}}}{v} \cong 5.1645468 \cdot 10^{-26} \text{ г/см}^3,$$

где $m_{\text{кв.}} = 4\pi \cdot \gamma m_e / (2|f_n|) \cong 3.09 \cdot 10^{-54}$ г – масса кванта; $v = (4/3) \cdot \pi \lambda_n^3 \cong 5.9831 \cdot 10^{-29}$ см³ – объем.

В 1 с электрон излучает кванты с массой, равной $2\pi \cdot \gamma m_e$, и эквивалентной энергией, равной $m_e c^2$. Та как масса электрона больше массы квантов излучения в $(2\pi \cdot \gamma)^{-1}$ раз, то его энергия, очевидно, во столько же раз больше величины $m_e c^2$, и внутреннюю энергию электрона можно оценить из выражения:

$$E_{\text{вн.}} = \frac{m_e c^2}{2\pi \cdot \gamma} = m_e v_{\text{гр.}}^2 \approx 2.3852 \cdot 10^6 \cdot m_e c^2.$$

Аналогично для устойчивого фотона можно записать:

$$E_{\text{вн.ф}} = \frac{m_{\text{ф}} c^2}{2\pi \cdot \gamma} = m_{\text{ф}} v_{\text{гр.}}^2.$$

3. Образование уплотнений электромагнитной материи

По аналогии с выражением для внутренней энергии электрона можно предположить, что возможно существование устойчивого полярного уплотнения с минимальной массой, для которого связь с объемной плотностью непрерывной ЭММ определяется соотношением:

$$\rho_{v,\min} = \frac{\rho_{v,\text{непр.}}}{2\pi \cdot \gamma},$$

где $\rho_{v,\text{непр.}}$ – объемная плотность непрерывной ЭММ, $[\rho_v] = \frac{\Gamma}{\text{см}^3}$, $\rho_{v,\min}$ – объемная плотность уплотнения ЭММ с минимальной массой.

Из приведенного выражения следует: $\rho_{v,\text{непр.}} = 2\pi \cdot \gamma \cdot \rho_{v,\min}$.

Частицы и фотоны с массами, превышающими минимальную, и сформированные определенным образом из разнополярных уплотнений с минимальной массой, могут иметь объемные плотности, выраженные через объемную плотность непрерывной ЭММ, обладающей минимальной объемной плотностью массы. Для электрона подобную связь представим в виде выражения:

$$\rho_{v,\text{непр.}} = (2\pi \cdot \gamma)^n \cdot \rho_{v,e},$$

где $\rho_{v,e} \cong 4.808 \cdot 10^{11} \text{ г/см}^3$, n – целое число.

Ранее получено среднее значение объемной плотности окружающей электрон среды:

$$\rho_{v,\text{ср.}} \cong 5.1645 \cdot 10^{-26} \text{ г/см}^3.$$

Для $n = 6$ имеем $\rho_{v,\text{непр.}} = (2\pi \cdot \gamma)^6 \cdot \rho_{v,e} \cong 2.611 \cdot 10^{-27} \text{ г/см}^3$. Далее запишем ряд соотношений для масс и частот пульсаций электрона и уплотнений ЭММ:

$$k_1 h f_n = m_e c^2,$$

$$k_1 h f_i = m_i c^2.$$

Отсюда получаем соотношения

$$\frac{f_i}{f_n} = \frac{m_i}{m_e} = \frac{\lambda_n}{\lambda_i} = \frac{d_n}{d_i}.$$

Эти соотношения показывают, что для уплотнений с массами $m_i < m_e$ справедливо следующее: если $m_i = m_e/a$, где $a > 1$, то объем увеличивается в a^3 раз, и объемная плотность уплотнения определяется так:

$$\rho_{v,i} = \frac{m_e}{a} \frac{1}{v_e a^3} = \rho_{v,e} a^{-4}.$$

При $\rho_{v,\text{непр.}} = (2\pi \cdot \gamma)^6 \cdot \rho_{v,e}$, $\rho_{v,\min} = (2\pi \cdot \gamma)^5 \cdot \rho_{v,e}$ имеем $(2\pi \cdot \gamma)^5 = a^{-4}$, откуда $a = (2\pi \cdot \gamma)^{-5/4}$, и $m_{\min} = m_e a^{-1} = m_e (2\pi \cdot \gamma)^{5/4} \cong 9.7181 \cdot 10^{-36} \text{ г}$, минимальная частота $f_{n,\min} \cong 1.31816 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$, $d_i = d_{\text{эф},i} = a \cdot d_{\text{эф},e} \cong 1.439 \cdot 10^{-5} \text{ см}$.

Таким образом, в диапазоне частот, где скорость распространения ЭММ не превышает скорости света, существуют уплотнения, которые принимают формы фотонов и частиц. При условии $v_{\text{изл.}} > c$ вероятность образования фотонов из непрерывной ЭММ незначительна из-за отсутствия соответствующей турбулентности ЭММ. Фотоны могут образовываться и при распаде уплотнений на более мелкие части.

В связи с важностью рассматриваемой научной и мировоззренческой проблемы целесообразно провести экспериментальную проверку предложенной в статье гипотезы. Эксперимент мог бы содержать такие пункты: 1) имитация массы путем генерации излучения с частотой $f_{\text{гр.}} \leq 1.23559 \cdot 10^{20} \text{ Гц}$; 2) измерение скорости распространения ЭММ в диапазоне частот $10^{13} \dots 1.5 \cdot 10^{20} \text{ Гц}$; 3) измерение затухания гравитационного поля в различных мате-

риалах, в том числе и в состоянии сверхпроводимости, когда электроны наиболее восприимчивы к внешним воздействиям из-за исчезновения хаотического движения.

Выводы

1) Гравитационное взаимодействие имеет электромагнитную природу, из чего следует предположение о том, что скорость распространения квантов гравитационного поля превышает скорость света; тяготение вызывается тормозным излучением.

2) Тяготение и электромагнитные взаимодействия – два разных проявления одной и той же сущности, что, в частности, подтверждает близость вычисленных значений эффективного радиуса, полученных на основании дипольной концепции и электростатического взаимодействия.

3) Высокая проницаемость квантов гравитационного поля объясняется высокой скоростью распространения квантов $v_{гр}/c \gg 1$: процессы в “препятствиях” происходят со скоростью, не превышающей скорости света.

Выражаю благодарность Сороке А.С., доценту ХНУРЭ, за обсуждения по материалам статьи и помощь в ее подготовке.

Список литературы: 1. *Фейнман Р.* Характер физических законов / М.: Наука, 1987. 168 с. 2. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Уч. пос. Т.2 / М.: Наука, 1968. 455 с.

Поступила в редколлегию 12.06.2015

Рыбин Виктор Вячеславович, инженер. Научные интересы : теоретическая и практическая радиолокация, теоретическая физика. Адрес: Украина, 61204, Харьков, пр. Победы, 72, кв. 299, тел. (057)-336-21-72.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ТРАНСПОРТИРОВКИ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА КЛОНАЛЬНОГО ОТБОРА

Рассматривается решение задачи транспортировки материалов в условиях шахты на основе модифицированного алгоритма клонального отбора. Предлагаемый метод решает задачу поиска оптимального маршрута с учетом типа транспортного средства (ТС), что позволит минимизировать время транспортировки и учесть экономические ограничения. Проводятся численные исследования, которые доказывают эффективность модификации алгоритма. Ключевые слова: оптимальный маршрут, алгоритм клонального отбора, время транспортировки, ограничения.

1. Введение

Для повышения эффективности работы шахтных предприятий на сегодня существует большое количество компьютерных систем, среди которых есть и системы шахтной логистики. Основной целью применения таких систем является решение проблемы недостаточной эффективности управления потоковыми процессами, такими как транспортировка материалов по всем необходимым участкам.

В отличие от обычной задачи поиска оптимального маршрута, решаемой посредством компьютерных систем шахтной логистики, при выборе маршрута транспортировки необходимо учитывать следующие особенности:

- маршрут между некоторыми ребрами может отсутствовать;
- для реализации маршрута может использоваться только одно конкретное транспортное средство;
- некоторые маршруты могут быть реализованы с использованием нескольких транспортных средств, что ведет к необходимости учета скорости транспортного средства;
- экономические ограничения, связанные со стоимостью транспортировки, транспортных средств, прокладки маршрута и др.

Таким образом, задача оптимального маршрута сводится к выбору маршрута и типа транспортного средства, позволяющих минимизировать время транспортировки и удовлетворяющих экономическим ограничениям.

2. Анализ источников и публикаций

На сегодняшний день существуют следующие группы методов решения задачи оптимального маршрута: точные методы [1]; нейросетевые методы [2]; эвристические методы [3]; метаэвристические методы [4].

Основное преимущество точных методов заключается в том, что имея достаточно времени, они вычисляют кратчайший маршрут, т.е. полученные решения являются точными. Однако данные методы не позволяют учитывать ограничения и имеют большую вычислительную сложность.

Нейросетевые методы, в отличие от точных методов, имеют малую вычислительную сложность, однако дают приближенные решения. Необходимо тщательно подбирать алгоритм обучения для минимизации ошибки функционала. Также к недостаткам нейросетевых методов следует отнести невозможность учета ограничений.

Эвристические методы обладают малым временем вычисления. Недостатком этих методов является то, что их использование не гарантирует получения оптимальных решений. Это связано с тем, что поиск прекращается после нахождения локального минимума. Кроме того, методы локального поиска не позволяют учитывать ограничения.

Метаэвристические методы, в которые входят генетический алгоритм, муравьиный алгоритм, алгоритм имитации отжига и т.д., в отличие от всех неточных методов, дают более точный результат поиска, приближенный к оптимальному, позволяют учитывать

ограничения и имеют малую вычислительную сложность. Однако данные методы существенно зависят от подбора вероятности выполнения операторов, которая напрямую влияет на результат [5], и на практике приходится каждый раз отлаживать этот параметр заново.

Согласно проведенному исследованию существующие методы поиска оптимального маршрута являются недостаточно эффективными и не учитывают характеристики транспортного средства. Для решения поставленной задачи в работе предлагается модифицировать один из метаэвристических методов, а именно алгоритм клонального отбора.

3. Цель и задачи исследования

Объектом исследования является процесс транспортировки материалов на участках шахтного транспорта. Цель исследования – разработка метода транспортировки, позволяющего учесть характеристики транспортных средств. Для достижения поставленной цели необходимо:

- выбрать метаэвристический метод с такими критериями: возможность учета ограничений различного характера, малая вычислительная мощность, достаточно точные решения;
- определить структуру алгоритма разрабатываемого метода с учетом модификаций;
- выполнить численные исследования;
- оценить эффективность предложенного метода транспортировки на конкретном объекте.

4. Результаты исследования

Модифицированный алгоритм клонального отбора включает в себя следующие блоки:

- представление особей и создание исходной популяции с учетом допустимых маршрутов для имеющихся транспортных средств;
- задание функции цели и ограничений;
- оператор клонирования в сочетании с имитацией отжига [6];
- оператор мутации в сочетании с имитацией отжига с учетом допустимых маршрутов для конкретного типа транспортного средства;
- оператор добавления новых антител в сочетании с имитацией отжига;
- оператор редукции (селекционная схема);
- проверка условия останова.

Рассмотрим детально каждый из перечисленных этапов.

Представление особей и создание исходной популяции. В качестве антитела, которое содержит номера пунктов транспортировки материалов для шахты и представляет s -ю особь популяции H с целочисленными генами, выступает вектор:

$$h_s = (h_{s1}, \dots, h_{sk}, \dots, h_{sK}), \quad s \in \overline{1, Q}, \quad (1)$$

где Q – мощность популяции; h_{sk} – значение k -го компонента антитела; K – число компонент антитела.

Популяция создается так:

- случайным образом генерируется очередное антитело и полученный маршрут проверяется на соответствие типу транспортного средства;
- если полученный маршрут не соответствует ни одному из типов транспортных средств, то особь генерируется заново.

Задание функции цели. В качестве функции цели $F(x, t)$ (показателя качества) в работе предлагается использовать сумму времени транспортировки $F1(x)$ и штрафной функции $F2(x, t)$ на основе имитации отжига. Штрафная функция представляет собой сумму функций-ограничений с учетом транспортных средств: ограничение на время транспортировки, ограничение на стоимость транспортировки. Функция цели представлена в виде:

$$F(x, t) = F1(x) + F2(x, t) \rightarrow \min_x, \quad (2)$$

$$F1(x) = \frac{l(x)}{u(x)}, \quad (3)$$

$$l(x) = d_{x_M, x_1} + \sum_{i=1}^{M-1} d_{x_i, x_{i+1}}, \quad (4)$$

$$u(x) = \arg \max_{k \in \{z | x \in X(z)\}} Vel_k, \quad (5)$$

$$F2(x, t) = \exp\left(-\frac{\max\{0, r(z)\}}{g(t)}\right), \quad (6)$$

$$g(t) = \beta g(t-1), \quad 0 < \beta < 1, \quad g(0) = T_0, \quad T_0 > 0, \quad (7)$$

где d_{x_M, x_1} – вес ребра (x_i, x_{i+1}) , $x_i, x_{i+1} \in V$; $V = \{1, \dots, M\}$ – множество вершин; Vel_k – скорость транспортного средства k -го типа; $X^{(z)}$ – множество маршрутов, связанных с z -м транспортным средством; x – вектор вершин; M – длина вектора вершин; t – номер итерации; T_0 – параметр, отвечающий за начальную значимость штрафа, вычисляется экспериментально; β – параметр, регулирующий скорость нарастания штрафа, вычисляется экспериментально; r – функция, вводящая экономические ограничения, связанные со стоимостью транспортировки, транспортных средств, прокладки маршрута и др.; $l(x)$ – длина маршрута; $u(x)$ – наиболее подходящий по скорости тип транспортного средства для маршрута x .

Вычисление аффинности. Аффинность определяет близость текущего антитела к лучшему антителу и вычисляется на основе функции цели в виде:

$$\Phi(h_s) = 1 - \frac{F(h_s, t) - \min_{j \in \overline{1, Q}} F(h_j, t)}{\max_{j \in \overline{1, Q}} F(h_j, t) - \min_{j \in \overline{1, Q}} F(h_j, t)}, \quad s \in \overline{1, Q}, \quad (8)$$

где $\Phi(h_s) \in [0, 1]$.

Если $\Phi(h_s) = 1$, то s -е антитело является лучшим,

если $\Phi(h_s) = 0$, то s -е антитело является худшим.

Оператор клонирования. В данной работе оператор клонирования, который позволяет отобразить лучшие особи, т.е. лучшие векторы номеров пунктов транспортировки материалов для шахты, которые удовлетворяют (2), комбинируется с имитацией отжига. Это позволяет определить вероятность выбора s -й особи (определенного вектора номеров пунктов транспортировки материалов для шахты) в виде:

$$q_s = \text{round}\left(\frac{g(t) - s}{g(t)} \alpha\right), \quad s \in \overline{1, g(t)}, \quad (9)$$

где t – номер итерации; T_0 – параметр, вычисляется экспериментально; β – параметр, вычисляется экспериментально; α – параметр клонирования, вычисляется экспериментально; $\text{round}()$ – функция, округляющая число до ближайшего целого.

Таким образом, на ранних стадиях работы алгоритма клонального отбора для клонирования отбираются все антитела, что обеспечивает исследование всего пространства поиска, а на заключительных стадиях отбираются только лучшие, что делает поиск направленным.

Оператор мутации. После клонирования для обеспечения разнообразия антител, т.е. разнообразия векторов номеров пунктов транспортировки материалов для шахты, которые удовлетворяют (2), используется оператор мутации. Случайно выбирается антитело. Затем выполняется мутация на основе перестановки 2-орт, которая заключается в следующем.

Случайно выбирается антитело. Случайным образом выбираются из набора компонент этого антитела две компоненты c_1 и c_2 , причем выбор их продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $1 < c_2 - c_1 < K - 1$.

На основе антитела $h_1 = h_{11}, \dots, h_{1,c1-1}, h_{1,c1}, \dots, h_{1,c2}, h_{1,c2+1}, \dots, h_{1K}$ создается антитело $h_2 = h_{11}, \dots, h_{1,c1-1}, h_{1,c2}, \dots, h_{1,c1}, h_{1,c2+1}, \dots, h_{1K}$, т.е. компоненты $h_{1,c1}, \dots, h_{1,c2}$ переставляются в обратном порядке.

Полученный маршрут проверяется на соответствие типу транспортного средства. Если полученный маршрут не соответствует ни одному из типов транспортных средств, то особь генерируется заново.

Вычисление вероятности мутации представлено в виде

$$p(h_s) = e^{-\alpha \Phi(h_s)}, \quad (10)$$

где α – параметр мутации, вычисляется экспериментально; $p(h_s)$ – вероятность мутации антитела h_s .

Добавление новых антител. После мутации для обеспечения разнообразия антител, т.е. векторов номеров пунктов транспортировки материалов для шахты, которые удовлетворяют (2), используется добавление новых антител. Такое добавление позволяет получить новые антитела с резко отличающимися свойствами.

В качестве j -го нового антитела выступает сгенерированный случайным образом вектор

$$h_j = (h_{j1}, \dots, h_{jK}), \quad j \in \overline{1, \tilde{Q}}, \quad (11)$$

где \tilde{Q} – мощность множества новых антител.

Полученный маршрут проверяется на соответствие типу транспортного средства. Если полученный маршрут не соответствует ни одному из типов транспортных средств, то особь генерируется заново.

В данной работе предлагается определить вероятность добавления антител посредством имитации отжига в виде:

$$P_a = P_0 \exp(-1/g(t)), \quad (12)$$

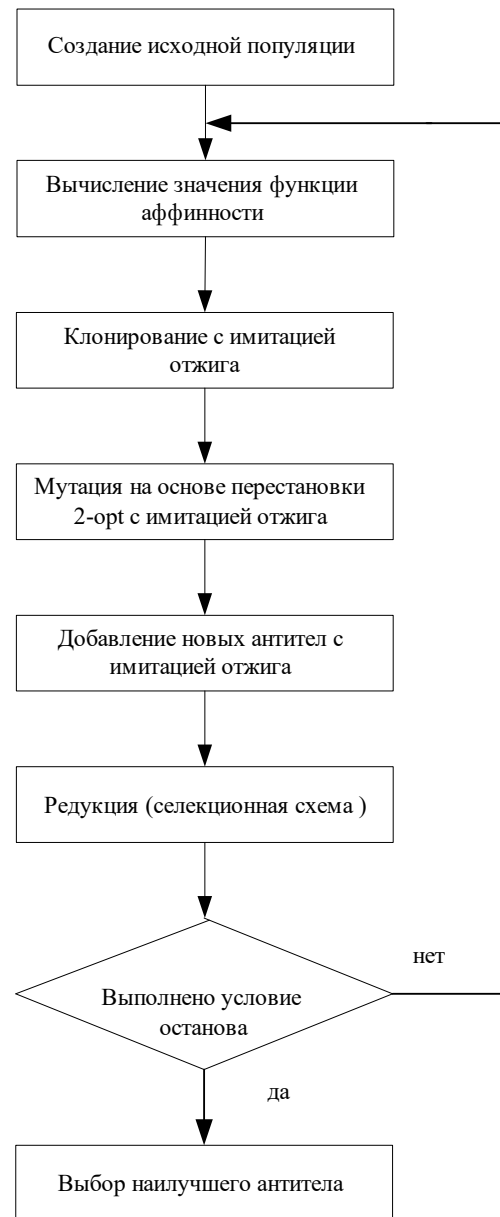
где P_a – начальная вероятность добавления.

Таким образом, на ранних стадиях работы алгоритма клонального отбора с высокой вероятностью происходит добавление антител, что обеспечивает исследование всего пространства поиска, а на заключительных стадиях вероятность добавления антител стремится к нулю, что делает поиск направленным.

Оператор редукции. В качестве оператора редукции, который позволяет выбрать особи, т.е. векторы номеров пунктов транспортировки материалов для шахты, из множества, полученного объединением предыдущей популяции с результатами мутации и добавления новых антител, используется селекционная схема, т.е. выбираются лучшие особи по функции цели.

Условие останова. В качестве условия останова используются:

– превышение максимального количества итераций T ;



Структура алгоритма клонального отбора с имитацией отжига

– превышение числа поколений, в течение которых не улучшается результат.

Результатом работы алгоритма клонального отбора является антитело (вектор номеров пунктов транспортировки материалов для шахты) h_{s^*} с минимальным значением функции цели $F(h_{s^*}, t)$. Структура описанного алгоритма приведена на рисунке.

5. Численные исследования

Для проведения численных исследований был выбран участок ШТ-3 шахты «1/3 Новогородовская», который отвечает за транспортировку сырья, габаритных или негабаритных материалов между узлами участка. Сегодня на участке задействован один тип ТС, а время одной транспортировки материалов между узлами составляет примерно 3-4 часа.

Для повышения эффективности работы участка было принято решение модернизировать транспортную часть, что позволит уменьшить времени и затраты на транспортировку, а также выбрать маршрут транспортировки с учетом транспортного средства с наилучшими характеристиками.

Для численного исследования алгоритма клонального отбора в работе было выбрано два основных типа (табл. 1). Первый тип исследует все пространство поиска и не является направленным. Для этого типа возможна потеря лучших решений. Он требует значительного времени поиска. Второй тип является комбинированным, т.е. совмещает направленность поиска с исследованием всего его пространства. При этом учитывалось, что скорость транспортировки КАМАЗом составляет до 20 км/ч, а вагонеткой – от 5 до 10 км/ч.

Таблица 1

Операторы алгоритмов клонального отбора	Типы алгоритмов клонального отбора	
	Тип 1	Тип 2 (предложенный)
Клонирование	без имитации отжига	с имитацией отжига
Мутация	Обычная	Обычная
Добавление новых антител	без имитации отжига	с имитацией отжига
Редукция	без имитации отжига	с имитацией отжига

Результаты численного исследования типов алгоритмов клонального отбора, используемых для поиска оптимального маршрута транспортировки с учетом транспортного средства, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Количества итераций для поиска оптимального маршрута		Полученное время транспортировки (мин)	
тип 1	тип 2	тип 1	тип 2
87	56	190	110

Согласно полученным результатам (см. табл. 2), разработанный метод позволяет сократить время транспортировки с 3-х до 2-х часов приблизительно.

Согласно табл. 2, использование алгоритма типа 2 является наиболее эффективным.

6. Выводы

Для решения задачи транспортировки материалов в условиях шахты были проанализированы существующие методы поиска оптимального маршрута. По результатам исследования метаэвристические методы оказались наиболее эффективными, поскольку, помимо квазиоптимального решения задачи, они позволяют учитывать ряд ограничений.

Для повышения эффективности решения задачи был модифицирован алгоритм клонального отбора. Модификация заключается в добавлении имитации отжига в такие операторы, как клонирование, добавление новых антител и редукция.

Проведенные численные исследования на реальном объекте показали, что модифицированный алгоритм позволяет найти квазиоптимальное решение за меньшее количество итераций по сравнению со стандартным вариантом алгоритма клонального отбора.

Также численные исследования показали, что алгоритм позволяет вычислять время транспортировки с учетом типа транспортного средства и, при нахождении маршрута, приемлемого для нескольких типов транспортных средств, выбирает тот, время транспортировки которого меньше.

Предложенный метод позволяет повысить эффективность работы участка ШТ-3 путем сокращения времени транспортировки (с 3-х до 2-х часов) материалов и сокращения экономических показателей.

Список литературы: 1. Смерічевська С.В. Стратегія формування транспортно-логістичних кластерів в Україні: інноваційний та інтелектуальний підходи: монографія / С.В. Смерічевська, Є.Є. Федоров, Т.В. Ібрагімхалілова; Донецьк: Ноулідж, 2013. 328 с. 2. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с. 3. Laporte G. Classical Heuristics for the Vehicle Routing Problem / G. Laporte, F. Semet // Les Cahiers du GERAD, G98-54, Group for Research in Decision Analysis. Montreal, Canada, 1998. 4. Скобцов Ю. А. Метаэвристики: монография / Ю.А. Скобцов, Е. Е. Федоров; Донецк : Ноулідж, 2013. 426 с. 5. Gendreau M. Metaheuristics for the vehicle routing problem / M. Gendreau, G. Laporte, J.- Y. Potvin // Technical Report CRT-963, Centre de Recherche sur les Transports. Universit de Montral, jan 1994. 6. Luke S. Essentials of Metaheuristics. / S. Luke. Second edition, Online version 2.1, 2014. 253 p.

Поступила в редколлегию 26.05.2015

Дикова Юлия Леонидовна, аспирантка кафедры «Компьютерные науки» ДонНТУ. Научные интересы. Искусственные нейронные сети, метаэвристики. Адрес: Украина, 85300, Красноармейск, ул. Горького 53, тел.: 099-902-54-13. E-mail: juli.dikova@gmail.com