

Дергильова О. В., к.т.н., с.н.с.¹;

Рома О. М., д.т.н., с.н.с.²

Пашков О. С., к.т.н.³

¹ - Центр воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського, Київ;

² - Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації НТУУ "КПІ ім. І. Сікорського", Київ

³ - Міністерство оборони України, в/ч А-0515, Київ

Планування досліджень із застосуванням системи імітаційного моделювання JCATS

Резюме. У статті викладено основи побудови плану факторного експерименту для застосування системи імітаційного моделювання типу JCATS з метою виявлення сумісного впливу низки факторів на перебіг воєнних дій.

Ключові слова: імітаційне моделювання, факторний експеримент, план експерименту.

Постановка проблеми. Командно-штабні навчання (КШН) залишаються однією з основних форм підготовки командування і штабів Збройних Сил України. Високий рівень інтенсивності навчально-бойової діяльності забезпечується, насамперед, за рахунок застосування у процесі навчання сучасних систем моделювання воєнних дій, які дають змогу командуванню і штабам відпрацьовувати навчальні завдання із залученням мінімально необхідної кількості особового складу, техніки та коштів.

КШН з використанням комп'ютерів істотно відрізняються від традиційних. Дії тих, хто навчається, "не прив'язані" до замислу, оскільки динаміка бойових дій моделюється і оперативно відображається на вихідних пристроях відповідно до прийнятих рішень.

У більшості країн світу імітаційне моделювання (ІМ) обрано як ефективний і рентабельний засіб навчання та підготовки власних збройних сил для участі у військових операціях. При проведенні комп'ютерних КШН з ІМ істотно розширюються можливості відпрацьовування питань організації та ведення бойових дій, дослідження способів і форм застосування військ (сил) і нових зразків зброї й військової техніки в операціях із визначенням різних аспектів (економічних, політичних, географічних тощо) [1].

Проте засоби ІМ воєнних дій можуть бути (і повинні бути) не тільки інструментом інтенсифікації підготовки керівних ланок збройних сил, а й інструментом наукового пошуку і обґрунтування нових форм та/чи способів застосування останніх.

Об'єднаний імітатор тактичних дій JCATS є результатом багаторічного глибокого вивчення об'єкта моделювання і дає змогу

досліднику враховувати при моделюванні величезну кількість факторів. Це залишається справедливим і для спорідненої об'єднаної моделі моделювання бойових дій JWARS (Joint Warfare System) [2]. Але без застосування спеціальних планових підходів ефективно врахування доступних досліднику факторів представляється неможливим.

Ступень розробленості проблеми.

Вважається, що початок напруму, відомого як "планування експерименту", поклала в 1935 році монографія Рональда Фішера, яка неодноразово перевидавалася [3]. Він уперше показав доцільність одночасного варіювання всіма факторами на перевагу широко розповсюджені однофакторному експерименту.

Постановці факторного експерименту присвячена велика кількість праць, наприклад, широко відомі [4-6]. Проте у цих роботах не висвітлені особливості здійснення факторного експерименту з імітаційною системою типу JCATS.

Метою статті є наведення способу побудови факторного експерименту із системою ІМ типу JCATS для визначення у сукупності характеру впливу низки факторів на перебіг воєнних дій при проведенні порівняно невеликої кількості експериментів (дослідів).

Виклад основного матеріалу. Особливо корисним факторний план виявляється у разі використання системи ІМ JCATS, оскільки імітовані системою події носять випадковий характер, отже для набрання необхідної статистики кількість випробувань зростає щонайменше в рази.

Нерідко трапляються випадки, коли дуже багато (до ста та більше) різних факторів є потенційно важливими в дослідженні. Спеціальні плани (наприклад, план Плаккета-Бермана чи

плани із застосуванням матриці Адамара) дають змогу ефективно просіяти велику кількість факторів, використовуючи мінімальну кількість спостережень. Наприклад, можна спланувати та проаналізувати експеримент, який має 127 факторів, використовуючи всього 128 дослідів, а потім оцінити головний ефект кожного фактора, таким чином легко визначивши, які з факторів важливі при вивченні процесу.

У багатьох випадках достатньо розглянути всього два рівні факторів, які визначають кінцевий результат. Експериментатор хотів би встановити, чи впливають будь-які із зазначених змін на кінцевий результат. Найбільш очевидний підхід у цьому випадку полягає у повному переборі комбінацій рівнів факторів, що цікавлять. Це відмінно спрацьовує, якби кількість необхідних дослідів у такому експерименті не зростала експоненціально. Наприклад, якщо дослідник бажає провести експеримент з 7-а факторами, то повний перебір потребує кількість дослідів $2^7=128$. Щоб вивчити вплив 10-и факторів, потребується $2^{10}=1024$ дослідів. Оскільки для проведення кожного дослідів потрібне тривале та коштовне переналаштування досліджуваної системи, то на практиці часто нереально ставити настільки велику кількість дослідів. У цьому випадку при плануванні експерименту зазвичай використовують дробові плани, які відкидають взаємодії високого порядку та приділяють найбільшій уваги головним ефектам.

На сьогодні використовується понад 20 різних критеріїв оптимальності планів, які поділяються на дві основні групи. До першої групи відносять критерії, пов'язані з помилками оцінок коефіцієнтів функції відгуку, а до другої – з помилками оцінки поверхні відгуку. Критерії першої групи становлять інтерес для задач оптимізації, виділення домінуючих (найбільш значимих) параметрів на початкових етапах рішення оптимізаційних задач та для виявлення несуттєвих параметрів у задачах відновлення закономірностей функціонування об'єкта.

Критерію D -оптимальності відповідає мінімальний об'єм еліпсоїда розсіювання помилок (мінімум добутку усіх дисперсій коефіцієнтів полінома функції відгуку). У відповідному плані ефекти факторів максимально незалежні один від одного. Цей план мінімізує очікувану помилку передбачення функції відгуку. Критерію A -оптимальності відповідає план з мінімальною сумарною дисперсією усіх коефіцієнтів, критерію E -оптимальності – план, в якому максимальна дисперсія коефіцієнтів буде мінімальною.

Критерії другої групи застосовуються при розв'язанні задач опису поверхні відгуку,

визначення обмежень на значення параметрів. У цьому випадку головним є критерій G -оптимальності, який дає змогу побудувати план із мінімальним значенням найбільшої помилки в описі функції відгуку.

При вивченні впливу окремих факторів на поведінку об'єкта застосовують критерій E -оптимальності.

На початкових етапах оптимізації для функції відгуку об'єкта досліджень застосовують неповні поліноми другого порядку або лінійні поліноми. Обчислення оцінок коефіцієнтів таких поліномів здійснюється на основі обробки результатів реалізації найбільш простих планів, у яких кожний фактор приймає тільки два значення

$V_{i \min}$ або $V_{i \max}$, розташовані симетрично щодо центру плану за даним фактором. Значення рівнів варіювання обирає дослідник, виходячи з можливого діапазону зміни кожного фактора й можливості застосування лінійної апроксимації функції відгуку в обраному діапазоні змін параметра. Без обмеження спільності можна вважати, що кодовані нормовані значення

$$x_i = \frac{V_i - V_{i0}}{\Delta V}$$

приймають значення -1 і $+1$ відповідно (прийнято позначати $-$ або $+$).

Прийняті позначення: V_i – натуральне значення фактора, V_{i0} – натуральне значення основного рівня фактора, ΔV – інтервал варіювання. Множина усіх точок у k -мірному просторі, координати яких є комбінаціями “+” та “-”, називається повним факторним планом або планом повного факторного експерименту типу 2^k (ПФЕ). Кількість точок у цьому плані $N = 2^k$.

Для прикладу візьмемо повний факторний експеримент із трьома незалежними змінними X_1 , X_2 та X_3 (табл. 1).

Другий, третій і четвертий стовпці таблиці відповідають власне плану експериментів, п'ятий – восьмий стовпці містять значення добутків незалежних змінних. Фіктивна змінна $X_0 = 1$ (перший стовпець) введена для однаковості запису розрахункових формул коефіцієнтів полінома. Рядки відповідають дослідом, наприклад, перший рядок характеризує експеримент, у якому усі незалежні змінні перебувають на нижньому рівні.

Таблиця 1

| Матриця планування | | | | | | | | Вектор результатів |
|--------------------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----------|---------------|--------------------|
| x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | $x_1 x_2$ | $x_1 x_3$ | $x_2 x_3$ | $x_1 x_2 x_3$ | y |
| + | - | - | - | + | + | + | - | y_1 |
| + | - | - | + | + | - | - | + | y_2 |
| + | - | + | - | - | + | - | + | y_3 |
| + | - | + | + | - | - | + | - | y_4 |
| + | + | - | - | - | - | + | + | y_5 |
| + | + | - | + | - | + | - | - | y_6 |
| + | + | + | - | + | - | - | - | y_7 |
| + | + | + | + | + | + | + | + | y_8 |

Існує кілька способів побудови подібних матриць планування. Зокрема можна скористатися прийомом, характерним для запису послідовності двійкових чисел. У стовпці останньої змінної x_3 знаки змінюються по черзі, у стовпці передостанньої змінної x_2 – чергуються через два елементи, змінної x_1 – через чотири елементи. Аналогічно будується матриця для будь-якої кількості змінних, порядок перерахування змінних не має значення. Стовпці з добутками змінних обчислюються шляхом множення значень елементів у відповідних стовпцях простих змінних.

З аналізу матриці планування легко бачити, що повний факторний експеримент має властивості:

ортогональності. Сума парних добутків елементів будь-яких двох різних стовпців дорівнює нулю. Зокрема, для простих змінних

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = \overline{0, k};$$

симетричності. Сума всіх елементів будь-якого стовпця, за винятком першого, дорівнює нулю, наприклад,

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} = 0, \quad i = \overline{1, k};$$

нормованості. Сума квадратів елементів будь-якого стовпця дорівнює числу дослідів,

$$\text{так для } i\text{-ї змінної } \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = N, \quad i = \overline{0, k}.$$

Перші дві властивості забезпечують незалежність оцінок коефіцієнтів моделі й допустимість їх фізичної інтерпретації. Порушення цих властивостей приводить до взаємної залежності оцінок і неможливості надання змісту коефіцієнтам функції відгуку.

Зі збільшенням кількості факторів k число точок плану в ПФЕ зростає за показовою функцією 2^k . Плани ПФЕ дають змогу одержати незміщені оцінки градієнта

функції відгуку в центральній точці, але у випадку застосування лінійного полінома виявляються недостатньо ефективними за кількістю дослідів при великому числі незалежних змінних, оскільки залишається занадто багато ступенів свободи на перевірку адекватності моделі. Наприклад, при $k = 5$ на перевірку адекватності лінійної моделі залишається 26 ступенів. Хоча велика кількість дослідів і приводить до істотного зниження похибки в оцінці коефіцієнтів, таке число ступенів свободи для перевірки адекватності є надмірним.

Отже, у випадках, коли використовуються тільки лінійні наближення функції відгуку, кількість дослідів слід скоротити, використовуючи для планування так звані регулярні дробові репліки ПФЕ, що містять підходяще число дослідів та зберігають основні властивості матриці планування. Репліка, що включає тільки половину експериментів ПФЕ, називається напівреплікою, що включає четверту частину дослідів – четверть-реплікою тощо. Коротке позначення зазначених дробових реплік 2^{k-1} , 2^{k-2} відповідно.

Побудова регулярної дробової репліки або проведення дробового факторного експерименту (ДФЕ) типу 2^{k-p} передбачає відбір з множини k факторів $k-p$ основних, для яких будується план ПФЕ. Цей план доповнюється p стовпцями, які відповідають іншим факторам. Кожний із цих стовпців формується за спеціальним правилом, а саме, отримується як результат поелементного множення не менше двох і не більше $k-p$ певних стовпців, відповідних до основних факторів. Інакше кажучи, у дробових репліках p лінійних ефектів прирівняні до ефектів взаємодії. Але саме така побудова матриці планування й дає змогу забезпечити її симетричність, ортогональність та нормованість.

Правило утворення кожного з p стовпців ДФЕ називають генератором плану. Кожному

додатковому стовпцю відповідає свій генератор (для плану типу 2^{k-p} повинне бути задане p різних генераторів). Генератор задається як добуток основних факторів, що визначає значення елементів відповідного додаткового стовпця матриці планування.

Прикладом запису генератора для плану 2^{3-1} є вираз $x_3 = x_1 x_2$ (табл. 2). Матриця планування ДФЕ типу 2^{k-p} містить $k + 1$ стовпець і $N = 2^{k-p}$ рядків.

Таблиця 2

| Матриця планування | | | | Вектор результатів |
|--------------------|-------|-------|-------|--------------------|
| x_0 | x_1 | x_2 | x_3 | y |
| + | - | - | + | y_1 |
| + | - | + | - | y_2 |
| + | + | - | - | y_3 |
| + | + | + | + | y_4 |

Коли основним джерелом погрешності є випадкові помилки вимірів, то в точках плану зазвичай проводяться однократні досліди. У такій ситуації помилки різних дослідів вважають взаємно незалежними випадковими величинами, розподіленими за нормальним законом із нульовим математичним сподіванням і однаковою, хоча й невідомою, дисперсією. Отже, функція відгуку в різних точках плану також розподілена нормально. Її математичні сподівання невідомі й можуть бути різними. Оцінка впливу фактора в цих умовах проводиться на основі застосування методу дисперсійного аналізу, суть якого полягає у визначенні значимості відмінностей між середніми значеннями функції відгуку для різних значень досліджуваного фактора. Таке порівняння проводиться не шляхом безпосереднього порівняння середніх значень, а шляхом зіставлення факторної дисперсії функції відгуку й залишкової дисперсії, викликані випадковими причинами. Якщо дисперсія функції відгуку, породжена впливом різних значень фактора, значно перевищує залишкову дисперсію, то фактор впливає на функцію відгуку. А це значить, що й середні значення функції відгуку на різних рівнях фактора різняться суттєво.

Отже, для довільної кількості рівнів вхідних факторів вихідними даними є:

план ДФЕ з кількістю рівнів зміни факторів, рівному n . Нехай рівні аналізованого фактора P відповідають стовпцям квадрата;

матриця значень функції відгуку $Y = \|y_{kj}\|$ розмірністю $n \times n$;

рівень значимості для перевірки статистичної гіпотези α .

Дисперсійний аналіз включає наступні кроки:

1. Обчислення середнього значення функції відгуку за всіма дослідями і середнього значення за різними рівнями фактора P

$$\mu_1 = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n y_{kj}, \mu_1(j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{kj}, j = \overline{1, n}.$$

2. Оцінка факторної дисперсії

$$\mu_{2,\phi} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n [\mu_1 - \mu_1(j)]^2.$$

3. Оцінка залишкової дисперсії

$$\mu_{2,\zeta\ddot{a}e} = \frac{1}{n^2 - n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n [\mu_1(j) - y_{kj}]^2.$$

4. Оцінка значимості фактора P проводиться на основі методу перевірки статистичних гіпотез. Нульова гіпотеза H_0 відповідає рівності середніх значень функції відгуку при різних значеннях фактора. У цьому випадку факторна і залишкова дисперсія є незміщеними оцінками невідомої генеральної дисперсії функції відгуку, тому вони не повинні суттєво різнитися. Очевидно, якщо оцінка факторної дисперсії не перевищує оцінку залишкової дисперсії, то істинна гіпотеза H_0 . Альтернативна гіпотеза H_1 відповідає твердженню, що факторна дисперсія істотно більше залишкової дисперсії, отже, середні значення також значно різняться. Перевірка здійснюється на основі критерію Фішера

$$F = \frac{\mu_{2,\phi}}{\mu_{2,\zeta\ddot{a}e}}. \text{ Критичне значення критерію}$$

$F_{кр} = F(\alpha; n-1; n^2 - n)$ знаходять стандартним чином, тут $n - 1$ відповідає кількості ступенів свободи факторної дисперсії, а $n^2 - n$ – кількості ступенів свободи залишкової дисперсії. Якщо виконується умова $F > F_{кр}$, то фактор P істотно впливає на функцію відгуку, інакше – вплив фактора не суттєвий.

Критерій Фішера застосуємо тільки при порівнянні дисперсій нормально розподілених величин. Якщо такої впевненості немає, то до отриманого висновку слід ставитися обережно. У випадку проведення повторних дослідів у точках плану розподіл середніх значень функції відгуку буде наближатися до нормального зі збільшенням

кількостей досвідів. І застосування критерію Фішера буде досить обґрунтоване.

Очевидно, що спроба прямого одночасного варіювання багатьма факторами неминуче призведе до так званого “комбінаторного вибуху” у разі, якщо дослідник забажає встановити реакцію на кожну комбінацію факторів. Застосування наведених результатів із теорії планування експерименту позбавляє необхідності “всліпу” знаходити найкращу комбінацію за методом повного перебору, даючи змогу значно скоротити сам перебір.

Висновок. Отже, можна спланувати і практично реалізувати дослідний експеримент на моделі тактичного імітатора і визначити впливові та невливові на кінцевий результат обрані фактори. При цьому кількість дослідів факторного експерименту може приблизно дорівнювати кількості факторів, вплив яких на кінцевий результат підлягає дослідженню.

Подальше дослідження. Результати такого дослідного експерименту у подальшому дають змогу проводити оцінку дієвості оперативних планів із варіюванням невеликою,

найбільш значущою, частиною впливових факторів, тим самим здійснюючи підтримку прийняття рішення відповідними посадовими особами при проведенні різних тактичних дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методика підготовки і проведення командно-штабних навчань за допомогою комп'ютерів з використанням технологій імітаційного моделювання. Під заг. ред. О.Ю. Пермякова : методичний посібник. – К.: НУОУ, 2011. – 60 с.
2. Н. Резяпов, С. Чеснаков, М. Инюхин. Имитационная система моделирования боевых действий JWARS ВС США // Зарубежное военное обозрение, № 11, 2008. – с. 27-32.
3. R. A. Fisher. The Design of Experiments. 6-th ed, London, Oliver and Boyd, 1951.
4. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1976. - 279 с.
5. Тихомиров В. Б. Математические методы планирования эксперимента при изучении нетканых материалов. – Москва: “Легкая индустрия”, 1968. – 158 с.
6. Тихомиров В. Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в легкой промышленности). – Москва: “Легкая индустрия”, 1974. – 262 с.

Стаття надійшла до редакції 11.10.2016

Дергилова Е. В. к.т.н., с.н.с.¹;

Рома А. Н. д.т.н., с.н.с.²;

Пашков О. С., к.т.н.³

¹ - Центр военно-стратегических исследований Национального университета обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев;

² - Институт специальной связи и защиты информации НТУУ “КПИ им. И. Сикорского”, Киев;

³ – Міністерство оборони України, в/ч А-0515, Київ

Планирование исследований с использованием системы имитационного моделирования JCATS

Резюме. В статье излагаются основы построения плана факторного эксперимента для применения системы имитационного моделирования типа JCATS с целью выявления совместного влияния ряда факторов на ход военных действий.

Ключевые слова: имитационное моделирование, факторный эксперимент, план эксперимента.

E. Dergylova, Ph.D;

A. Roma, Ds.T;

O. Pashkov, Ph.D

¹ - Center for Military and Strategic Studies National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernykhovsky, Kyiv;

² - Institute of Special Communication and Information Protection of NTU of Ukraine “KPI”, Kyiv;

³ - Ministry of Defence of Ukraine, A-0515, Kyiv

Planning of researches with the use of the system of imitation design JCATS

Resume This article introduces the basics of constructing a plan of using factorial design, system simulation modeling type JCATS the purpose of joint detection of factors influence the course of hostilities.

Keywords: simulation, factorial experiment, the experimental design.