

STATISTICAL MODEL OF SURFACE-TO-AIR MISSILE SYSTEM

Stoyan N. Chaneyv

Abstract: Presenting of surface-to-air missile system like statistical model of mass service system by simulation modeling by MS Excel allows determining mean of the number of destroying enemy aircrafts and estimating its combat effectiveness.

Keywords: statistical model, simulation modeling, surface-to-air missile system, mass service system.

СТАТИСТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ЗЕНИТНО-РАКЕТЕН КОМПЛЕКС

Стоян Н. Чанев

"Vasil Levski" National Military University, "Artillery, Air-defence and Communication and Information Systems" Faculty, "Air Defence" Department; town of Shumen

При оценяване бойната ефективността на създадена групировка за противовъздушна отбрана (ПВО) е необходимо да се знае дали всички цели ще бъдат обстреляни или част от тях ще преминат през системата на зенитния огън (СЗО) необстреляни.

Използването на системи за масово обслужване (СМО) при оценката на бойната ефективност позволява изграждането на модели и последващото им изследване. При аналитично моделиране на процесите [1], като недостатък следва да се отбележат трудностите възникващи при едновременно действие на разнотипни зенитно-ракетни комплекси (зрк), поради различния им цикъл на стрелба ($t_{ц.с}$), както и разликата в $t_{ц.с}$ за еднотипни зрк, но действащи в различни условия на обстановката (смущения, наличие на ракети на пусковите установки).

Поради горепосоченото е удачно да се използва симулационно моделиране.

Всеки симулационен модел се състои от следните блокове [1]:

- дефиниране на възможните състояния на системата;
- идентифициране на възможни състояния на системата, които биха могли да се появят;
- идентифициране на възможни събития, които биха могли да променят състоянието на системата;
- часовник, който да отчита времето на симулацията;
- инструменти за генериране на случайни числа.

След формулирането на симулационния модел е необходимо да се проведат числени експерименти и получените резултати от симулациите да се обработят и анализират.

Основните данни, които са необходими за построяване на статистически модел на зрк, представен като СМО (симулационно моделиране) са плътността на налета от въздушни цели (λ) и плътността на потока от обслужени заявки (μ), както и интервала между отделните заявки (Δt).

Плътността на потока от заявки λ към определен тип зрк е възможно да се определи чрез матрица на целеразпределението (МЦР), моделираща дейността на старшия команден пункт (КП) на групировката за ПВО.

Плътността на потока от обслужени заявки или интензивността на обслужването μ се определя:

$$(1) \quad \mu = \frac{1}{\bar{t}_{ц.с}},$$

където $\bar{t}_{ц.с}$ е математическото очакване на средния цикъл на стрелбата на зрк.

При еднотипни комплекси:

$$(2) \quad \mu = m\mu_i,$$

тогава:

$$(3) \quad t_{ц,с} = \frac{t_{н,сi}}{m},$$

където m – броя на еднотипните зрк.

Веднага след започване на работа процесът в СМО няма да бъде стационарен, а ще възникне преходен процес и едва след неговото затихване вероятностните характеристики на системата практически няма да зависят от времето. Доказано е [2], че при процеси с продължителност по-голяма от $(2 \div 3) t_{ц,с}$ може да се използват зависимостите, получени за стационарен процес, т.е. при

$$(4) \quad T_n = (2 \div 3)t_{ц,с}$$

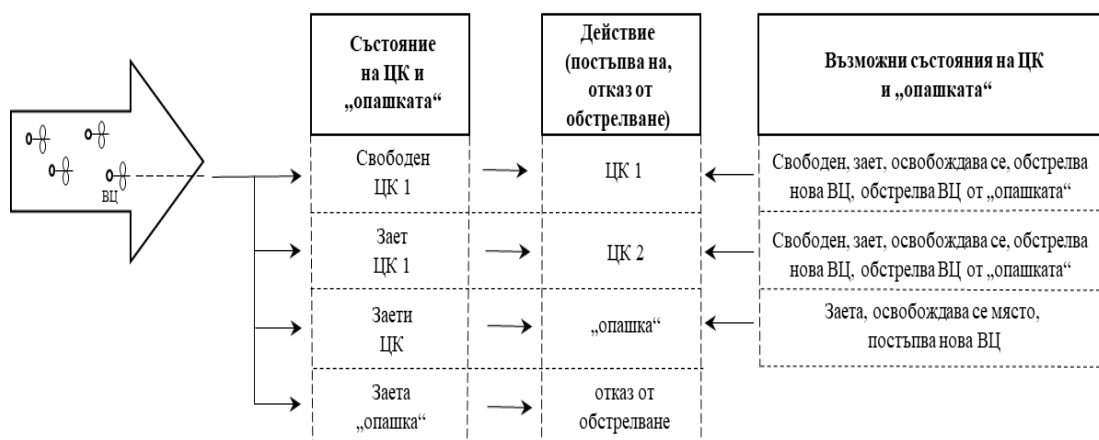
За да получим реалистични стойности за интересуващите ни величини са необходими голям брой симулирани времеви интервали [1], което ще осигури и по-голяма точност на опитните данни при анализа и статистическата обработка на резултатите от симулацията. В случая – броя на симулираните интервали ще е максимално възможния за MS Excel.

Интервала между заявките/ВЦ следва да се определи така, че да не е възможно едновременното им постъпване в СМО. Отчитайки най-тежкия вариант – сгъстен боен ред на ВП и минималните взаимни отстояния на летателните апарати (ЛА), $\Delta t = 0,005$ [min] осигурява изпълнението на това условие.

Нека разгледаме зрк, представен като СМО с ограничено време за чакане в опашката (ОВЧ) с два канала на обслужване (целеви канала).

Цикъла на стрелбата, а оттам и интензивностите на обслужване μ_1 и μ_2 на двата целеви канала (ЦК) се различават поради факта, че към началото на налета броят на боеготовите ракети във всеки канал е различен и е отчетено времето за презареждане. ЦК 1 се явява старши и при равни други условия ВЦ се разпределя на него.

Съгласно [1] на фиг.1 е показан алгоритъм на модел на зрк (СМО) и възможните състояния на ЦК и „опашката“, в таблица 1 – модел на двуканална СМО с ОВЧ описващ дейността на зрк за малки разстояния - Тип II (далечна граница на ЗП – 25 km),



Фиг. 1. Алгоритъм на модел на зрк (СМО) и възможните състояния на ЦК и „опашката“

Таблица 1

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
|----|----------------|--|------------|----------|-----|---------|---------|-----|---------|---------|-----|
| 1 | | | | | | | | | | | |
| 2 | | Вероятност за отказ от обстрелване на ВЦ (Ротк): | 0,07692308 | | | | | | | | |
| 3 | | Заети ЦК (средно): | 1,2477109 | | | | | | | | |
| 4 | | Брой ВЦ в "опашката" (средно): | 0,27273837 | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | | |
| 10 | | Генериране на въздушна цел (ВД) | 0,69044842 | 0,998646 | ... | 0,93312 | 0,87255 | ... | 0,78736 | 0,19427 | ... |
| 11 | Начало (t = 0) | Генериране на обстрелване на ВЦ от целеви канал (ЦК) 1 | 0,04192553 | 0,817536 | ... | 0,31701 | 0,71229 | ... | 0,12697 | 0,55928 | ... |
| 12 | | Генериране на обстрелване на ВЦ от ЦК 2 | 0,54266237 | 0,637689 | ... | 0,84888 | 0,54565 | ... | 0,34781 | 0,36325 | ... |
| 13 | | № на стъпката | 1 | 2 | ... | 312 | 313 | ... | 16381 | 16382 | ... |
| 14 | 0 | Време (t), m | 0,005 | 0,01 | ... | 1,56 | 1,565 | ... | 81,905 | 81,91 | ... |
| 15 | | Постъпване на цел | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 16 | | Обстрелване на ВЦ от ЦК 1 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 17 | | Обстрелване на ВЦ от ЦК 2 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 18 | | ЦК 1 се освобождава | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 19 | | ЦК 2 се освобождава | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 20 | | ЦК 1 обстрелва нова ВЦ | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 21 | | ЦК 2 обстрелва нова ВЦ | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 22 | | ЦК 1 обстрелва ВЦ от "опашката" | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 23 | | ЦК 2 обстрелва ВЦ от "опашката" | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 24 | | В "опашката" се освобождава място | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 25 | | В "опашката" постъпва нова ВЦ | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 26 | 0 | ЦК 1 е зает с обстрелване на ВЦ | 0 | 0 | ... | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | ... |
| 27 | 0 | ЦК 2 е зает с обстрелване на ВЦ | 0 | 0 | ... | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | ... |
| 28 | 0 | Заети места от ВЦ в "опашката" | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 2 | 2 | ... |
| 29 | 0 | Отказ от обстрелване на ВЦ | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... |
| 30 | 0 | Всичко ВЦ | 0 | 0 | ... | 3 | 3 | ... | 91 | 91 | ... |
| 31 | 0 | Всичко откази | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 7 | 7 | ... |
| 32 | 0 | Заети ЦК | 0 | 0 | ... | 2 | 2 | ... | 2 | 2 | ... |
| 33 | | Средна дължина на "опашката" | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | ... | 0,01 | 0,01 | ... |
| 34 | | Заетост на ЦК | 0 | 0 | ... | 0,01 | 0,01 | ... | 0,01 | 0,01 | ... |

Колона А – начално състояние на системата (t = 0).

E2:F8 – входни данни за модела.

B2:C4 – изходни данни за модела при една реализация.

По-долу са описани елементите на модела, логическите връзки между тях и реализацията им в MS Excel в следния ред:

№ на реда (клетка) / елемент / логически връзки / реализация в MS Excel:

10, 11, 12 / Генериране на постъпването на ВЦ в системата, както и обстрелването на ВЦ от целевите канали ЦК 1 и ЦК 2 / извършва се с помощта на генератор на случайни числа в интервала (0,1) / C10, 11, 12=Rand().

13 / Номер на стъпката / от 1 до n (последователно нарастващи числа) в хода на симулацията / C13=1, D13=C13+1, ...

14 / Време (t), [min] / 0 за началото на симулацията и нарастващо с Δt за всяка следваща стъпка / C14=\$F\$4, D14=\$F\$4+C14, ...

15 / Постъпване на цел / ако случайното число (0,1) при генерирането на ВЦ е по-малко от λΔt в системата постъпва цел / C15=IF(C10<\$F5*\$F\$4;1;0), ...

16 / Обстрелване на ВЦ от ЦК 1 / ако Δtμ₁ > от случайното число (0,1) при генериране на обстрелване на ВЦ от ЦК 1 то ВЦ се обстрелва от ЦК 1 / C16=IF(\$F\$4*\$F\$6>C11;1;0), ...

17 / Обстрелване на ВЦ от ЦК 2 / ако Δtμ₂ > от случайното число (0,1) при генериране на обстрелване на ВЦ от ЦК 2 то ВЦ се обстрелва от ЦК 2 / C16=IF(\$F\$4*\$F\$7>C12;1;0), ...

18 / ЦК 1 се освобождава / ако канала не е бил зает или канала е бил зает и е обстрелял целта, то ЦК 1 се освобождава / C18=IF(AND(A26=1;C16=1);1;0), D18=IF(AND(C26=1;D16=1);1;0), ...

19 / ЦК 2 се освобождава / ако канала не е бил зает или канала е бил зает и е обстрелял целта, то ЦК 2 се освобождава / C19=IF(AND(A21=1;C17=1);1;0), D19=IF(AND(C27=1;D17=1);1;0), ...

20 / ЦК 1 обстрелва нова ВЦ / ако ЦК 1 е бил зает с обстрелване на ВЦ и се е освободил, и в системата постъпи нова ВЦ, то ЦК 1 обстрелва нова ВЦ / C20=IF(AND(A26-C18=0;C15);1;0), D20=IF(AND(C26-D18=0;D15);1;0), ...

21 / ЦК 2 обстрелва нова ВЦ / ако ЦК 2 е бил зает с обстрелване на ВЦ и се е освободил, и ЦК 1 (старши канал) не обстрелва нова цел, и в системата постъпи нова ВЦ, то ЦК 2 обстрелва нова ВЦ / C21=IF(AND(A27-C19=0;C20=0;C15);1;0), D21=IF(AND(C27-D19=0;D20=0;D15);1;0), ...

22 / ЦК 1 обстрелва ВЦ от „опашката“ / ако ЦК 1 е бил зает с обстрелване на ВЦ и се е освободил, и ЦК 1 не обслужва нова ВЦ (в системата не е постъпила нова ВЦ), и има ВЦ заела място

в „опашката“, то ЦК 1 обстрелва ВЦ от „опашката“ / $C22=IF(AND(A26-C18=0;C20=0;A28>0);1;0)$, $D22=IF(AND(C26-D18=0;D20=0;C28>0);1;0)$, ...

23 / ЦК 2 обстрелва ВЦ от „опашката“ / ако ЦК 2 е бил зает с обстрелване на ВЦ и се е освободил, и ЦК 2 не обслужва нова ВЦ (в системата не е постъпила нова ВЦ), и има ВЦ зела място в „опашката“ след евентуално обслужване на ЦК 1 на ВЦ от „опашката“, то ЦК 2 обстрелва ВЦ от „опашката“ / $C23=IF(AND(A27-C19=0;C21=0;A28-C22>0);1;0)$, $D23=IF(AND(C27-D19=0;D21=0;C28-D22>0);1;0)$, ...

24 / В „опашката“ се освобождава място / ако ЦК 1 или ЦК 2 обстрелва ВЦ от „опашката“, то в „опашката“ се освобождава място / $C24=C22+C23$, ...

25 / В „опашката“ постъпва нова ВЦ / ако в системата постъпи нова ВЦ и двата ЦК не обслужват нова ВЦ, и разликата между броя на ВЦ в „опашката“ и обслужваните от двата ЦК ВЦ от опашката е по-малка от максимално допустимата дължина на „опашката“ (L_{on}), то в „опашката“ постъпва нова ВЦ / $C25=IF(AND(C15=1;C20=0;C21=0;A28-C22-C23<F\$8);1;0)$, $D25=IF(AND(D15=1;D20=0;D21=0;C28-D22-D23<F\$8);1;0)$, ...

26 / ЦК 1 е зает с обстрелване на ВЦ / ако ЦК 1 не се е освободил или обстрелва нова ВЦ, или обстрелва ВЦ от „опашката“ / $C26=A26-C18+C20+C22$, $D26=C26-D18+D20+D22$, ...

27 / ЦК 2 е зает с обстрелване на ВЦ / ако ЦК 2 не се е освободил или обстрелва нова ВЦ, или обстрелва ВЦ от „опашката“ / $C27=A27-C19+C21+C23$, $D27=C27-D19+D21+D23$, ...

28 / Заети места от ВЦ в „опашката“ / броя на местата в „опашката“, намалени с броя ВЦ от „опашката“ обстрелвани от двата ЦК плюс постъпилите нови ВЦ в „опашката“ / $C28=A28-C22-C23+C25$, $D28=C28-D22-D23+D25$, ...

29 / Отказ от обстрелване на целта / ако в системата постъпи нова ВЦ и двата ЦК не обстрелват нова ВЦ, и в „опашката“ не постъпи нова ВЦ, то имаме отказ от обстрелване на ВЦ / $C29=IF(AND(C15=1;C20=0;C21=0;C25=0);1;0)$, ...

30 / Всичко ВЦ / броя на ВЦ постъпили в системата (сумирани нови ВЦ) по време на симулацията / $C30=A30+C15$, $D30=C30+D15$, ...

31 / Всичко откази / броя на ВЦ постъпили в системата и получили отказ от обстрелване по време на симулацията / $C31=C29$, $D31=C31+D29$, ...

32 / Заети ЦК / броя на едновременно заетите с обстрелване на ВЦ ЦК в системата / $C32=C26+C27$, ...

33 / Средна дължина на „опашката“ / заетите места от ВЦ в „опашката“ умножени по стойността на Δt / $C33=C28*F\$4$, ...

34 / Заетост на ЦК / заетите ЦК умножени по стойността на Δt / $C34=C32*F\$4$, ...

C2 / Вероятност за отказ от обстрелване на ВЦ ($P_{отк}$) / $C2=XFD31/XFD30$.

C3 / Заети ЦК (средно) / $C3=SUM(C34:XFD34)/XFD14$.

C4 / Брой ВЦ в „опашката“ (средно) / $C4=SUM(C33:XFD33)/XFD14$.

Всяка реализация на модела се води за един опит (експеримент). За статистическа обработка на получените резултати е необходимо провеждането на множество опити.

MS Excel е в състояние да изпълни автоматично желаните брой симулации.

За целта е необходимо да се създаде таблица в която освен резултатите от симулацията в първия ред се добавя и колона с нужния брой симулации (1000).

Чрез използване на вградени менюта/подменюта - Data/What-If-Analysis/Data table в таблицата с резултатите се генерират необходимия брой опити - таблица 2.

Таблица 2

| Брой симулации: | Вероятност за отказ от обстрелване на ВЦ (Ротк): | Заети ЦК (средно): | Брой ВЦ в "опашката" (средно): |
|-----------------|--|--------------------|--------------------------------|
| 1 | 0,101851852 | 1,532352582 | 0,492186546 |
| 2 | 0,178217822 | 1,506714687 | 0,497802466 |
| ... | ... | ... | ... |
| 583 | 0,10989011 | 1,414418264 | 0,394213161 |
| ... | ... | ... | ... |
| 1000 | 0,091954023 | 1,237577829 | 0,300451715 |

За определяне на вероятността за отказ от обстрелване на ВЦ - $P_{отк}$, а оттам и на вероятността на обстрелване на ВЦ:

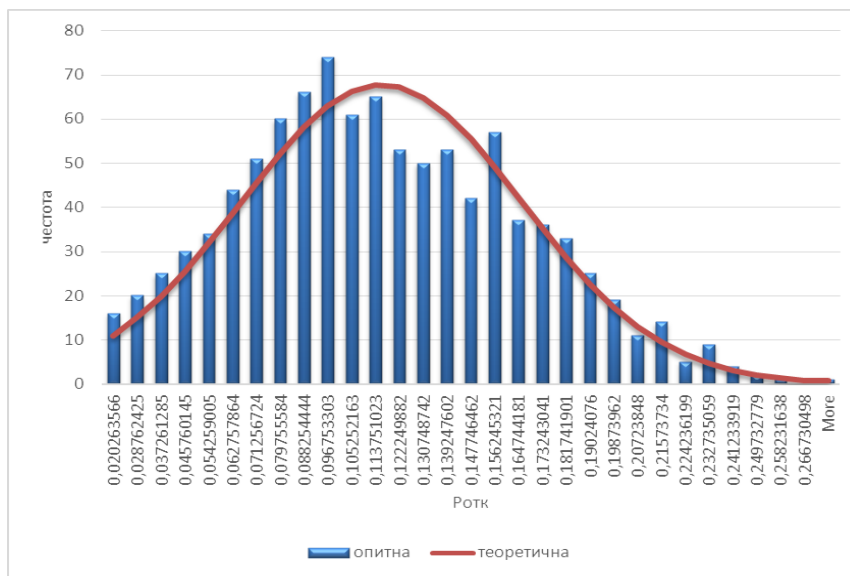
$$(5) \quad P_{обс} = 1 - P_{отк},$$

следва да се извърши статистически анализ на получените резултати.

Чрез използване на вградени менюта/подменюта - Data/Data Analysis/Descriptive Statistics и Data/Data Analysis/Histogram са получени: статистически анализ на опитните данни (таблица 3) и хистограма на опитните данни (фигура 2).

Таблица 3

| Column 1 | |
|--------------------|--------------|
| Mean | 0,111753146 |
| Standard Error | 0,00157961 |
| Median | 0,106382979 |
| Mode | 0,166666667 |
| Standard Deviation | 0,049951641 |
| Sample Variance | 0,002495166 |
| Kurtosis | -0,427420683 |
| Skewness | 0,270502466 |
| Range | 0,263464652 |
| Minimum | 0,011764706 |
| Maximum | 0,275229358 |
| Sum | 111,7531457 |
| Count | 1000 |



Фиг.2. Хистограма на опитните данни

Проверка на хипотеза за закона на разпределение

Критериите за проверка на такива статистически хипотези са известни като критерии на съгласие. Те са основни за различието между теоретичния закон $F_t(x)$ и емпиричния закон на разпределение $F(x)$, построен чрез опитните данни. Ако означим с $F_t(x)$ функцията на разпределение на предполагаемия закон, то хипотезата, която искаме да проверим може да се формулира така:

$$(6) \quad H_0: F(x) = F_t(x)$$

От всички критерии на съгласие най-голямо приложение е намерил критерият на Пирсън (χ^2 – критерий) [3]:

$$(7) \quad \chi^2 = \sum_{j=1}^{m'} \frac{(v_j - v_{tj})^2}{v_{tj}},$$

където: m' – броя на класовете (интервалите) след евентуално обединяване;

v_j – опитна честота;

v_{tj} – теоретична честота (на фиг. 2 – в червен цвят).

Критерият на съгласие χ^2 изисква всички теоретични честоти да бъдат по-големи от 5. Ако в някои класове това условие е нарушено, те се присъединяват към съседните класове (по-близо разположени до модата на емпиричното разпределение), като броят на класовете става $m' = m - \Delta$, където Δ е броят на присъединените класове.

Броя на класовете и границите им се определя чрез менюта/подменюта - Data/Data Analysis/Histogram.

Теоретичната честота във всеки клас се определя чрез използване на статистическата функция в MS Excel „=NORM.DIST(x;mean;standart_dev;cumulative)” (колона 5 в таблица 4), където x – дясната граница на класа, а останалите стойности се вземат от таблица 3. Теоретичната честота се получава (колона 6 в таблица 4):

$$(8) \quad v_{jt} = p_j n,$$

където: p_j – вероятността за попадане на случайната величина в j -тия клас;

n – броя на опитите.

Опитната честота (v_j) е даден в колона 7 на таблица 4.

χ^2 (колона 8) се определя в съответствие с формула (7).

Поради факта, че не всички v_{jt} са по-големи от 5е извършено присъединяване в съседни класове, а броят на класовете е редуциран до m' .

За приемане/отхвърляне на H_0 се използва статистическата функция „=CHISQ.DIST(x;deg_freedom;cumulative)” (последен ред в таблица 4), където x – сумата от колона 8, deg_freedom – степени на свобода - 24, определят се като разлика между броя на класовете (m') и броя на случайните величини (3 – mean, Standard Deviation, χ^2). Задава се критичен праг (обикновено 0,95). Ако стойността на статистическата функция е по-голяма, опитните данни не противоречат на нулевата хипотеза H_0 – както е в случая.

Имайки предвид статистическия анализ на получените резултати за $P_{отк}$ може да получим математическото очакване на броя на поразените цели от зрк тип II:

$$(9) \quad M(x) = N_{обс} P_n,$$

където $N_{обс}$ – броя на обстреляните цели:

$$(10) \quad N_{обс} = \lambda t_n P_{обс},$$

където: λ – плътността на налета;

t_n – продължителността на налета;

$P_{обс}$ – вероятността за обстрелване на целта – определя се съгласно формула (5).

P_n – вероятност за унищожаване на целта с n ракети, броя на ракетите се назначава в зависимост от условията на стрелбата, вида на целта и разполагаемия брой ракети и обикновено е 2.

Таблица 4

| № m | № m' | Граници на класа | | Ft(x) | v _{ij} | v _j | χ ² |
|-----|------|------------------|-----------|-----------|-----------------|----------------|----------------|
| 1 | 1 | | 0,0117647 | 0,0226582 | 22,658245 | 2 | 18,834781 |
| 2 | 2 | 0,0117647 | 0,0202636 | 0,0335083 | 10,850028 | 16 | 2,4444367 |
| 3 | 3 | 0,0202636 | 0,0287624 | 0,0483144 | 14,806159 | 20 | 1,8219436 |
| 4 | 4 | 0,0287624 | 0,0372613 | 0,0679441 | 19,629627 | 25 | 1,4692539 |
| 5 | 5 | 0,0372613 | 0,0457601 | 0,0932277 | 25,283653 | 30 | 0,8797749 |
| 6 | 6 | 0,0457601 | 0,054259 | 0,1248669 | 31,63922 | 34 | 0,176151 |
| 7 | 7 | 0,054259 | 0,0627579 | 0,1633323 | 38,465369 | 44 | 0,7963564 |
| 8 | 8 | 0,0627579 | 0,0712567 | 0,2087654 | 45,433085 | 51 | 0,682114 |
| 9 | 9 | 0,0712567 | 0,0797556 | 0,2609008 | 52,135407 | 60 | 1,1863689 |
| 10 | 10 | 0,0797556 | 0,0882544 | 0,3190243 | 58,12347 | 66 | 1,0673783 |
| 11 | 11 | 0,0882544 | 0,0967533 | 0,381979 | 62,954754 | 74 | 1,9378593 |
| 12 | 12 | 0,0967533 | 0,1052522 | 0,4482256 | 66,246627 | 61 | 0,4155245 |
| 13 | 13 | 0,1052522 | 0,113751 | 0,5159519 | 67,726286 | 65 | 0,1097452 |
| 14 | 14 | 0,113751 | 0,1222499 | 0,58322 | 67,268075 | 53 | 3,0263681 |
| 15 | 15 | 0,1222499 | 0,1307487 | 0,6481311 | 64,911102 | 50 | 3,4253149 |
| 16 | 16 | 0,1307487 | 0,1392476 | 0,7089848 | 60,853731 | 53 | 1,0135959 |
| 17 | 17 | 0,1392476 | 0,1477465 | 0,7644109 | 55,426018 | 42 | 3,2522265 |
| 18 | 18 | 0,1477465 | 0,1562453 | 0,8134563 | 49,045411 | 57 | 1,2901408 |
| 19 | 19 | 0,1562453 | 0,1647442 | 0,8556202 | 42,163951 | 37 | 0,6324452 |
| 20 | 20 | 0,1647442 | 0,173243 | 0,8908364 | 35,216194 | 36 | 0,0174451 |
| 21 | 21 | 0,173243 | 0,1817419 | 0,9194124 | 28,57602 | 33 | 0,6848959 |
| 22 | 22 | 0,1817419 | 0,1902408 | 0,9419403 | 22,527823 | 25 | 0,2712938 |
| 23 | 23 | 0,1902408 | 0,1987396 | 0,9591945 | 17,254202 | 19 | 0,1766417 |
| 24 | 24 | 0,1987396 | 0,2072385 | 0,9720334 | 12,838924 | 11 | 0,2633899 |
| 25 | 25 | 0,2072385 | 0,2157373 | 0,9813149 | 9,2815501 | 14 | 2,3987124 |
| 26 | 26 | 0,2157373 | 0,2242362 | 0,9878338 | 6,5188421 | 5 | 0,353879 |
| 27 | 27 | 0,2242362 | 0,2327351 | 0,9922819 | 12,166224 | 17 | 1,9205126 |
| 28 | | 0,2327351 | 0,2412339 | 0,9952307 | | | |
| 29 | | 0,2412339 | 0,2497328 | 0,9971299 | | | |
| 30 | | 0,2497328 | 0,2582316 | 0,9983183 | | | |
| 31 | | 0,2582316 | 0,2667305 | 0,9990407 | | | |
| 32 | | 0,2667305 | | | | | |
| SUM | | | | | | | 50,54855 |
| | | | | | | | 0,998795 |

$$(11) \quad P_n = 1 - (1 - P_1)^n,$$

където P_1 – вероятност за унищожаване на целта с 1 ракета. Дава се в документацията на зрк и приема различни стойности в зависимост от условията на стрелбата, разстоянието до целта и противодействието.

Пълния израз за $M[x]$ ще приеме вида:

$$(12) \quad M x = \lambda t_n (1 - P_{отк}) [1 - 1 - P_1^n].$$

Нека $\lambda = 1,1$; $t_n = 11 \text{ min}$; $P_{отк} = 0,11$ (съгласно модела), $P_1 = 0,6$ (за маневрираща, групова цел, оказваща активно противодействие и летяща под прикритие на активни и пасивни смущения); $n = 2$. Съгласно формула (12) $M x = 9,04 \approx 9$ самолета.

В качество на критерий за бойната ефективност на зрк може да се използва коефициента на надеждност на ПВО ($K_{НПВО}$):

$$(13) \quad K_{НПВО} = \frac{N_y}{N_{ц}},$$

където: N_y – броя унищожени цели от всички цели в налета, т.е. $M \cdot x$;
 N_u – броя на целите в налета (λt_H)

Съгласно получените резултати $K_{\text{НПВО}} = \frac{9}{12,1} \approx 0,74$ за зрк тип II, при отразяване на налет с посочените параметри.

Изводи:

1. Изготвения статистически модел на зрк чрез симулационно моделиране с помощта на MS Excel позволява на база проведените експерименти да се определи по опитен път вероятността за отказ от обстрелване на ВЦ за зрк от тип II (за малки разстояния) при различна интензивност на обслужването за всеки от целевите канали.

2. Изготвения модел е приложим и при зрк за близко действие (СМО с отказ), като в този случай броят на ВЦ в „опашката“ е равен на нула.

3. С този модел може да се представи и дейността на КП, като едноканална СМО с ОВЧ. За целта е необходимо да се определи максималния брой ВЦ в „опашката“ в зависимост от рубежите за поставяне на задачи към целевите канали.

Литература:

1. Миневски И., Стефанов С., Симулационно моделиране, учебник, ИК НВУ „В. Левски“, В. Търново, 2014.

2. Митрев Д, Оценка на огневите възможности на зрк „Куб“ по методите на теорията за масовото обслужване, учебно пособие, ВИ, София, 1987.

3. Стефанов С., Георгиев И., Анализ на експериментални данни, учебник, ИК НВУ „В. Левски“, В. Търново, 2013.