



Indicators on the Effectiveness of Radio-Electronic Counteraction against Unmanned Aerial Vehicles

Nickolay L. GEORGIEV, Venstislav I. PEHLIVANSKI, Ognyan G. TODOROV

Institute for Metal Science, Equipment and Technology
with Hydro and Aerodynamic Centre “Acad. A. Balevski”,
Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
e-mails: niki0611@abv.bg, venpeh@abv.bg, odt@technopol.biz

Abstract

Parallel to the development of the UAV, a number of organizational and technical measures are being taken to counteract their unwanted use. One of these measures is related to the development of different means for radio-electronic counteraction (REC), designed to prevent the performance of the radio electronic device functions of the UAV staff. This discourse examines one of the major problems of the development and use of REC tools related to the evaluation of their effectiveness and the determination of the quality indicators of this counteraction.

Keywords: Unmanned aerial vehicles (UAV), Radioelectronic Counteraction (REC), Quality Indicators, Average Risk, Probability of Impact.

Показатели за ефективността на радиоелектронното противодействие срещу безпилотни летателни апарати

Николай Л. ГЕОРГИЕВ, Венцислав И. ПЕХЛИВАНСКИ, Огнян Г. ТОДОРОВ

1. Увод

Известно е, че в последните години рязко нарасна използването на безпилотните летателни апарати (БЛА) за различни цели, включително и за провеждането на терористични акции и извършването на криминални деяния. До голяма степен това се дължи на възможностите в техния състав да се включват разнообразни висококачествени, многофункционални и малоразмерни радиоелектронни средства (РЕС). Ето защо, успоредно с развитието на БЛА, се предприемат редица организационни и технически мерки за противодействие срещу нежеланото им използване [1-6]. Една от тези мерки е свързана с разработването на различни средства за радиоелектронно противодействие (РЕП), предназначени да възпрепятстват изпълнението на функциите на РЕС от състава на БЛА[7]. Важен проблем при разработването и/или използването на средствата за РЕП е свързан с оценката на тяхната ефективност.

2. Изложение

Нека приемем, че РЕС, използвани в БЛА, са два основни типа – средства за въздействие (напр. даден тип средства за разузнаване, целеуказване, насочване и пр., като общият им брой в дадения БЛА обозначим с J) и средства за комуникация и управление на БЛА, наричани по-нататък средства за комуникация (напр. спътниковите системи за навигация, средства за управлението по радиокоманден канал, средства за предаване на изображения и пр. – да обозначим техния общ брой за даден БЛА с L).

Нека освен това приемем, че БЛА е в състояние да въздейства върху N броя обекти, като средството за РЕП цели възпрепятстването на това въздействие.

Нека въведем следните обозначения:

- P_{ijn} – вероятност за това, i -тото средства за комуникация да създаде условия за това j -тото средство да е в състояние да извърши въздействие по n -тия от прикриваните обекти ($i=1 \div I, j=1 \div J, n=1 \div N$);
- $Q_{jn/i}$ – вероятност за това, j -тото средство да е в състояние да извърши въздействие по n -тия от прикриваните обекти при условие, че i -тото средства за комуникация е създадо условия за това;
- a_{jn} – загуба причинена на n -тия от прикриваните обекти при въздействие върху него на j -тото средство на БЛА.

Поради това, че в резултат на използването на анализираниятото средство за радиоелектронно противодействие, стойностите на посочените вероятности се различават, то е целесъобразно да се въведат следните обозначения:

- P'_{ijn} – вероятността P_{ijn} в условие на използване на анализираниятото средство за радиоелектронно противодействие;
- $Q'_{jn/i}$ – вероятността $Q_{jn/i}$ в условие на използване на анализираниятото средство за радиоелектронно противодействие.

Един от основните подходи за оценка на ефективността от използването на БЛА е свързан с оценката на средния риск за прикриваните обекти от неговото използване[8].

При условие, че не се използва анализираниятото средство за РЕП, средният риск за прикриваните обекти може да се обозначи с R и да се представи като [8]:

$$R = \sum \sum \sum P_{ijn} Q_{jn/i} a_{jn} \quad (1)$$

където сумирането е за за $i=1 \div I, j=1 \div J$ и $n=1 \div N$.

При условие, че се използва анализираниятото средство за РЕП, средният риск за прикриваните обекти може да се обозначи с R' и да се представи като:

$$R' = \sum \sum \sum P'_{ijn} Q'_{jn/i} a_{jn} \quad (2)$$

където сумирането е за за $i=1 \div I, j=1 \div J$ и $n=1 \div N$.

Очевидно:

$$P'_{ijn} \leq P_{ijn} \quad (3)$$

$$Q'_{jn} \leq Q_{jn} \quad (4)$$

откъдето следва:

$$R' \leq R \quad (5)$$

На основата на средния риск и използваните обозначения е възможно да се въведат различни показатели за ефективността на анализираниятото средство за РЕП. Основно изискване при неговото формулиране е показателят за качеството на средството за РЕП да нараства при намаляване на риска за защитаваните обекти в резултат от използването му и обратно. В този смисъл се възможни различни формулировки на показател за качеството на средството за РЕП, като например:

$$K_1 = R/R'; K_1 \geq 1 \quad (6)$$

$$K_2 = R - R'; 0 \leq K_2 \leq R \quad (7)$$

$$K = (R - R')/R; 0 \leq K \leq 1 \quad (8)$$

И трите типа показатели нарастват с увеличаване на ефективността от използването на средството за РЕП, т.е. стойностите им нарастват с намаляването на R' . Поради това обаче, че показателят, описан чрез формула 3, е нормиран в границите от 0 до 1, той е подходящ за практическо използване.

От формули 8, 1 и 2 следва, че:

$$K = 1 - (\sum \sum \sum P'_{ijn} Q'_{jn/i} \alpha_{jn}) / (\sum \sum \sum P_{ijn} Q_{jn/i} \alpha_{jn}) \quad (9)$$

където сумирането е за $i=1 \div I, j=1 \div J$ и $n=1 \div N$.

Посоченият критерий K е подходящ за използване в случаите, когато не съществува доминиращо въздействие от страна на БЛА и доминираща вреда от това въздействие, т.е. когато съществуват относително еднородни по тип и тежест въздействия от БЛА. Понякога тази хипотеза е неприложима, защото съгласно формула 9, ако се реализира само едно въздействие, а всички останали се предотвратят от средството за РЕП то ефективността на средството за РЕП ще е по-малко от 1, но по-голямо от нула. В отделни случаи такава оценка на ефективността на средството за РЕП може да се окаже неприемлива от потребителска гледна точка (например ако това реализирано въздействие на БЛА е свързано с унищожаването на обекта, с недопустимо разкриване на неговото местоположение или тип и пр.). Ето защо в този случай е възможно да се използват парциални показатели за ефективност на средството за РЕП от типа на:

$$K_{ijn} = 1 - (P'_{ijn} Q'_{jn/i}) / (P_{ijn} Q_{jn/i}) = 1 - (P'_{ijn} / P_{ijn})(Q'_{jn/i} / Q_{jn/i}), \quad (10)$$

т.е.

$$K_{ijn} = 1 - K_{rijn} K_{qijn} \quad (11)$$

където:

$K_{rijn} = P'_{ijn/i} / P_{ijn}$ – коефициент, обратно пропорционален на ефективността на средството за РЕП спрямо условията които i -тото средство за комуникация създава на j -тото средство да въздейства на n -ти обект;

$K_{qijn} = (Q'_{jn/i} / Q_{jn/i})$ – коефициент, обратно пропорционален на ефективността на средството за РЕП спрямо възможностите на j -тото средство да въздейства на n -ти обект при условие, че i -тото средство за комуникация е създавало условия за това.

Коефициентът K_{rijn} има физически смисъл и може да се използва като показател на устойчивостта на i -тото средство за комуникация на БЛА към СРЕП, а коефициентът K_{qijn} – като показател за устойчивостта на j -тото средство за разузнаване на БЛА към СРЕП.

В някои случаи е възможно един тип радиоелектронно средство за въздействие от състава на БЛА (напр. е j -тото средство) да е в състояние да се управлява от няколко комуникационни средства (примерно с номера на i от i_1 до i_2) [6]. Тогава ефективността на СРЕП срещу това средство за въздействие ще зависи от вероятностите за това нито едно от средствата за комуникация да не е в състояние да го управлява, т.е. K_{rijn} ще се определи по формулата:

$$K_{rijn} = (1 - \prod(1 - P'_{ijn})) / (1 - \prod(1 - P_{ijn})) \quad (12)$$

където умножението се осъществява за всички стойности на i от i_1 до i_2 .

Използването на частни показатели за ефективността е по-гъвкав потребителски инструментариум, който дава възможност за поставяне на различни изисквания към средството за РЕП. Например е възможно потребителят да оцени, че за дадена

комбинация от стойности на i, j и n ефективността на средството за РЕП трябва да е над определена стойност (примерно $K_{ijn} \geq 0.9$), а за друга комбинация от i, j и n тя би могла да е над друга стойност (примерно над 0.5).

Ето защо по-следващото изследване ще се базира на частните показатели за ефективността на средството за РЕП, с уговорката, че е необходимо да се определят стойностите на частните показатели за ефективността на СРЕП спрямо всеки тип радиоелектронна система използвана от дадения тип БЛА.

Естествено при наличие на метод за изчисляване на стойностите на вероятностите влизащи във формула 9 е възможно да се определи K и този показател да се използва като по-общ, когато това е приемливо от потребителска гледна точка.

В общия случай посочените по-горе вероятности зависят от енергийните зависимости на входа на отделното РЕС от състава на БЛА – вероятностите P_{ijn} и Q_{jn} зависят от отношението между мощностите на полезния сигнал и на шумовете, а вероятностите P'_{ijn} и Q'_{jn} – основно от отношението между мощностите на полезния сигнал и на смущението създавано от средството за РЕП. Причината за последното е във факта, че в повечето случаи представляващи практически интерес може да се приеме, че мощностите на останалите шумове са пренебрежимо малки в сравнение с мощността на смущението създавано от СРЕП [7,8].

Мощностите на полезните сигнали на активните средства за разузнаване на прикриваните обекти (W_{jna}) са обратно пропорционални на разстоянието на БЛА до тях (Sn) на четвърта степен [10,11], т.е.:

$$W_{jna} = djna/Sn^4 \quad (13)$$

Мощностите на полезните сигнали на пасивните средства за разузнаване на прикриваните обекти (W_{jnp}) са обратно пропорционални на разстоянието до тях (Sn) на втора степен [10,11], т.е.:

$$W_{jnp} = djnp/Sn^2 \quad (14)$$

Мощностите на полезните сигнали на средствата за комуникация на БЛА (Wi) са обратно пропорционални на разстоянието до пункта, с който комуникират (Sc), на втора степен [7,8], т.е.:

$$Wi = di/Sc^2 \quad (15)$$

където $djna$, $djnp$ и di са константи, зависещи съответно от характеристиките на j -тото средство за разузнаване и на n -тия прикриван обект или от характеристиките на i -тото средство за комуникация от състава на БЛА.

Мощностите на смущенията, създавани от средството за РЕП на активно, пасивно средство за разузнаване или на средство за комуникация (съответно Wja' , Wjp' и Wi'), са обратно пропорционални на разстоянието от него до БЛА (S) на втора степен [10,11], т.е.:

$$Wja' = dja'/S^2 \quad (16)$$

$$Wjp' = djp'/S^2 \quad (17)$$

$$Wi' = di'/S^2 \quad (18)$$

където dja' , djp' и di' са константи, зависещи от параметрите на средството за РЕП и насочеността на неговата диаграма спрямо БЛА.

Зависимостите на разгледаните вероятности (от типа P и Q , съответно P' и Q') зависят от конкретните алгоритмите за обработване на информацията в съответната

радиоелектронна система от състава на БЛА. В общия случай с достатъчна за практиката точност може да се приеме, че те са експоненциални и за разглежданите случаи са от вида [10,11]:

$$P = \gamma \exp(-\beta/W) \quad (19)$$

$$P' = \gamma \exp(-\beta W'/W) \quad (20)$$

където γ и β са коефициенти, определени от характера на обработване на информацията в съответното радиоелектронно средство от състава на БЛА.

На тази база и отчитайки формули 11, 15, 18 и 19 за i -то средство за комуникация получаваме:

$$K_{pijn} = P'_{ijn}/i/P_{ijn} = \exp(-(\beta i/W)(W'-1)) = \exp(-(\beta i S c^2/di)(di'/S^2 - 1)) \quad (21)$$

или още:

$$K_{pijn} = \exp(-(\beta i/di)(di' S c^2/S^2 - S c^2)) \quad (22)$$

По аналогичен начин за j -то активно средство за разузнаване от формули 11, 13 и 16 получаваме:

$$K_{qijn} = \exp(-(\beta j/dj n a)(d j a' S n^4/S^2 - S n^4)) \quad (23)$$

Съответно за j -то пасивно средство за разузнаване от състава на БЛА и използвайки формули 11, 14 и 17 получаваме:

$$K_{qijn} = \exp(-(\beta j/dj n p)(d j p' S n^2/S^2 - S n^2)) \quad (24)$$

Представените формули дават възможност за изчисляване на показателите за ефективността на дадено средство за РЕП при използването му срещу различни типове радиоелектронни средства от състава на БЛА. Същевременно компоненти на тези показатели могат да се използват като показатели за устойчивостта на отделните радиоелектронни средства от състава на БЛА към въздействието на средството за РЕП (формули 22, 23, 24).

Ако са налични данни за параметрите на съответните РЕС, то стойностите на коефициентите β и d могат да се изчислят по известните формули за определяне на мощностите на сигналите или смущенията в различни условия на обстановката [10,11]. В противен случай тези стойности могат да се определят чрез провеждането на експерименти.

Важно предимство на предложения частен показател за ефективността на средството за РЕП е, че той не зависи от важността на прикриваните обекти, което облекчава неговото изчисляване.

3. Заключение

Изложените формули показват, че ефективността на средството за РЕП зависи както от квадрата на разстоянието на БЛА до него, така и от разстоянията между БЛА и съответния прикриван обект или центъра за неговото управление. Следователно избора на позицията на средството за РЕП спрямо прикриваните обекти, мястото за разполагане на центъра за управление на БЛА и направлението за полета му могат съществено да повлияят на ефективността му. Същевременно за даден тип БЛА ефективността на средството за РЕП е динамична характеристика, която се променя в различни зони от пространството.

Експоненциалната зависимост на показателя за ефективността на средството за РЕП, особено ако в конкретния случай е по-стръмна, дава възможност за потребителски нужди тя да се представи като съставена от няколко зони – примерно на зона на слаба ефективност на средството за РЕП (K е по-малък от 0,4), зона на средна ефективност на средството за РЕП (K е в диапазона от 0,4 до 0,8) зона на висока ефективност на средството за РЕП (K е над 0,8).

Литература

1. Димитров Д., В. Николова, П. Василева, М. Асенов. Технически и организационни аспекти на подходите, прилагани за осигуряване на ефективна сигурност и защита на критичната инфраструктура. Сб. докл. Шеста национална конференция с международно участие „Металознание, хидро-и аеродинамика, национална сигурност 2017“, с.210-252, ISSN:1313-8303.
2. Stoichev K., D. Bratanov, S. Burdjiev, D. Dimitrov, V. Panevski, A. Tumbarska, G. Damianov. Improving and enhance the tools needed to coordinate intersectoral actions to protect critical infrastructure in a situation of complex terrorist threats (CISCOT). Сб. докл. Четвърта национална конференция с международно участие „Металознание, хидро- и аеродинамика, национална сигурност 2014“, с.336-339, ISSN:1313-8303.
3. Stoichev K., Development of tools needed to coordinate inter-sectoral power and transport CIP activities at a situation of multilateral terrorist threat. Increasing of the protection capacity of key CIP objects in BULGARIA – BULCIP. Collection of materials with the above with Project reference number: HOME/2010/CIPS/AG/019, 2013, ISBN:978-954-92552-6-3
4. Tumbarska A., P. Petkov. Non-lethal Weapons in the Context of the Required by International Law. Сборник доклади от Научна конференция „Актуални проблеми на сигурността“, Том 4, НБУ "В.Левски", 2017, ISSN:2367-7465, с.148-158.
5. Тумбарска А. Методология за оценяване потенциалните възможности на нелетателни средства. Сб. Докл. Пета национална конференция с международно участие „Металознание, хидро- и аеродинамика, национална сигурност 2015“, с.334-338, ISSN 1313-8303.
6. Tumbarska A. Criteria for Evaluating the Capabilities of Groups of Similar Non-lethal Weapons. International Scientific Journal “Security & Future”, No.1, 2017, pp.30-33, ISSN 2535-0668.
7. Георгиев Н.Л., В.И. Пехливански, С.Й. Георгиев, Т.Г. Любенов. Възможности за противодействие на безпилотни летателни апарати. Научна конференция с международно участие „Единно европейско въздушно пространство – същност и предизвикателства пред въздушния суверенитет и бизнеса“, 2017 г., ISBN:978-954-752-175-9
8. Георгиев Н.Л. Критерии за качеството на системи за защита на обекти от критичната инфраструктура. Сб. докл. Четвърта национална конференция с международно участие „Металознание, хидро- и аеродинамика, национална сигурност 2014“, 2015, с.386-390, ISSN:1313-8303
9. http://en.wikipedia.org/wiki/Unmanned_aerial_vehicle
10. Сколник М. Справочник по радиолокация. Том1, Советское Радио, Москва, 1976.
11. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. т.2, М.: Сов. радио, 1968.