

УДК 621.396.67

# ФОКУСИРОВКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СРЕДСТВАХ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ СРЕДНЕЙ И БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ

К.т.н. А.В. Гомозов<sup>1</sup>, к.т.н. Д.В. Грецких<sup>2</sup>, к.т.н. Е.В. Шарапова<sup>2</sup>, Н.М. Цикаловский<sup>2</sup>

1. Сертификационный центр ракетно-космической техники Харьковского представительства генерального заказчика – Государственного космического агентства Украины, г. Харьков

2. Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Статья посвящена одной из актуальной группе вопросов в области радиоэлектронной борьбы. А именно, вопросам, возникающих при решении задач, связанных с возможностью поражения бортовых радиоэлектронных средств беспилотных летательных аппаратов (БЛА), сфокусированными мощными внеполосными излучениями электромагнитных полей микроволнового диапазона, что приводит к нарушению нормального, штатного их функционирования вплоть до выхода из строя.

Статья присвячена одній актуальній групі питань в області радіоелектронної боротьби. А саме, питанням, що виникають при вирішенні завдань, пов'язаних з можливістю ураження бортових радіоелектронних засобів безпілотних літальних апаратів (БЛА) сфокусованими потужними позасмуговими випромінюваннями електромагнітних полів мікрохвильового діапазону, що призводить до порушення нормального, штатного їх функціонування аж до виходу зі строю.

The article is devoted to one of the most urgent group of issues in the field of electronic warfare. Namely, the issues that arise when solving problems related to the possibility of destroying the on-board radio electronic means of unmanned aerial vehicles (UAVs) by powerful out-of-band emissions of electromagnetic fields of the microwave range, which leads to a disruption of their normal, regular operation up to failure.

**Ключевые слова:** функциональное поражение, беспилотный летательный аппарат, фокусировка электромагнитного поля

## Введение

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) нашли широкое применение в военной и гражданской сферах. В передовых странах мира разработаны и продолжают высокими темпами совершенствоваться и создаваться новые образцы БЛА широкого спектра лётно-технических характеристик и назначения. Это наглядно иллюстрирует табл. 1, где приведена классификация БЛА по категориям, массе, дальности действия, которая составлена на основании базовых стандартов альтернативной классификации UAV INTERNATIONAL, STANAG, CAP 722 [1].

Применение БЛА в ходе локальных конфликтов по всему миру показало, что они создают реальную военную

и террористическую угрозу особо важным военным объектам и элементам государственной инфраструктуры.

Таблица 1

Категория	Подкатегория	Масса (кг)	Максимальная дальность действия (км)
Тактические (ближнего действия)	нано (Nano, η)	0.025	менее 1
	микро (Micro, μ)	до 5	менее 10
	мини (Mini)	менее 20 – 150	менее 30
	сверх лёгкие (CR)	25 – 150	10 - 30
Оперативно-тактические (ближнего действия)	лёгкие (SR)	50 – 250	30 - 80
Оперативные (малой дальности)	средние (MR)	150 – 500	80 - 200
	среднетяжёлые (MRE)	500 – 1500	200 - 500
	тяжёлые низковысотные (LADP)	250 – 2500	250 - 300
Оперативно-стратегические (средней дальности)	лёгкие низковысотные большой продолжительности полёта (LALE)	150 – 250	500 - 800
	тяжёлые средневысотные большой продолжительности полёта (MALE)	1000 – 1500	500 - 800
Стратегические (большой продолжительности полёта)	тяжёлые высотные большой продолжительности полёта (HALE)	2500 – 5000	более 2000
Специальные	беспилотные боевые самолёты (UCAV)	более 1000	не менее 1500
	камикадзе (Lethal/LETH)		
	мираж (Decoy/DEC)		
	стратосферные (STRATO)		
	экзостратосферные (EXO)		
	космические (SPACE)		

С учетом невысокой относительной стоимости БЛА, нецелесообразностью с точки зрения системотехнического критерия «эффективность-стоимость» использования средств противовоздушной обороны для уничтожения беспилотных средств наблюдения, разведки и наведения, необходимо искать новые нетрадиционные методы нейтрализации БЛА.

Одним из достаточно эффективных способов решением проблемы нейтрализации БЛА являются средства радиоэлектронного противодействия (РЭП) каналам управления, передачи данных и спутниковой навигации. Применение РЭП приведет к срыву обратной связи с БЛА и потере самим БЛА сигналов управления и геопозиционирования, полет БЛА завершится досрочным возвращением или безвозвратной потерей.

Практическая возможность и реализуемость РЭП радиоэлектронных средств (РЭС) БЛА не раз подтверждена как фактами, освещенными в средствах массовой информации, так и рядом военно-технических экспериментов. Поэтому в ближайшей перспективе весьма актуальны разработки комплексов радиоэлектронной борьбы (РЭБ), реализующих как традиционные, так и инновационные способы радиоэлектронного противодействия бортовым радиоэлектронным системам БЛА.

В данной статье рассматривается одно из перспективных направлений РЭБ с БЛА - функциональное поражение (ФП) его бортовых РЭС мощным сфокусированным электромагнитным излучением (ЭМИ) микроволнового диапазона, которое проникает в электронные системы не только через антенну или оптическую систему, но и через провода по цепям питания, через различные технологические люки, зазоры, трещины, отверстия и тому подобные неоднородности сплошных экранов. Результатом воздействия подобных ЭМИ на РЭС может быть деградация наиболее чувствительных к энергетическим перегрузкам или к полемому пробоем радиоэлектронных элементов, приводящая к необратимому выводу из строя с полной потерей работоспособности основных функциональных устройств РЭС.

#### **Постановка задачи исследований**

К проблемам создания преднамеренных силовых деструктивных воздействий на РЭС в последние годы появился большой интерес как в связи с развитием техники генерации, усиления и излучения мощных электромагнитных полей, так и некоторыми ощутимыми недостатками традиционных средств РЭП, компенсируемых применением средств ФП. Отметим основные из них [2].

1. Традиционным средствам РЭБ присуще практически неустраняемое запаздывание в ответной реакции на непредсказуемые действия противника, в частности на изменение режима работы, вида и параметров сигналов подавляемых РЭС.

2. Длительность нарушения нормального функционирования РЭС практически равна длительности эффективного действия помехи. Снижение эффективности помехи или ее выключение автоматически ведет к восстановлению режима нормального функционирования РЭС. При ФП происходит прекращение функционирования отдельных элементов или РЭС в целом, вызванное разрушением структуры этих элементов. Разрушение структуры приводит к невосстанавливаемым (необратимым) отказам РЭС или их элементов.

3. Конкретные образцы традиционных средств РЭП ориентированы на подавление РЭС определенного функционального назначения и определенного диапазона рабочих частот. Средства же ФП обладают внеполосным воздействием, т.е. поражают РЭС любого класса даже тогда, когда рабочая частота мощного микроволнового излучения далеко отстоит от полосы пропускания основного канала приема поражаемого РЭС. Это позволяет обеспечить поражение широкой номенклатуры РЭС самого различного функционального назначения с помощью средств ФП одного типа. В этом смысле средства функционального поражения являются универсальными.

4. Средства ФП способны поражать узлы и элементы таких электронных средств, которые не подвержены воздействию традиционных видов помех, а именно: передающие устройства, блоки питания, инерциальные системы наведения, вычислительные средства, элементы антенно-фидерных трактов, волоконно-оптические линии связи.

В связи с вышесказанным целесообразно провести исследования, связанные с поиском путей реализации внеполосных способов ФП и повышением их эффективности, что было и сделано в рамках данной статьи.

В настоящее время интенсивно развивается одно из основных направлений реализации средств ФП с малой длительностью мощных воздействующих импульсов на основе микроволновых передающих фазированных антенных решеток (ФАР) с фокусировкой электромагнитного излучения. Такие средства ФП обладают условной скрытностью, свойствами электромагнитной совместимости и могут быть реализованы с использованием существующей, освоенной промышленностью, элементной базы для генераторных и антенно-фидерных устройств. Однако, необходимая достаточно большая мощность излучения при ФП накладывает жесткие требования к электрической прочности отдельных излучающих элементов и учету их взаимного влияния. В связи с этим, для повышения мощности и достижения необходимых значений плотности потока мощности в области пространства, где находится движущийся БЛА, подлежащий ФП, при недостаточной мощности отдельного образца средства ФП с фокусировкой ЭМИ можно когерентно суммировать ЭМП от группы таких

средств, т.е. осуществлять фокусировку ЭМИ с помощью многопозиционной системы излучателей (МСИ). Пространственно-когерентную МСИ можно рассматривать как единую разреженную антенную решетку заданной пространственной конфигурации. При разнесении на необходимое расстояние и большом числе в МСИ образцов средств ФП с фокусировкой ЭМИ и ограниченной мощностью можно обеспечить электромагнитную совместимость и исключить подавление собственных РЭС. Фокусировка ЭМИ на основе многопозиционных систем излучателей устраняет ограничения по дальности передачи энергии сфокусированным лучом однопозиционными передающими антеннами (протяженность зоны Френеля зависит от геометрических размеров передающей антенны). Средства ФП на основе МСИ можно строить на базе всех известных многообразных однопозиционных и многопозиционных РЭС с ФАР и уже освоенной промышленностью современной элементной базой для них.

Следует отметить, что такой подход успешно использовался в работах [3,4], в которых рассматривались вопросы беспроводного энергоснабжения микроволновым лучом труднодоступных наземных и подвижных объектов, где также требуются формирование мощных сфокусированных электромагнитных излучений на апертурах крупноапертурных ректенн [5] с обеспечением требований электромагнитной совместимости и биологической безопасности.

**Математическое моделирование поля МСИ в точке траектории движения БЛА**

Запишем выражение для плотности потока мощности в неподвижной точке фокусировки, создаваемой МСИ (рис. 1) с размерами апертуры в плоскостях XOZ и YOZ -  $L_x$  и  $L_y$ , соответственно (с учетом направленных свойств ее излучающих элементов)

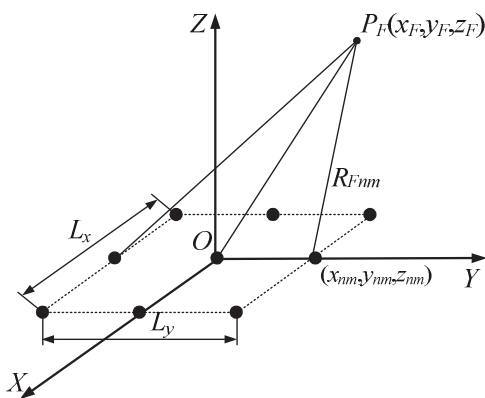


Рис. 1. Многопозиционная система излучателей

$$S(x, y, z, t) = \left[ \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} \sqrt{\frac{P_{nm} G_{nm}}{4\pi R_{nm}^2}} \times \left[ F_{nm}(\theta, \varphi) e^{-j \left[ 2\pi f_0 \left( t - \frac{R_{nm}}{c} \right) + \psi_{0nm} \right]} \right] \right]^2 \quad (1)$$

где  $\psi_{0nm} = -2\pi f_0 \left( \frac{z_F}{c} - \frac{R_{Fnm}}{c} \right)$  – начальные фазы излучателей в МСИ для когерентного сложения ЭМИ в точке фокусировки  $P_F(x_F, y_F, z_F)$ ;

$$R_{Fnm} = \sqrt{(x_F - x_{nm})^2 + (y_F - y_{nm})^2 + (z_F - z_{nm})^2}$$

– расстояние между точкой фокусировки  $P_F(x_F, y_F, z_F)$  и центром  $nm$ -го излучателя с координатами  $(x_{nm}, y_{nm}, z_{nm})$ ;

$$R_{nm} = \sqrt{(x - x_{nm})^2 + (y - y_{nm})^2 + (z - z_{nm})^2}$$

– расстояние до точки наблюдения от  $nm$ -го излучателя;  $c$  – скорость света,  $z_F$  – расстояние между точкой фокусировки и центральным излучателем МСИ;  $F_{nm}(\theta, \varphi)$  – нормированная диаграмма направленности по полю  $nm$ -го излучателя многопозиционной антенны.

Для внеполосного подавления диапазон частот средства ФП выбирается при приближенном учете рабочих частот подавляемых РЭС, исходя из возможностей реализации приемлемых массогабаритных параметров антенной решетки средства ФП и подавления наибольшего числа типов РЭС. Исходным компромиссным значением при этом можно принять длину волны воздействующего пространственно-временного импульса (ПВИ)  $\lambda \approx 2$  см.

Протяженность сфокусированного ПВИ по координатам  $x$  и  $y$  (поперечные линейные размеры сфокусированного пучка в окрестности точки фокусировки  $z_F$ ) определяется в первом приближении по известным выражениям для синфазных антенных решеток

$$\Delta x_F \approx 2 \left( \frac{\lambda}{L_x} \right) z_F, \quad \Delta y_F \approx 2 \left( \frac{\lambda}{L_y} \right) z_F. \quad (2)$$

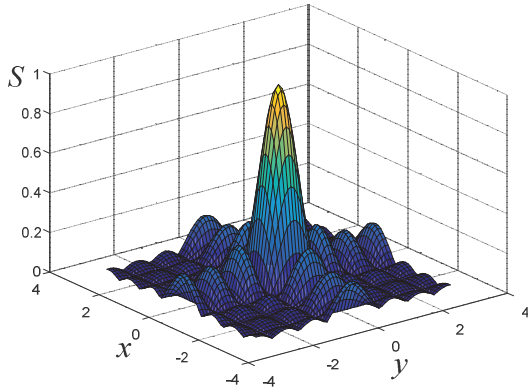
В табл. 2 приведены результаты расчета по формуле (2) размеров апертур МСИ при заданных поперечных размерах зон ФП на различных расстояниях фокусировки.

Таблица 2

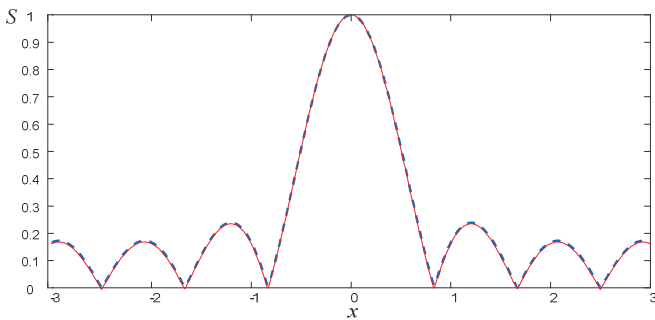
$\Delta x_F = \Delta y_F$ , м	2	2	2	2	2	2
$z_F$ , км	5	10	15	20	25	30
$L_x = L_y$ , м	100	200	300	400	500	600

На рис. 2 приведены результаты математического моделирования электромагнитного поля в окрестности точки фокусировки на частоте 15 ГГц в предположении, что амплитудное распределение по МСИ равномерное, а ее

излучающими элементами являются плоские квадратные ФАР с рупорными излучателями. Число ФАР в МСИ - 36.



а)  $z_F = 30$  км,  $L_x = L_y = 300$  м



б) распределение нормированной плотности потока мощности в плоскости XOZ

сплошная линия -  $z_F = 5$  км,  $L_x = L_y = 50$  м,

пунктирная линия  $z_F = 30$  км,  $L_x = L_y = 300$  м)

Рис. 2. Распределение нормированной плотности потока мощности в окрестности точки фокусировки

Из приведенных зависимостей видно, что микроволновый пучок сфокусирован и варьируя размерами апертуры МСИ, можно обеспечить постоянство размеров области пространства для ФП на различных расстояниях фокусировки (рис. 2 б). Это обстоятельство играет важную роль для обеспечения электромагнитной совместимости, тем самым, исключая случаи поражения собственных РЭС мощными электромагнитными излучениями. Уровни боковых излучений можно уменьшить применением спадающих к краям апертуры МСИ амплитудным распределениям. Заданные формы зон для ФП можно обеспечить путем решения задачи структурного синтеза МСИ.

При ФП маневрирующих БЛА необходимо предусмотреть возможность фокусировки ЭМИ в МСИ в подвижную точку  $P_F(x_F, y_F, z_F)$  траектории их движения. Новые координаты такой точки фокусировки в общем случае могут быть определены, если в заданный момент времени проводить экстраполяцию траектории движения сопровождаемого БЛА на основе радиолокационной информации, полученной в предыдущие временные отсчеты.

По известным прямоугольным координатам точки фокусировки  $P_F(x_F, y_F, z_F)$  в заданный момент времени новые их значения в сферической системе координат, связанной с  $nm$ -м излучателем МСИ (рис. 1), могут быть рассчитаны с использованием следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} R_{nm}(t) = \sqrt{(x_F(t) - x_{nm})^2 + (y_F(t) - y_{nm})^2 + (z_F(t) - z_{nm})^2}, \\ \theta_{nm}(t) = \arccos \frac{z_F(t) - z_{nm}}{R_{nm}(t)}, \\ \varphi_{nm}(t) = \arctg \frac{z_F(t) - z_{nm}}{y_F(t) - y_{nm}}. \end{cases} \quad (3)$$

Знание угловых координат новой точки фокусировки позволяет задать дополнительное фазовое распределение в виде аддитивной добавки к квадратичному фазовому набегу, обеспечивающей отклонение сфокусированного луча от направления нормали к излучателю МСИ. Для сканирования нужно добавлять линейное фазовое распределение вдоль апертуры МСИ. При независимом сканировании или разделяющемся распределении добавка по углу места  $\xi_{0\theta}$  и азимуту  $\xi_{0\varphi}$  в МСИ имеет вид:

$$\xi_{0\theta}(x_{nm}) = -a_{nm}x_{nm} \text{ и } \xi_{0\varphi}(y_{nm}) = -b_{nm}y_{nm},$$

где  $a_{nm} = \left(\frac{\pi L_x}{\lambda}\right) \sin \theta_{nm} \cos \varphi_{nm}$ ,  $b_{nm} = \left(\frac{\pi L_y}{\lambda}\right) \sin \theta_{nm} \sin \varphi_{nm}$  – крутизна фазовых распределений.

В случае фокусировки в подвижную точку коэффициенты  $a_{nm}$  и  $b_{nm}$  будут зависеть от времени в соответствии с заданным законом движения объекта, определяемого на основе (3).

Таким образом, выражение для расчета плотности потока мощности при фокусировке в неподвижную точку (1) должно модифицироваться путем добавления линейного фазового распределения, определяемого законом движения БЛА и пересчетом квадратичной добавки  $\psi_{0n}$  в случае изменения расстояния фокусировки.

### Оценка требуемых временных и энергетических характеристик пространственно-временных импульсов для ФП

В ряде случаев в РЭС могут применяться специальные устройства защиты с малым временем срабатывания, блокирующие приемные устройства при наличии на их входе не только сигнала собственного передатчика (при совмещенной приемно-передающей антенне), но и большого уровня любых других входных сигналов. Время срабатывания устройств защиты составляет порядка 10 нс. С учетом этого длительность воздействующего сфокусированного пространственно-временного импульса должна обеспечивать также условие

$$\tau_B \leq \tau_C \quad (4)$$

где  $\tau_B$ ,  $\tau_C$  – соответственно длительность воздействующего ПВИ и время срабатывания устройства

защиты от перегрузок по входу приемника подавляемой РЭС. Следовательно,  $\tau_b$  должно быть во всех случаях равно или меньше 10 нс. Для большинства приемных устройств условие (4) выполняется при  $\tau_b \leq 5...10$  нс.

Период следования этих воздействующих ПВИ должен выбираться таким образом, чтобы колебания самовозбуждения в приемном устройстве РЭС к приходу каждого последующего воздействующего ПВИ затухали не более чем на (50...70)%, то есть:

$$T_b \leq (0.7...1.2)\tau_{\Pi} \approx (0.7...1.2)/\pi\Delta f_{\Pi} \approx (0.22...0.38)/\Delta f_{\Pi}, \quad (5)$$

где  $\Delta f_{\Pi}$  и  $\tau_{\Pi}$  – полоса пропускания и постоянная времени установления собственных колебаний приемника подавляемой РЭС.

Требуемая мощность  $P_{\Phi\Pi}$  одиночного воздействующего ПВИ в случае внеполосного воздействия на входах приемных устройств РЭС для их ФП должна быть

$$P_{\Phi\Pi} \geq P_{\Pi\min} K_{\text{дд}} K_{\text{сп}}. \quad (6)$$

При этом требуемую плотность потока мощности одиночного воздействующего ПВИ в заданной локальной области фокусировки, которая соответствует местоположению БЛА, предназначенного для ФП, с учетом относительного углового рассовмещения диаграмм направленности (ДН) антенн РЭС и сфокусированного микроволнового луча средства ФП следует выбирать из условия:

$$S_{\Phi\Pi} \geq \frac{P_{\Phi\Pi}}{A_{\text{эф}}} K_{\text{ур}}. \quad (7)$$

В соотношениях (6), (7) обозначено:  $P_{\Pi\min}$ ,  $K_{\text{дд}}$  – чувствительность и динамический диапазон приемников РЭС;  $K_{\text{сп}}$  – коэффициент компенсации потерь за счет несовпадения средних частот спектров воздействующих ПВИ и полос пропускания  $\Delta f_{\Pi}$  подавляемых РЭС;  $A_{\text{эф}}=A_{\Gamma}$   $K_{\text{ин}}$  – эффективная площадь антенн подавляемых РЭС;  $K_{\text{ин}}$  – коэффициент эффективного использования геометрической площади  $A_{\Gamma}$  апертуры антенны;  $K_{\text{ур}}$  – коэффициент компенсации потерь, связанных с угловым несовпадением направлений ДН антенн поражаемых РЭС и сфокусированного луча средств ФП.

Эффективную площадь антенн РЭС, которые предназначены для ФП, можно ориентировочно оценить по соотношениям:

- для вибраторной антенны

$$A_{\text{эф}} = K_{\text{ин}} \frac{(2...4)L\lambda}{4\pi}, \quad (8)$$

- для антенны бегущей волны

$$A_{\text{эф}} = K_{\text{ин}} \frac{(7...8)L\lambda}{4\pi}, \quad (9)$$

- для плоских ФАР, и зеркальных антенн

$$A_{\text{эф}} = K_{\text{ин}} A_{\Gamma}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – длина волны воздействующего ПВИ средства ФП;  $L$  – длина антенн поражаемых РЭС;  $A_{\Gamma}$  – геометрическая площадь апертуры антенны.

Оценка значений  $A_{\text{эф}}$ , полученных по выражениям (8) - (10) при  $\lambda=2$  см,  $K_{\text{ин}}=0.85$  и  $L=0.5...5$  м показывают, что при одинаковых размерах  $L$  минимальны эффективные площади у вибраторных антенн, затем по возрастающей идут антенны бегущей волны и зеркальные. Расчеты показали, что для РЭС, которые подлежат ФП, наиболее типичными являются значения от  $A_{\text{эф}} = 13.5$  см<sup>2</sup> до  $A_{\text{эф}} = 7.7 \cdot 10^4$  см<sup>2</sup>.

Энергетический порог для достижения эффекта деградации радиоэлектронных элементов определяется временем релаксации тепловых процессов (тепловой инерции). Оно для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем составляет  $\tau_t \geq 10...100$  нс. При выполнении условия (4) оказывается, что  $\tau_b < \tau_t$  и для тепловой деградации тоже требуются периодические последовательности сфокусированных ПВИ, а необходимый эффект при этом можно получить за счет сум марного времени воздействия всей пачки ПВИ за вычетом интервалов между ними, если период их следования  $T_b < \tau_t$  [3]. Требуемая мощность на входе полупроводникового прибора для его деградации определяется соотношением:

$$P_{\Phi\Pi} = K_{\Pi} \tau_{\text{в}\Sigma}^{-(1/2)} S_{p-n}, \quad (11)$$

где  $K_{\Pi}$  – постоянная теплового повреждения для соответствующего вида полупроводникового прибора, которая имеет размерность [кВт/(мкс)<sup>1/2</sup>·см<sup>-2</sup>];  $\tau_{\text{в}\Sigma}$  – суммарное время воздействия на поражаемые РЭС периодическими ПВИ без учета интервалов между ними;  $S_{p-n}$  – площадь  $p$ - $n$ -перехода в см<sup>2</sup>.

Требуемая мощность одиночного воздействующего ПВИ на входах приемных устройств РЭС для их ФП для внеполосного поражения должна быть:

$$P_{\Phi\Pi} = K_{\Pi} \tau_{\text{в}\Sigma}^{-(1/2)} S_{p-n} K_{\Pi}. \quad (12)$$

В табл. 3 приведены результаты расчетов требуемой мощности  $P_{\Phi\Pi}$  на входе некоторых типов полупроводниковых приборов для их деградации

Таблица 3

Тип полупроводникового прибора	$K_{\Pi}$	$S_{p-n}$ , см <sup>2</sup>	$\tau_{\text{в}\Sigma}$ , мс	$P_{\Phi\Pi}$ , мВт	
				$K_{\text{сп}}=30$ дБ	$K_{\text{сп}}=40$ дБ
Диоды и транзисторы	0.1	$10^{-3}...5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$316...1.6 \cdot 10^3$	$3160...1.6 \cdot 10^4$
Диоды СВЧ	0.01	$10^{-3}...5 \cdot 10^{-2}$	$10^2$	$31.6...1.6 \cdot 10^3$	$316...1.6 \cdot 10^4$
Интегральные схемы	0.1	$10^{-4}...2 \cdot 10^{-3}$	$10^2$	$31.6...630$	$316...6.3 \cdot 10^3$

Требуемые спектральные плотности потока мощности  $S_{\Phi\Pi}$  для внеполосного поражения оцениваются по соотношению (7). Результаты оценок требуемых для

внеполосного ФП плотностей потоков мощности  $S_{ФП}$  (мВт/см<sup>2</sup>), приведены в табл. 4 - 6: для РЭС с вибраторными антеннами в табл. 4; для РЭС с антеннами бегущей волны в табл. 5; для РЭС с ФАР и зеркальными антеннами в табл. 6.

Таблица 4

Тип полупроводникового прибора	Диоды и транзисторы	Диоды СВЧ	Интегральные схемы	$K_{ур}$ , дБ
$P_{ФП}$ , мВт	316...1.6·10 <sup>5</sup>	32...1.6·10 <sup>4</sup>	32...6.3·10 <sup>3</sup>	
$A_{эф}=13.5...27$ см <sup>2</sup> ( $L=0.5$ м)	12...1.2·10 <sup>4</sup>	1.2... 1.2·10 <sup>3</sup>	1.2...470	0
	23...2.3·10 <sup>4</sup>	2.3...2.3·10 <sup>3</sup>	2.3...930	3
	37...3.7·10 <sup>4</sup>	3.7...3.7·10 <sup>3</sup>	3.7...1500	5
$A_{эф}=54...108$ см <sup>2</sup> ( $L_{п}=2.0$ м)	3...3·10 <sup>3</sup>	0.3...3·10 <sup>2</sup>	0.3...120	0
	5.8...5.8·10 <sup>3</sup>	0.58...580	0.58...230	3
	9.2...9.2·10 <sup>3</sup>	0.9...9.2·10 <sup>2</sup>	0.9...370	5
$A_{эф}=135...271$ см <sup>2</sup> ( $L=5.0$ м)	1.2...1.2·10 <sup>3</sup>	0.12...120	0.12...47	0
	2.3...2.3·10 <sup>3</sup>	0.23...230	0.23...93	3
	3.7...3.7·10 <sup>3</sup>	0.37...370	0.37...150	5

Из табл. 4 следует, что внеполосное поражение РЭС с вибраторными антеннами при указанных выше исходных условиях обеспечивается при следующих плотностях потоков мощности  $S_{ФП} \geq (0.12...3.7 \cdot 10^4)$  мВт/см<sup>2</sup>.

Таблица 5

Тип полупроводникового прибора	Диоды и транзисторы	Диоды СВЧ	Интегральные схемы	$K_{ур}$ , дБ
$P_{ФП}$ , мВт	316...1.6·10 <sup>5</sup>	32...1.6·10 <sup>4</sup>	32...6.3·10 <sup>3</sup>	
$A_{эф}=47...54$ см <sup>2</sup> ( $L=0.5$ м)	5.8...3.3·10 <sup>3</sup>	0.58...330	0.6...1.3·10 <sup>2</sup>	0
	20...1.1·10 <sup>4</sup>	2...1.1·10 <sup>3</sup>	2...4.2·10 <sup>2</sup>	5
	58...3.3·10 <sup>4</sup>	5.8...3.3·10 <sup>3</sup>	5.8...1.3·10 <sup>3</sup>	10
$A_{эф}=142...162$ см <sup>2</sup> ( $L=1.5$ м)	2...1.1·10 <sup>3</sup>	0.2...110	0.2...45	0
	6.2...3.5·10 <sup>3</sup>	0.62...350	0.62...140	5
	20...1.1·10 <sup>4</sup>	2...1.1·10 <sup>3</sup>	2...450	10
$A_{эф}=237...271$ см <sup>2</sup> ( $L=2.5$ м)	1.2...6.7·10 <sup>2</sup>	0.12...67	0.12...27	0
	3.7...2.1·10 <sup>3</sup>	0.37...210	0.37...85	5
	12...6.7·10 <sup>3</sup>	1.2...670	1.2...270	10

Из табл. 5 следует, что для внеполосного поражения РЭС с антеннами бегущей волны средства ФП должны обеспечивать плотности потоков мощности в пределах  $S_{ФП} \geq (0.12...3.3 \cdot 10^4)$  мВт/см<sup>2</sup>.

Таблица 6

Тип полупроводникового прибора	Диоды и транзисторы	Диоды СВЧ	Интегральные схемы	$K_{ур}$ , дБ
$P_{ФП}$ , мВт	316...1.6·10 <sup>5</sup>	32...1.6·10 <sup>4</sup>	30...6·10 <sup>3</sup>	
$A_{эф}=2130$ см <sup>2</sup> ( $L=0.5$ м)	0.15...74	0.015...7.4	0.015...3	0
	1.5...740	0.15...74	0.15...30	10
	15...7.4·10 <sup>3</sup>	1.5...740	1.5...300	20
$A_{эф}=1.9 \cdot 10^4$ см <sup>2</sup> ( $L=1.5$ м)	0.017...8.3	1.7·10 <sup>-3</sup> ...0.83	1.7·10 <sup>-3</sup> ...0.3	0
	0.17...83	0.017...8.3	0.017...3	10
	1.7...830	0.17...83	0.17...33	20
$A_{эф}=7.7 \cdot 10^4$ см <sup>2</sup> ( $L=3.0$ м)	4·10 <sup>-3</sup> ...2.1	4·10 <sup>-4</sup> ...0.2	4·10 <sup>-4</sup> ...0.1	0
	0.04...21	4·10 <sup>-3</sup> ...2	4·10 <sup>-3</sup> ...0.8	10
	0.4...210	4·10 <sup>-2</sup> ...21	4·10 <sup>-2</sup> ...8	20

Из табл. 6 следует, что для внеполосного поражения РЭС с ФАР и зеркальными антеннами при заданных значениях параметров  $P_{п min}$ ,  $L$ ,  $A_{эф}$ ,  $K_{ур}$  и видах полупроводниковых радиоэлектронных элементов, чувствительных к поражающим эффектам наносекундных ПВИ, средства ФП должны обеспечивать плотности потоков мощности  $S_{ФП} \geq (4 \cdot 10^{-4} \dots 830)$  мВт/см<sup>2</sup>.

Потенциальное значение дальности ФП определяется уравнением функционального поражения [2].

**Выводы**

Результаты исследований показали, что при принятых исходных условиях, типах антенн РЭС и допустимых угловых смещениях  $\pm 30^0$  ДН антенн РЭС и сфокусированного луча средств ФП в местоположении поражаемого БЛА, должны создавать одиночные ПВИ внутри их пачки длительностью  $\tau_{\Sigma}=100$  мс без учета интервалов между импульсами с возможностью изменения значений  $S_{fd}$  в пределах от  $4 \cdot 10^{-4}$  до  $4 \cdot 10^4$  мВт/см<sup>2</sup>.

Необходимую плотность потока мощности в точке фокусировки можно обеспечить варьированием числа излучателей в МСИ.

Из изложенного в статье материала и проведенных исследований можно констатировать, что на современном этапе альтернативные средства ФП с фокусировкой ЭМИ в МСИ имеют сравнительно весомые достоинства перед традиционными средствами РЭБ и принципиально занимают перспективное место в решении проблемы ФП различных классов БЛА.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:**

1. Корченко А. Г. Обобщённая классификация беспилотных летательных аппаратов / А. Г. Корченко, О.С. Ильяш // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. - 2012. - № 4. - С. 27-36.
2. Добыкин В. Д., Куприянов А. И., Пономарев В. Г., Шустов Л. Н. Радиоэлектронная борьба. Силовое поражение радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин, А. И. Куприянов, В. Г. Пономарев, Л. Н. Шустов; Под ред. А. И. Куприянова. - М.: Вузовская книга, 2007. - 468 с.
3. Gomozov A.V., Shokalo V.M., Gretskih D.V., Al-Sammarraie Sh.F.A. Principles of construction and application of microwave systems for wireless energy transmission of ground and space basing // IEEE Computational problems of electrical engineering, under the auspice of Lviv polytechnic national university. - Vol. 2, No.1, 2012 - p. 15-23.
4. A. V. Gomozov, D.V. Gretskih, N. M. Tsikalovskiy, E. V. Sharapova The radio frequency power supply system for unmanned aerial vehicles // Antenna theory and techniques: 10-th International conference., 21-24 April. 2015: International conference - Kharkiv. - P. 202-204.
5. D.V. Gretskih, A.V. Gomozov, V.A. Katrich, A.I. Luchaninov, M.V. Nesterenko, Y.M. Penkin. Mathematical Model of Large Rectenna Arrays for Wireless Energy Transfer // Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 74, 77-91, 2017.