

УДК 621.396.677

А.В. Ирха<sup>1</sup>, Г.В. Ермаков<sup>2</sup>, М.Н. Ясечко<sup>1</sup><sup>1</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков<sup>2</sup>Академия внутренних войск, Харьков

## АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К ВРЕМЕННЫМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПАЧКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ СРЕДСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОРАЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

*Проведен анализ пространственных характеристик зеркальной антенны средства функционального поражения при излучении сверхширокополосных сигналов в диапазоне 2÷8 ГГц. Рассчитаны временные и энергетические параметры пачки сверхширокополосных сигналов, обеспечивающей деградацию полупроводниковых элементов входных каскадов приемного устройства при тепловом режиме поражения.*

**Ключевые слова:** временные и энергетические параметры, пачка сверхширокополосных сигналов, деградация полупроводниковых элементов.

### Введение

**Анализ литературы.** Тенденции развития систем связи Сухопутных войск США предполагают широкое использование радиорелейных станций (РРС) различных диапазонов длин волн. В частности, расширение зоны действия наземных систем и средств связи будет достигаться в основном за счет использования принципов ретрансляции, включая использование в качестве платформ для размещения ретрансляторов беспилотных летательных аппаратов. Использование многолучевых адаптивных цифровых антенных решеток в РРС позволит многократно увеличить помехозащищенность таких станций, противостоять которым традиционными методами подавления будет практически невозможно.

Поэтому одним из возможных способов противодействия РРС в широкой полосе частот является их функциональное поражение (ФП) с использованием мощных электромагнитных импульсов [1], излучаемых средствами функционального поражения наземного (мобильные комплексы) или воздушного (беспилотные летательные аппараты, крылатые ракеты, аэростаты и т.п.) базирования.

**Целью данной статьи** является обоснование технических требований к средствам ФП воздушно-го базирования.

### Основная часть

Воздушное базирование средства ФП РРС, например, на беспилотном летательном аппарате, имеет ряд преимуществ перед его наземным базированием, например, на бронетранспортере.

Во-первых, это расстояние, с которого может осуществляться поражение РРС. Как указывалось выше, расстояние между линией фронта и расположением РРС составляет величину порядка 15 км. Поэтому минимальное расстояние между наземным

средством функционального поражения и подавляемой РРС будет не меньше 20 км. В случае воздушного базирования средства ФП расстояние может быть существенно сокращено, например, до 1 км и меньше.

Во-вторых, это трасса распространения. При наземном базировании средства ФП трасса распространения проходит вблизи поверхности земли и напряженность электрического поля  $E_{нб}$ , создаваемого в районе РРС, должна рассчитываться по формуле Введенского [2]:

$$E_{нб} = \frac{4\pi\sqrt{90P_{изл}G} H_{прд} H_{прм}}{\lambda R_{нб}^2}, \quad (1)$$

где  $P_{изл}$  – излучаемая пиковая мощность средства ФП;  $G$  – коэффициент усиления антенны средства ФП;  $\lambda$  – рабочая длина волны;  $H_{прд}$ ,  $H_{прм}$  – высота подъема антенных систем средства ФП и РРС;  $R_{нб}$  – расстояние между средством ФП наземного базирования и РРС.

При воздушном базировании поражающий электромагнитный импульс (ЭМИ) распространяется в свободном пространстве, т.е. напряженность электрического поля в районе РРС будет рассчитываться по формуле [2]:

$$E_{вб} = \frac{\sqrt{60P_{изл}G}}{R_{вб}}, \quad (2)$$

где  $R_{вб}$  – расстояние между средством ФП воздушного базирования и РРС.

Анализ формул (1), (2) показывает, что напряженность электрического поля в районе РРС при воздушном базировании будет приблизительно на восемь порядков выше, чем при наземном базировании.

В-третьих, при наземном базировании средства ФП необходимо учитывать, что функциональное поражение РРС возможно только по дальним боковым или заднему лепестку диаграммы направленности (ДН) антенны радиорелейной станции, что требует дополнительного увеличения мощности поражающего ЭМИ, т.е. фактически будет осуществляться внеполосное воздействие. При воздушном базировании средства ФП существует возможность функционального поражения РРС по ближним боковым лепесткам или даже по главному лепестку ДН, т.е. будет осуществляться внутриволновое воздействие.

В-четвертых, не возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) средства ФП с радиолокационными комплексами группировки.

Для определения параметров излучаемой пачки СШП сигналов (длительность, скважность) целесообразно воспользоваться результатами работ [3], в которых определены соответствующие уровни мощности, вызывающие деградацию полупроводниковых приборов приемных устройств при внутриволновом и внеполосном воздействиях электромагнитного излучения. Кроме этого, необходимо также определить пространственные характеристики СШП антенны.

При определении характеристик антенной системы средства ФП РРС учтем, что антенна средства ФП РРС является зеркальной с круговой поляризацией. Учитывая, что желательные габаритные размеры антенны должны быть порядка размеров генератора ( $0,62 \times 0,42 \times 0,25 \text{ м}^3$ ), зададимся диаметром параболической антенны  $d = 50 \text{ см}$ . В качестве рабочей излучающей поверхности можно использовать вырезку из такой антенны.

Учитывая, что для цифровых РРС типа "Диамант" рабочий диапазон частот составляет  $2 \div 8 \text{ ГГц}$ , для определения характеристик зеркальной антенны выберем наибольшую рабочую длину волны  $\lambda = 15 \text{ см}$  (диапазон частот  $1350 \div 2150 \text{ МГц}$ ).

Тогда ширина ДН может быть оценена по формуле [4]:

$$2\Theta_{0,5P}^0 = \frac{(65 \div 70)\lambda}{d}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр апертуры.

Из (3) найдем, что ширина ДН будет  $2\Theta_{0,5P}^0 = 21^\circ$ .

ДН зеркальной антенны является осесимметричной. Используя известное соотношение [4]:

$$D_{\text{макс}} = \frac{25000 \div 30000}{2\Theta_{0,5P}^0 2\varphi_{0,5P}^0}, \quad (4)$$

где  $2\Theta_{0,5P}^0, 2\varphi_{0,5P}^0$  – ширина ДН в угломестной и азимутальной плоскостях соответственно в градусах, найдем, что  $D_{\text{макс}} \approx 70$ .

Дальняя зона антенны определяется для наименьшей рабочей длины волны РРС "Диамант"  $\lambda_{\text{мин}} \approx 2,7 \text{ см}$  и составляет величину:

$$R \geq 2d^2 / \lambda_{\text{мин}} \approx 19 \text{ м}.$$

При дальности действия  $R = 1 \text{ км}$  диаметр "пятна", формируемого основным лепестком ДН сверхширокополосной (СШП) антенны, составит величину  $d_n = 170 \text{ м}$ .

При оценивании временных параметров ЭМИ для ФП необходимо учитывать, что в ряде случаев для защиты входных цепей могут применяться специальные устройства защиты с малым временем срабатывания. Время срабатывания лучших устройств защиты составляет величину порядка  $10 \text{ нс}$  [3]. Следовательно, длительность разрушающего сигнала  $\tau_{\text{СШП}}$  должна соответствовать условию:

$$\tau_{\text{СШП}} \leq \tau_3 = 10 \text{ нс}, \quad (5)$$

где  $\tau_3$  – время срабатывания устройств защиты при превышении заданного максимального уровня сигнала в приемных цепях РРС.

При ФП пачкой СШП сигналов для поддержания устойчивого самовозбуждения электронных устройств приемных трактов РРС длительность воздействующих импульсов следует выбирать из указанного выше условия (5). Предположим, что выполняется условие  $\tau_{\text{СШП}} = 1 \text{ нс}$ .

В свою очередь, период следования  $T_{\text{СШП}}$  таких воздействующих импульсов следует выбирать таким образом, чтобы колебания самовозбуждения к приходу каждого последующего импульса затухали не более чем на  $50 \dots 70\%$  [5], то есть

$$T_{\text{СШП}} \leq (0,7 \dots 1,2)\tau_n \approx \frac{0,7 \dots 1,2}{\pi \Delta f_n} \approx \frac{0,22 \dots 0,38}{\Delta f_n}, \quad (6)$$

где  $\Delta f_n$  и  $\tau_n$  – полоса пропускания и постоянная времени установления собственных колебаний приемного устройства подавляемой РРС.

Учитывая ширину полосы частот канала РРС, предположим, что  $\Delta f_n \leq 1000/36 = 27 \text{ МГц}$ . В этом случае с учетом (6) получим  $T_{\text{СШП}} \leq 8 \dots 14 \text{ нс}$  и, соответственно, значение скважности таких периодических последовательностей воздействующих импульсов при  $\tau_{\text{СШП}} = 1 \text{ нс}$  будет составлять

$$Q = \frac{T_{\text{СШП}}}{\tau_{\text{СШП}}} \leq 8 \dots 14.$$

Для дальнейших расчетов выберем количество импульсов в пачке  $N_{\text{имп}} = 1000$ ,  $T_{\text{СШП}} = 10 \text{ нс}$ , скважностью  $Q = 10$ ; длительность пачки составит  $\tau_{p\Sigma} = 11 \text{ мкс}$ .

В проведенных выше расчетах полагается, что функциональное поражение элементной базы входных каскадов приемного устройства будет определяться тепловым режимом. В принципе, количество импуль-

сов может быть любым, но с увеличением их количества снижаются требования к мощности передатчика, а соответственно и требования к массе и габаритным размерам аппаратуры, размещаемой на БПЛА.

Проведенные исследования показали, что соотношение для количественной оценки требуемой мощности на входе полупроводникового прибора, приводящей к его деградации, можно записать в следующем виде [3]:

$$P_{\text{фп}} = K_{\text{п}} \tau_{\text{р}\Sigma}^{-\frac{1}{2}} S_{\text{р-п}}, \quad (7)$$

где  $K_{\text{п}}$  – константа (постоянная повреждения), зависящая от типа полупроводникового прибора и имеющая размерность  $[\text{кВт} \cdot (\text{мкс})^{1/2} \cdot \text{см}^{-2}]$ ;

$\tau_{\text{р}\Sigma}$  – суммарное время воздействия пачки коротких импульсов на поражаемые тракты;

$S_{\text{р-п}}$  – площадь р-п перехода в  $\text{см}^2$ .

Требуемая мощность ЭМИ на входе приемника РРС для его функционального поражения с учетом (7) будет [5]:

– в случае внутриполосного воздействия:

$$P_{\text{фп}}^{(1)} = K_{\text{п}} \tau_{\text{р}\Sigma}^{-\frac{1}{2}} S_{\text{р-п}} K_{\text{сп}} K_{\text{пол}}^{-1}, \quad (8)$$

– в случае внеполосного воздействия:

$$P_{\text{фп}}^{(2)} = K_{\text{п}} \tau_{\text{р}\Sigma}^{-\frac{1}{2}} S_{\text{р-п}} K_{\text{вп}}, \quad (9)$$

где  $K_{\text{сп}}$  – коэффициент потерь за счет рассогласования ширины спектра ЭМИ ( $\Delta f_{\text{р}}$ ) с полосой пропускания ( $\Delta f_{\text{п}}$ ) подавляемой РРС;  $K_{\text{вп}}$  – коэффициент потерь за счет экранирования;  $K_{\text{пол}}$  – коэффициент потерь по поляризации.

Требуемая плотность потока мощности ЭМИ на апертуре антенны поражаемой РРС при внутриполосном поражении может быть вычислена в виде:

$$S_{\text{фп}}^{(1)} \geq \left( \frac{P_{\text{фп}}^{(1)}}{A_{\text{эф}}} \right) K_{\text{ур}}, \quad (10)$$

где  $K_{\text{ур}}$  – коэффициент потерь за счет углового рассогласования (несовпадения) направлений максимумов диаграмм направленности антенн средства функционального поражения и поражаемой радиотехнической системы БПЛА;

$A_{\text{эф}}$  – эффективная площадь антенны РРС на частоте воздействующего сигнала.

Результаты расчета в соответствии с (8) и (9) требуемых значений  $P_{\text{фп}}^{(1)}$  при длительности пачки 11 мкс и  $K_{\text{пол}} = 0,5$  для случая внутриполосного функционального поражения полупроводниковых элементов при двух значениях  $K_{\text{сп}} = 10$  и 15 дБ приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены аналогичные значения  $P_{\text{фп}}^{(2)}$  для случая внеполосного функционального поражения при двух значениях  $K_{\text{вп}} = 30$  и 40 дБ. Там же приведены усредненные значения  $K_{\text{п}}$ , полученные теоретически и экспериментально, а также возможные значения  $S_{\text{р-п}}$  для основных типов полупроводниковых приборов в [3].

Таблица 1

Требуемые значения  $P_{\text{фп}}^{(1)}$ , Вт

Тип ПП прибора	$K_{\text{п}}$	$S_{\text{р-п}}, \text{см}^2$	$\tau_{\text{р}\Sigma}, \text{мкс}$	$P_{\text{фп}}^{(1)}$	
				$K_{\text{сп}}=10\text{дБ}$	$K_{\text{сп}}=15\text{дБ}$
Диоды и транзисторы	0,1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	11	0,6 – 30	1,8 – 90
Диоды СВЧ	0,01	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	11	0,06 – 3	0,18 – 9
ИС и БИС	0,1	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	11	0,06 – 1,2	0,18 – 3,6

Таблица 2

Требуемые значения  $P_{\text{фп}}^{(2)}$ , Вт

Тип ПП прибора	$K_{\text{п}}$	$S_{\text{р-п}}, \text{см}^2$	$\tau_{\text{р}\Sigma}, \text{мкс}$	$P_{\text{фп}}^{(2)}$	
				$K_{\text{вп}}=30\text{дБ}$	$K_{\text{вп}}=40\text{дБ}$
Диоды и транзисторы	0,1	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	11	$600 - 3 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$
Диоды СВЧ	0,01	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	11	$60 - 3 \cdot 10^3$	$600 - 3 \cdot 10^4$
ИС и БИС	0,1	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	11	$60 - 1,2 \cdot 10^3$	$600 - 1,2 \cdot 10^4$

ПП – полупроводниковые; ИС – интегральные схемы; БИС – большие интегральные схемы.

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, показывают, что для осуществления внутриполосного функционального поражения пачкой импульсов с суммарным временем воздействия  $\tau_{\text{р}\Sigma} = 11$  мкс микроволновых диодов и интегральных схем необходима мощность на входе приемников поражаемых РРС  $P_{\text{фп}}^{(1)}$  от 0,06 до 9 Вт, а коммутирующих диодов и маломощных транзисторов соответственно –  $P_{\text{фп}}^{(1)} = 0,6 \div 90$  Вт. Для осуществления внеполосного функционального поражения микроволновых диодов и микросхем необходима мощность  $P_{\text{фп}}^{(2)}$  от 60 Вт до 30 кВт, а коммутирующих диодов и маломощных транзисторов соответственно –  $P_{\text{фп}}^{(2)} = 600 \text{ Вт} \div 30 \text{ кВт}$ .

Сравнительный анализ значений  $P_{\text{фп}}^{(1,2)}$  показывает, что энергетически более выгодным является

режим внутриволнового воздействия. В случае ФП РРС именно этот режим будет иметь место, поскольку предполагается проникновение ЭМИ по боковым лепесткам ДН РРС.

Для оценивания энергетических параметров пачки СШП сигналов, достаточных для ФП РРС, рассмотрим схематично структурную схему радиоканала, включающую в себя передатчик, передающую зеркальную СШП антенну, приемную антенну РРС, входные каскады приемного устройства (рис. 1).

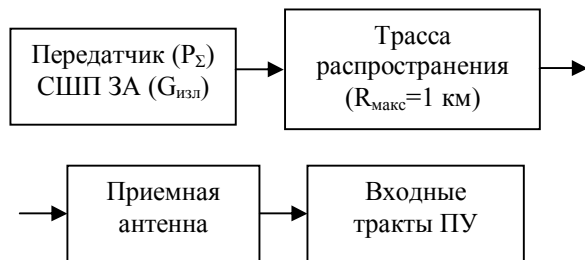


Рис. 1. Структурная схема радиоканала

Анализ энергетических соотношений начнем на основании данных, представленных выше. Было определено, что максимальная мощность  $P_{\text{фп}}^{(1)}$  при внутриволновом подавлении, необходимая для деградации полупроводниковых элементов входных каскадов приемного устройства РРС составляет величину 90 Вт с учетом коэффициента потерь  $K_{\text{сп}}=-15$  дБ, который учитывает рассогласование ширины спектра ЭМИ с полосой пропускания приемного устройства РРС.

Учтем, что поражающая пачка СШП сигналов может воздействовать по боковым лепесткам ДН приемной антенны РРС по уровню  $K_{\text{ур}}=-13$  дБ. Тогда мощность на входе приемной антенны будет:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{фп}}^{(1)} \cdot 20 = 1,8 \text{ кВт.}$$

Для определения напряженности электрического поля  $E_{\text{max}}$  воспользуемся зависимостью [4]:

$$P_{\text{пр}} = S \cdot A_{\text{эфф}},$$

где  $S = E_{\text{max}}^2 / 240\pi$  – плотность потока мощности принимаемого сигнала;

Предположим, что диаметр зеркальной антенны РРС  $d = 1$  м.

Предположим также, что амплитудное распределение в апертуре антенной систем является равномерным. Воспользовавшись зависимостями (3), (4), для нижней частоты спектра  $\lambda_{\text{н}} = 15$  см полу-

чим:  $G = 300$ ,  $A_{\text{эфф}} = G \frac{\lambda^2}{4\pi} = 0,53 \text{ м}^2$ . В этом случае

напряженность электрического поля принимаемой пачки будет  $E_{\text{пр}}=1,6 \text{ кВ/м}$ , для одиночного СШП

сигнала из пачки  $E_{\text{пр}}=1,6 \text{ В/м}$ .

В соответствии с формулой идеальной радиосвязи для направления главного максимума антенной системы [4]:

$$E_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{60P_{\Sigma}G_{\text{изл}}}}{R},$$

где  $P_{\Sigma}$  – мощность передатчика;  $G_{\text{изл}} = 70$  – максимальный КУ антенны средства ФП РРС,

получим, что подводимая к зеркальной СШП антенне мощность для достижения ФП РРС для дальности 1 км составит величину  $P_{\Sigma} \approx 600 \text{ Вт}$  в одном импульсе.

Как показывает анализ литературы, на сегодняшний день реально достижимы мегаваттные уровни генерируемой мощности для мобильных установок при допустимых массогабаритных размерах [6]. Необходимо учитывать, что для уменьшения потерь по поляризации, желательно использовать антенну с круговой поляризацией излучаемого поля. В качестве такой антенны предлагается использовать параболоид вращения или вырезку из него с облучателем в виде конической спиральной антенны, возбуждаемой СШП сигналом наносекундной длительности.

## Выводы

Проведенный расчет пространственных характеристик зеркальной антенны, временных и энергетических параметров пачки СШП сигналов для функционального поражения полупроводниковых элементов входных каскадов приемного устройства РРС наглядно показывает возможность размещения средства ФП на воздушном носителе с диаметром поперечного сечения не более 0,5 м.

## Список литературы

1. Кравченко В.И. Электромагнитное оружие / В.И. Кравченко. – Х.: Изд-во НТУ «ХПИ», 2008. – 185 с.
2. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 464 с.
3. Панов В.В. Некоторые аспекты проблемы создания СВЧ средств функционального поражения / В.В. Панов, А.А. Саркисян // Зарубежная радиоэлектроника. – 1993. – № 10 – С. 22-24.
4. Шифрин Я.С. Антенны: учеб. пособ. / Я.С. Шифрин. – Х.: ВИРТА, 1976. – 407 с.
5. Гомозов В.И., Гомозов А.В. Новый метод фокусировки электромагнитных излучений / В.И. Гомозов, А.В. Гомозов // Антенны. – 2001. – Вып. 3(49). – С. 54-60.
6. [Электрон. ресурс]. – Режим доступа до Internet-ресурсу: [www.iep.uran.ru/razzr/gener/razr\\_8.html](http://www.iep.uran.ru/razzr/gener/razr_8.html).

Поступила в редколлегию 18.07.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.И. Обод, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.

**АНАЛІЗ ВИМОГ ДО ЧАСОВИХ І ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАЧКИ  
НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ ПРИ СТВОРЕННІ ЗАСОБУ  
ФУНКЦІОНАЛЬНОГО УРАЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО БАЗУВАННЯ**

А.В. Ірха, Г.В. Єрмаков, М.М. Ясечко

*Проведено аналіз просторових характеристик дзеркальної антени засобу функціонального ураження при випромінюванні надширокопasmових сигналів в діапазоні 2÷8 ГГц. Розраховані часові та енергетичні параметри пачки надширокопasmових сигналів, що забезпечує деградацію напівпровідникових елементів вхідних каскадів приймального пристрою при тепловому режимі ураження.*

**Ключові слова:** часові та енергетичні параметри, пачка надширокопasmових сигналів, деградація напівпровідникових елементів

**THE ANALYSIS OF REQUIREMENTS TO TEMPORARY AND POWER CHARACTERISTICS  
OF THE ULTRAWIDEBAND SIGNALS PACK OF AT MEANS CREATION  
FUNCTIONAL DEFEAT OF AIR BASING**

A.V. Irkha, G.V. Yermakov, M.N. Iasechko

*The analysis of the mirror antenna spatial characteristics of functional defeat means is carried out at radiation of ultrawideband in a range 2÷8 GHz. Are calculated temporary power parameters of the ultrawideband signals pack providing degradation of receiver entrance cascades semiconductor elements at a thermal mode of defeat.*

**Keywords:** temporary and power parameters, ultrawideband signals pack, degradation of semi-conductor elements