

УДК 621.396.96

МАСКИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА АКТИВНЫХ ШУМОВЫХ ПОМЕХ С РАЗЛИЧНОЙ ПОЛОСОЙ И МОЩНОСТЬЮ НА ИМПУЛЬСНО-ДОПЛЕРОВСКУЮ РЛС СОПРОВОЖДЕНИЯ

Нэй Лин Мьинт, магистрант

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

*Горшков Сергей Анатольевич,
директор ООО «МилитСофт
Солюшенс», кандидат технических
наук, доцент*

Аннотация. Анализируются маскирующие свойства активных шумовых помех (АШП) самоприкрытия, создаваемые атакующим летательным аппаратом, для подавления квазинепрерывных радиолокационных станций (РЛС) моноимпульсного сопровождения (точного измерения координат - ТИК). Рассматриваются АШП прицельного типа, в полосе доплеровских частот и узкополосная ответно-шумовая помеха, генерируемая передатчиком помех в ответ на каждый зондирующий импульс. Условиями являются, применение этих помех для самозащиты беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), ограничения мощности радиопередатчика помех, известные тип и параметры РЛС ТИК, а также её дальность и направление.

Введение

К разновидностям маскирующих помех, которые ставятся воздушными средствами нападения для самозащиты от импульсно-доплеровских (ИД) РЛС сопровождения целей и наведения ракет, относятся в частности АШП (прицельные, заградительные), доплеровские шумы, а также ограниченные по дальности коррелированные ответные шумовые помехи (ОШП) [1, с.с.587, 617; 2, с.52]. Последние получают методом ретрансляции зондирующего сигнала РЛС в станции помех с его растяжением в рециркуляторе и частотной или фазовой модуляцией. В силу ограниченной мощности бортовых источников питания, мощность передатчиков помех, находящихся в подвесных контейнерах также ограничена. Минимизация потребляемой мощности и массогабаритных параметров полезна также с точки зрения максимизации времени работы такого постановщика активных помех (ПАП). Например, если ограничена емкость бортового источника питания и/или грузоподъемность БПЛА, при его индивидуальной защите [3, с.130; 4; 5].

Цель настоящей работы, определить энергетический выигрыш ОШП перед АШП самоприкрытия с различной мощностью и шириной спектра.

Постановка задачи

В качестве сопровождаемой по всем координатам цели-постановщика КИМ-помехи рассматривался БПЛА. Зона режекции мешающих отражений (МО) со спектром отраженного сигнала (ОС) не пересекаются либо МО отсутствуют и их режекция МО не производится.

Параметры РЛС сопровождения: средняя мощность передающего устройства $P_0 = 300$ Вт; длина волны $\lambda = 3$ см; ширина ДНА в азимутальной и угломестной плоскостях $\Delta\theta_\beta = 3^\circ$; $\Delta\theta_\varepsilon = 3^\circ$; температура приемного устройства $T = 290^\circ\text{K}$; коэффициент шума приемного устройства $K_{\text{ш}} = 5$; частота повторения импульсов $F_{\text{п}} = 200$ кГц ($T_{\text{п}} = 5.0$ мкс); длительность простого прямоугольного радиоимпульса $T_0 = 0.1$ мкс; ширина спектра одиночного радиоимпульса $\Delta f_0 = 10$ МГц; разрешающая способность по дальности $\Delta r = 15$ м; число импульсов в пачке $L_{\text{п}} = 1000$; когерентное накопление на интервале $T_{\text{кн}} = L_{\text{п}} T_{\text{п}} = 5.0$ мс.

Параметры цели, оснащенной ПАП: эффективная отражающая поверхность (ЭОП) цели $\sigma_{\text{ц}} = 0.5$ м²; максимальная скорость цели $V_{\text{ц max}} = 150$ м/с, дальность до цели $r_{\text{ц}} = 10$ км.

Отраженный сигнал (ОС): слабый, медленно флуктуирующий; время корреляции флуктуаций $2\tau_c \gg T_{\text{кн}}$; коэффициент корреляции ОС $r_c \rightarrow 1$ (оптимально когерентное накопление на всей длительности пачки ОС); эффективная ширина зубцов АЧХ когерентного накопителя равна

$\Delta F_{II} \approx F_{II} / L_{II} = 200 \text{ Гц}$; разрешающая способность по радиальной скорости $\Delta V_r = 0.5 \Delta F_{II} \lambda = 3 \text{ м/с}$.
Потери мощности при распространении в атмосфере $B_{\text{атм}} = 0.018 \text{ дБ/км}$.

Зубцы спектральной плотности ОС удалены от мешающих отражений, которые подавлены до уровня внутреннего шума.

Параметры активной шумовой помехи: ширина ДНА станции постановки помех в азимутальной плоскости $\Delta \theta_{\text{пб}} = 60^\circ$, в угломестной $\Delta \theta_{\text{пе}} = 90^\circ$. Ширина энергетического спектра (ЭС) АШП составляла $\Delta f_{\text{АШП}} = 100, 10 \text{ и } 0.2 \text{ МГц}$, а $\Delta f_{\text{ОШП}} = 20, 14 \text{ и } 8 \text{ кГц}$. Причем, первый вариант помехи - непрерывная заградительная, второй - прицельная, третий - доплеровский шум (шум в полосе доплеровских частот), оставшиеся три - ответно шумовые, занимающие половину периода повторения РЛС (накрывающие ОС). Рассмотрены пять фиксированных значений мощности передатчика АШП $P_{\text{АШП}} - 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 10^0 \text{ и } 10^1 \text{ Вт}$. Длина волны постановщика помех соответствовала длине волны РЛС $\lambda = 3 \text{ см}$. ЭС ОШП – гребенчатый, с шириной ЭС одиночного шумового импульса ОШП $\Delta f_{0\text{ОШП}} = 1/T_{0\text{ОШП}} = 1/0.5T_{\text{п}} = 400 \text{ кГц}$ и шириной зубца спектра ОШП $\Delta F_{L\text{ОШП}} = T_{\text{кн}}^{-1} + \Delta f_{\text{ОШП}} \approx \Delta f_{\text{ОШП}} = 1/2\tau_{\text{ОШП}}$, где $\tau_{\text{ОШП}}$ - время корреляции флюктуаций ОШП.

Расчет энергетических соотношений помехи на входе приемника и выходе когерентного накопителя РЛС

Спектральная плотность мощности АШП $N_{\text{АШП}}$, создаваемая передатчиком атакующего БПЛА, для малогабаритной РЛС с дальности 10км зависит от $P_{\text{АШП}}$ и $\Delta f_{\text{АШП}}$ и определяется выражением $N_{\text{АШП}} = P_{\text{АШП}} / \Delta f_{\text{АШП}}$. Расчетные значения $N_{\text{АШП}}$ для рассматриваемых $P_{\text{АШП}}$ и $\Delta f_{\text{АШП}}$ представлены в таблице 1.

Учтем потери мощности помехи из-за различия поляризационных характеристик антенн ПАП и подавляемой РЛС коэффициентом $\gamma_{\text{пол}} = 0.5$. Также учтем потери в передающей САП антенне снижением коэффициента усиления в направлении на РЛС (при заданных выше параметрах ДНА ПАП) $G_{\text{АШП}} = 32000 / (\Delta \theta_{\beta\text{АШП}} \Delta \theta_{\epsilon\text{АШП}}) = 5.9$.

Таблица 1 – СПМ РПУ ПАП различных видов помех [Вт/Гц]

Мощность РПУ САП, [Вт]		10 ¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³
Вид помехи и полоса,	8кГц	1.25·10 ⁻³	0.125·10 ⁻³	0.0125·10 ⁻³	1.25·10 ⁻⁶	0.125·10 ⁻⁶
	14кГц	0.714·10 ⁻³	0.0714·10 ⁻³	0.00714·10 ⁻³	0.714·10 ⁻⁶	0.0714·10 ⁻⁶
	20кГц	0.5·10 ⁻³	0.05·10 ⁻³	0.005·10 ⁻³	0.5·10 ⁻⁶	0.05·10 ⁻⁶
	0.2МГц	50·10 ⁻⁶	5·10 ⁻⁶	0.5·10 ⁻⁶	0.05·10 ⁻⁶	0.005·10 ⁻³
Шумы в полосе доплеровских частот РЛС						
Прицельная АШП в полосе одиночного ЗС	10МГц	1·10 ⁻⁶	0.1·10 ⁻⁶	0.01·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁹	0.1·10 ⁻⁹
Заградительная АШП	100МГц	0.1·10 ⁻⁶	0.01·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁹	0.1·10 ⁻⁹	0.01·10 ⁻⁹

Тогда мощность АШП на входе приемника РЛС равна

$$\sigma_{\text{АШП}}^2 = P_{\text{АШП}} G_{\text{АШП}} G_{\text{РЛС}} \lambda^2 \gamma_{\text{пол}} 10^{-0.1 B_{\text{рл}} 10^{-3}} / (4\pi r_{\text{ц}})^2. \quad (1)$$

Таблица 2. – Мощность помехи на входе приемника РЛС $\sigma_{\text{АШП}}^2$ [Вт] и СПМ одного зубца $N_{\text{АШП}}$ [Вт/Гц] на выходе КН в зависимости от мощности РПУ ПАП и ширины ее спектра

Мощность РПУ САП, [Вт]						
Мощность помехи на входе приемника, [Вт]		10^1	10^0	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
$\sigma_{\text{АШП}}^2$		$5.852 \cdot 10^{-9}$	$5.852 \cdot 10^{-10}$	$5.852 \cdot 10^{-11}$	$5.852 \cdot 10^{-12}$	$5.852 \cdot 10^{-13}$
$N_{\text{АШП}}$	8кГц	$7.315 \cdot 10^{-13}$	$7.315 \cdot 10^{-14}$	$7.315 \cdot 10^{-15}$	$7.315 \cdot 10^{-16}$	$7.315 \cdot 10^{-17}$
	14кГц	$4.18 \cdot 10^{-13}$	$4.18 \cdot 10^{-14}$	$4.18 \cdot 10^{-15}$	$4.18 \cdot 10^{-16}$	$4.18 \cdot 10^{-17}$
	20кГц	$2.926 \cdot 10^{-13}$	$2.926 \cdot 10^{-14}$	$2.926 \cdot 10^{-15}$	$2.926 \cdot 10^{-16}$	$2.926 \cdot 10^{-17}$
	0.2МГц	$2.926 \cdot 10^{-14}$	$2.926 \cdot 10^{-15}$	$2.926 \cdot 10^{-16}$	$2.926 \cdot 10^{-17}$	$2.926 \cdot 10^{-18}$
	10МГц	$5.852 \cdot 10^{-16}$	$5.852 \cdot 10^{-17}$	$5.852 \cdot 10^{-18}$	$5.852 \cdot 10^{-19}$	$5.852 \cdot 10^{-20}$
	100МГц	$5.852 \cdot 10^{-17}$	$5.852 \cdot 10^{-18}$	$5.852 \cdot 10^{-19}$	$5.852 \cdot 10^{-20}$	$5.852 \cdot 10^{-21}$

Из таблицы 2 следует, что меньшая полоса помехи обеспечивает большую СПМ, чем широкополосные непрерывные АШП. При этом отношение сигнал-помеха (ОСП) $\rho_{\text{с-АШП}}$ на выходе устройства обработки принятого сигнала рассчитывается согласно выражению

$$\rho_{\text{с-АШП}} = \frac{\sigma_c^2 T_0 v_{\Pi}}{N_0 + N_{\text{АШП}}} = \frac{\sigma_c^2 T_0 v_{\Pi}}{N_0 + \sigma_{\text{АШП}}^2 / \Delta f_{\text{АШП}}} \quad (2)$$

Данное выражение характерно для непрерывных по времени АШП с шириной спектра не менее полосы РПУ РЛС, представляющих собой квазيبелый шум. Для протяженных по дальности коррелированных ОШП данное выражение имеет особенности, связанные с коррелированностью и ограниченностью по времени. Импульсный характер ($T_{0\text{ОШП}} < T_{\Pi}$) ОШП увеличивает ее СПМ (по сравнению с ОС) на выходе устройства внутрипериодной обработки (ВПО). Кроме того, вследствие коррелированности ОШП, ширина ее спектра оказывается меньше полосы фильтра грубой селекции (ФГС), но в то же время шире полосы УПФ (см. рисунок 1), что приводит к ее (ОШП) когерентному накоплению подобно ОС, но с уменьшенным коэффициентом накопления $v_{\Pi\text{ОШП}}$.

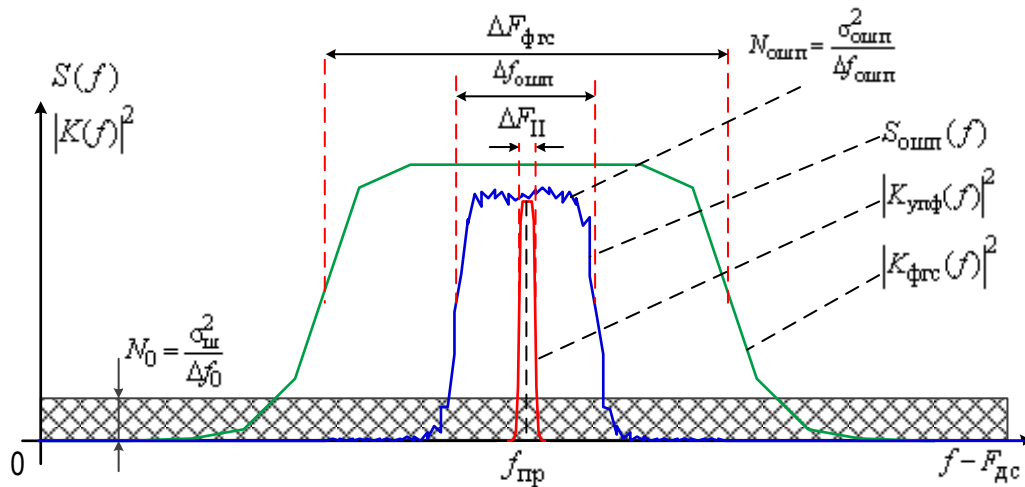


Рисунок 1 - Энергетический спектр ОШП и амплитудно-частотные характеристики ФГС и УПФ.

Можно показать, по аналогии с КН ОС [6, с.231-232], что при $\Delta F_{\Pi} \leq \Delta F_{L_{\text{ОШП}}}$ он определяется коэффициентами междупериодной корреляции флуктуаций ОШП $r_{L_{\text{ОШП}}}$ и огибающей ограниченной последовательности нефлуктуирующих сигналов r_L , зависящей от числа импульсов в пачке L :

$$v_{\Pi_{\text{ОШП}}} = \frac{F_{\Pi}}{\Delta F_{L_{\text{ОШП}}}} = \frac{1 + r_{L_{\text{ОШП}}} r_L}{1 - r_{L_{\text{ОШП}}} r_L} \approx \frac{1 + \exp(-T_{\Pi} / \tau_{\text{ОШП}}) \exp(-2/L)}{1 - \exp(-T_{\Pi} / \tau_{\text{ОШП}}) \exp(-2/L)}. \quad (3)$$

При увеличении $\Delta F_{L_{\text{ОШП}}}$ до ширины спектра слабо коррелированной АШП $v_{\Pi_{\text{АШП}}} \Rightarrow 1$.

С учетом когерентного накопления и временного стробирования ОШП в приемнике РЛС, ее мощность на выходе КН представим в следующем виде, по аналогии с (1):

$$\sigma_{\text{ОШП}}^2 = P_{\text{ОШП}} G_{\text{ОШП}} G_{\text{РЛС}} \cdot (T_{0_{\text{ОШП}}} / T_0) \cdot v_{\Pi_{\text{ОШП}}} \lambda^2 \gamma_{\text{пол}} 10^{-0.1 B r_{\Pi} 10^{-3}} / (4\pi r_{\Pi})^2. \quad (4)$$

СПМ ОШП характеризуется огибающей, отражающей ее внутрипериодную структуру $N_{0_{\text{ОШП}}} = \sigma_{\text{ОШП}}^2 / \Delta f_{0_{\text{ОШП}}} = \sigma_{\text{ОШП}}^2 T_{0_{\text{ОШП}}}$ и последовательностью зубцов ее междупериодной структуры. При прямоугольной аппроксимации зубцов СПМ ОШП их высота определяется как $N_{\text{ОШП}} = \sigma_{\text{ОШП}}^2 / \Delta f_{\text{ОШП}}$.

Учитывая, что ширина зубца СПМ ОШП равна $\Delta F_{L_{\text{ОШП}}} = \Delta f_{\text{ОШП}} + 1/T_{\Pi} \approx \Delta f_{\text{ОШП}} \ll F_{\Pi}$, из выражения (3) получим, что эффективность КН ОШП равна $v_{\Pi_{\text{ОШП}}} \approx F_{\Pi} / \Delta f_{\text{ОШП}}$. С учетом этого, СПМ зубца ОШП на выходе КН рассчитывается согласно выражению

$$N_{0_{\text{ОШП}}} v_{\Pi_{\text{ОШП}}} = \frac{\sigma_{\text{ОШП}}^2}{\Delta f_{0_{\text{ОШП}}}} \cdot \frac{F_{\Pi}}{\Delta f_{\text{ОШП}}} = \frac{N_{\text{ОШП}}}{q_{\text{ОШП}}}, \quad (5)$$

где $q_{\text{ОШП}} = \Delta f_{0_{\text{ОШП}}} / F_{\Pi} = T_{\Pi} / T_{0_{\text{ОШП}}}$.

С учетом **Ошибка! Источник ссылки не найден.** отношение сигнал-(ОШП + шум) - ОСПШ, подобно выражению (1) для отношения сигнал-(АШП + шум), выглядит следующим образом

$$\rho_{\text{с-ОШП}} = \frac{\sigma_{\text{с}}^2 T_0 v_{\Pi}}{N_0 + N_{0_{\text{ОШП}}} v_{\Pi_{\text{ОШП}}}} = \frac{\sigma_{\text{с}}^2 T_0 v_{\Pi}}{N_0 + \sigma_{\text{ОШП}}^2 / (\Delta f_{\text{ОШП}} q_{\text{ОШП}})} = \frac{\sigma_{\text{с}}^2 T_0 v_{\Pi}}{N_0 + N_{\text{ОШП}} / q_{\text{ОШП}}}. \quad (6)$$

Следует заметить, что формула **Ошибка! Источник ссылки не найден.** - частный случай выражения **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, так как в случае использования непрерывных АШП $q_{\text{ашп}} = 1$. Поэтому в дальнейшем будем использовать общее обозначение ОШП.

Расчет требуемой мощности передатчика САП для обеспечения требуемого маскирующего эффекта

Мощность активной помехи должна выбираться такой, чтобы на входе приемного устройства обеспечивать требуемый маскирующий эффект. Это достигается снижением ОСП до $\rho_{\text{тРОШП}}(D_M, F_M)$, обеспечивающего малую вероятность обнаружения сигнала D_M на фоне помехи. С точки зрения терминологии радиоэлектронной борьбы (РЭБ) удобнее вместо условной вероятности правильного обнаружения D_M использовать условную вероятность пропуска цели $\tilde{D}_M = 1 - D_M$.

Для медленно флуктуирующего сигнала требуемое ОСПШ $\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M)$ рассчитывается в соответствии с требуемым значением условной вероятности пропуска цели $\tilde{D}_{\text{тРМ}}$ при фиксированной вероятности ложной тревоги F_M

$$\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M) = \frac{\ln F_M}{\ln(1 - \tilde{D}_{\text{тРМ}})} - 1. \quad (7)$$

Для требуемого ОСПШ $\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M)$, обеспечивающего заданный маскирующий эффект, из **Ошибка! Источник ссылки не найден.** определим требуемую мощность помехи на входе приемника РЛС $\sigma_{\text{тРОШП}}^2$:

$$\sigma_{\text{тРОШП}}^2 = \Delta f_{\text{ошп}} N_0 q_{\text{ошп}} \left(\frac{\rho_{\text{тРС}}(D, F)}{\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M)} - 1 \right). \quad (8)$$

Если в выражении (8) задать такое $\rho_{\text{тРС}}(D, F)$, которое с вероятностями $D = 0.968$ и $F = 10^{-6}$ обеспечивает обнаружение цели с ЭОП $\sigma_{\text{ц}} = 0.5 \text{ м}^2$ находящейся на дальности $r_{\text{ц}} = 10 \text{ км}$ и заданными выше параметрами РЛС, а также положить, что $\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M) \approx 1$ при $\tilde{D}_M \approx 0.968$ ($D_M = 1 - \tilde{D}_M = 0.032$) и $F_M \approx 0.001$, то можно проанализировать зависимость требуемой мощности ОШП $\sigma_{\text{тРОШП}}^2$ от ширины полосы помехи $\Delta f_{\text{ошп}}$ (см. таблицу 3).

Таблица 3 – Требуемая мощность помехи $\sigma_{\text{тРОШП}}^2$ на входе приемника РЛС для обеспечения $\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}, F) = 1$ при дальности до цели $r_{\text{ц}} = 10 \text{ км}$

Полоса помехи,	Мощность помехи на входе РПРУ, [Вт]
8кГц	$2.035 \cdot 10^{-14}$
14кГц	$3.561 \cdot 10^{-14}$
20кГц	$5.086 \cdot 10^{-14}$
0.2МГц	$5.088 \cdot 10^{-13}$
10МГц	$2.544 \cdot 10^{-11}$
100МГц	$2.544 \cdot 10^{-10}$

Используя **Ошибка! Источник ссылки не найден.** и таблицу 3 вычислим минимальную требуемую мощность передатчика САП $P_{\text{тРОШП}}$, которая при формировании помехи заданного вида обеспечит требуемый маскирующий эффект на выходе устройства обработки принятого сигнала

$$P_{\text{тРОШП}} = (4\pi r_{\text{ц}})^2 \sigma_{\text{тРОШП}}^2 (\tilde{D}_M, F_M) 10^{0.1Br_{\text{ц}} 10^{-3}} / G_{\text{АШП}} G_{\text{РЛС}} \lambda^2 \gamma_{\text{пол}}. \quad (9)$$

Применение помех с шириной спектра меньше ширины полосы приемного устройства обеспечивает их накопление с эффективностью, зависящей от $\Delta f_{\text{ОШП}}$. Из этого следует, что при использовании протяженных по дальности коррелированных ОШП для самоприкрытия цели-ПАП на дальности $r_{\text{ц}} = 10 \text{ км}$ с заданными вероятностями на выходе устройства обработки РЛС с указанными выше параметрами, требуется мощность САП $P_{\text{тРОШП}}$ при различных $\Delta f_{\text{ошп}}$ ($\Delta f_{\text{ашп}}$) приведенная в таблице 4.

По мере приближения цели-ПАП к РЛС отношение сигнал-шум $\rho_{\text{с}}$ поднимается выше $\rho_{\text{тРС}}(D, F)$, обеспечивая большую D при фиксированной F . Вследствие этого растет требуемая мощность передатчика помех $P_{\text{тРОШП}}(r_{\text{ц}}, \Delta f_{\text{ошп}})$, обеспечивающая минимальное самоприкрытие цели $\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M) = 1$ (при $\tilde{D}_M = 0.968$, $F_M = 10^{-3}$). Зависимости требуемой мощности передатчика помех $P_{\text{тРОШП}}(r_{\text{ц}}, \Delta f_{\text{ошп}})$ от дальности до цели-ПАП при различной ширине спектра представлены на рисунке 2.

Таблица 4 – Требуемая мощность передатчика помех $P_{\text{тРОШП}}$ самоприкрытия в зависимости о ширины спектра помехи $\Delta f_{\text{ОШП}}$

Полоса помехи $\Delta f_{\text{ОШП}}$, [кГц]	Требуемая мощность передатчика помех $P_{\text{тРОШП}}$, [мВт]
8кГц	$3.477 \cdot 10^{-2}$
14кГц	$6.085 \cdot 10^{-2}$
20кГц	$8.691 \cdot 10^{-2}$
0.2МГц	$8.694 \cdot 10^{-1}$
10МГц	43.5
100МГц	434.7

Эти зависимости получены из (9), с учетом $\sigma_{\text{тРОШП}}^2(\tilde{D}_M, F_M)$ (см. выражение 8). Но в (8) $\rho_{\text{трс}}(D, F)$ заменено на ρ_c зависящее только от дальности до цели-ПАП из [6, с.284-285] в виде $\rho_c(r_c) = K_r / r_c^4$, где $K_r = \text{const}$ получена из исходных данных в постановке задачи.

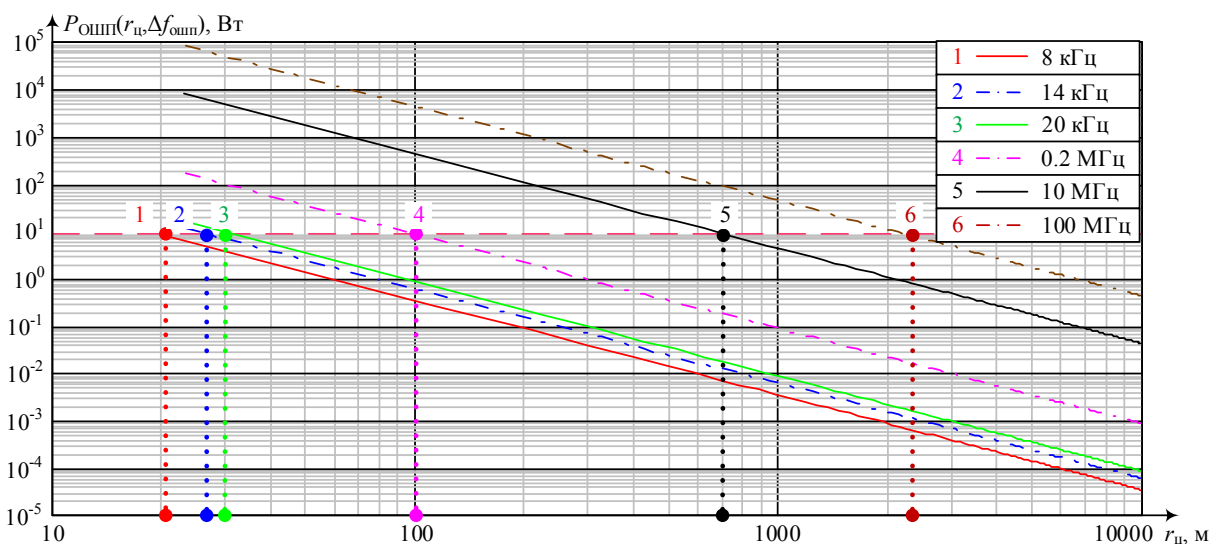
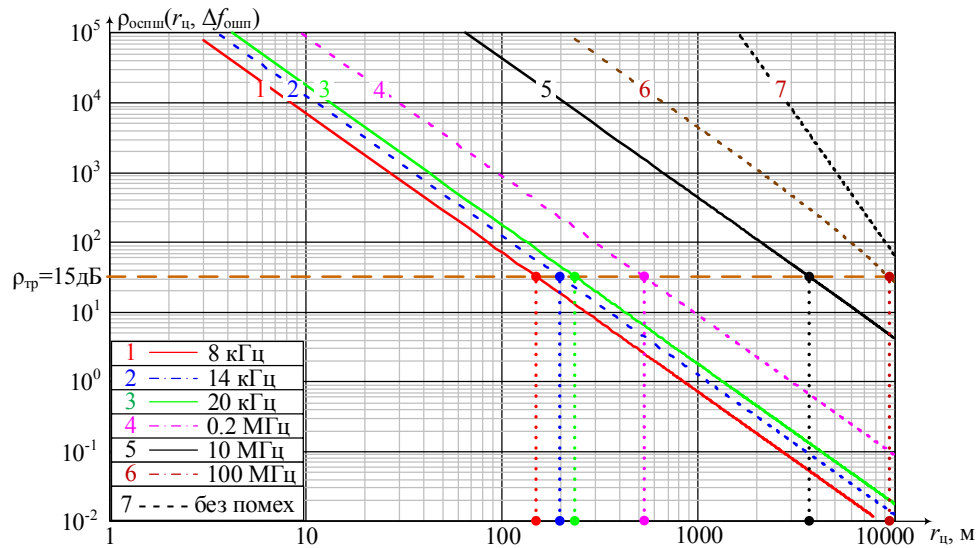


Рисунок 2 – Зависимость $P_{\text{тРОШП}}(r)$, обеспечивающей $\rho_{\text{тРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M) = 1$ (при $\tilde{D}_M = 0.968$, $F_M = 10^{-3}$)

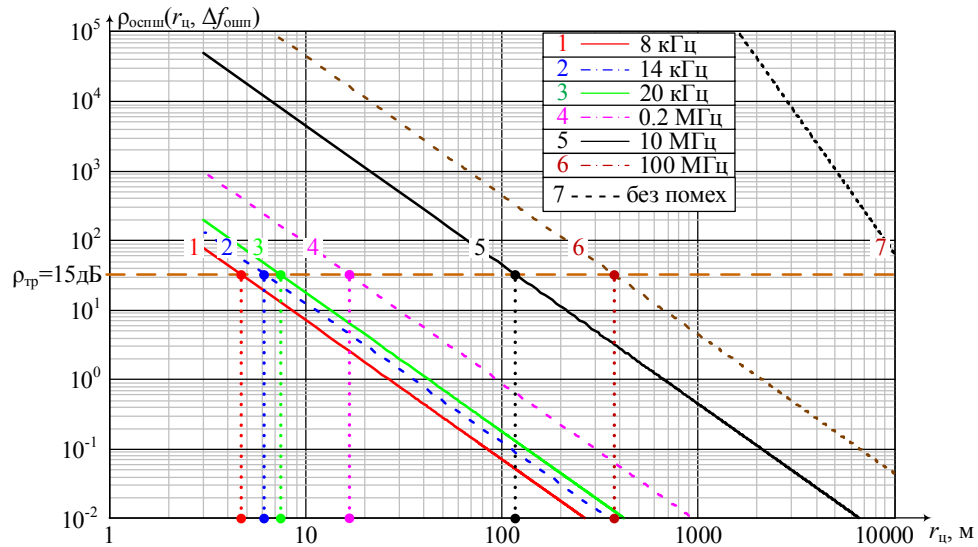
Из рисунка 2 следует, что постановка заградительной АШП с полосой 100МГц передатчиком с максимальной мощностью 10Вт будет обеспечивать маскирование ОС от дальности обнаружения без помех до примерно 2 км. В то же время ОШП с полосой 8 кГц – примерно до 20 м. Для установки требуемой мощности излучения передатчика КИМ-помехи в зависимости от дальности до подавляемой РЛС необходимо использовать attenuator на его выходе.

Анализ зависимости отношения сигнал-помеха на выходе когерентного накопителя от дальности до цели

В завершение исследования проанализируем изменения от дальности непосредственно отношения ОСПШ на выходе КН $\rho_{\text{с-ОШП}}$ (выражение **Ошибка! Источник ссылки не найден.**), зависящего от мощностей ОС [6, с.284] и ОШП на входе приемника РЛС (выражение (4)). Такие зависимости $\rho_{\text{оспш}}(r_c, \Delta f_{\text{ОШП}})$ для мощности РПУ САП: а) 5мВт и б) 5Вт представлены на рисунке 3. Для сопоставления, на рисунках под цифрой 7 приведены графики ОСШ в отсутствии ОШП (АШП).



а)



б)

Рисунок 3- а) – мощность РПУ САП 5 мВт; б) – мощность РПУ САП 5 Вт
– Зависимость отношения сигнал-(помеха + шум) от дальности до цели при различных полосах спектра помехи

Из рисунка видно, что даже при мощности РПУ САП 5 мВт (рисунок 3,а) и полосе 8 кГц, эффективность помехи (при ОСПШ ниже 15дБ) сохраняется до дальности чуть более 100м. А при мощности РПУ САП 5 Вт (рисунок 3,б) – до дальности 4-5м. В то же время АШП с полосой 100МГц при мощности РПУ САП 5 мВт эффективна лишь до дальностей 9-10км, а при 5 Вт – около 400м. Из рисунка 3 следует также, что в отсутствии помех требуемое для захвата на сопровождение цели ОСШ не менее 15 дБ обеспечивается на дальности более 10км.

Заключение

Получено выражение и рассчитана СПМ АШП самоприкрытия для беспилотного ПАП с ЭПР 0.5м² действующего против малогабаритной РЛС с дальностью обнаружения данного объекта равного ~10км. Показано, что для того чтобы провести те же самые расчеты для ОШП, достаточно учитывать скажность помехи.

Обосновано использование условной вероятности пропуска (маскирования) цели $\tilde{D}_M = 1 - D_M$ вместо условной вероятности ее обнаружения D_M при выборе эффективной мощности АШП.

Получено выражение для требуемого ОСПШ $\rho_{\text{тросп}}(\tilde{D}_M, F_M)$, обеспечивающее маскирование с заданной вероятностью $\tilde{D}_M$.

Получено выражение для расчета требуемой мощности ОШП или АШП $\sigma_{\text{ТРОШП}}^2$ при заданных требуемых ОСШ $\rho_{\text{ТРС}}(D, F_M)$ и $\rho_{\text{ТРОШП}}(\tilde{D}_M, F_M)$, при фиксированной полосе помехи. Это в свою очередь позволило определить минимальную требуемую мощность передатчика САП $P_{\text{ТРОШП}}$, которая при формировании помехи заданного вида обеспечит требуемый маскирующий эффект на выходе КН принятого сигнала.

Рассчитана требуемая мощность передатчика помех цели-ПАП с различной шириной спектра $P_{\text{ТРОШП}}(r_{\text{ц}}, \Delta f_{\text{ОШП}})$ от дальности. Явный выигрыш по мощности наблюдается у более узкополосных ОШП. При мощности бортового РПУ 10Вт, ОШП с полосой 8кГц эффективна до дальности 20м, в то время как АШП с полосой 100МГц – до 2км.

Подобный эффект наблюдался и при анализе зависимости отношения сигнал-ОШП на выходе когерентного накопителя от дальности при фиксированной мощности передатчика помех. При мощности РПУ ПАП 5мВт ОШП с полосой 8кГц эффективна до несколько более 100м, в то время как АШП с полосой 100МГц – до 10км. А при мощности РПУ ПАП 5Вт ОШП с полосой 8кГц эффективна практически до 4м, в то время как АШП с полосой 100МГц – до 400м. Т.е. наблюдается практически выигрыш наиболее узкополосной ОШП в сравнении с наиболее широкополосной АШИ практически в 100 раз.

В то же время дальнейшее сужение полосы ОШП нецелесообразно, так как, с одной стороны, при ускорении действующей на ее фоне уводящей помехи (УП), например, свыше 20м/с², и времени ее действия более 3с она выходит за пределы зоны маскирования ± 4 кГц по скорости (частоте Доплера). А, с другой стороны, при снижении ускорения УП до 10м/с² и менее наблюдается слишком малый увод по дальности относительно разрешающей способности по данной координате: 45м и менее, при потенциальном разрешении 30м, на практике тоже приближающемся к 45м.

Список использованных источников:

1. Ван Брант, Л. Б. Справочник по методам радиоэлектронного подавления и помехозащиты систем с радиолокационным управлением / Пер. с англ. под общ. ред. К.И. Фомичева, Л.М. Юдина: в 2 т. М.: Перевод 432, 1985. Т. 1 – 1081 с.
2. Радиоэлектронная борьба. Цифровое запоминание и воспроизведение радиосигналов и электромагнитных волн / В. Д. Добыкин, А.И. Куприянов, В.Г. Пономарев, Л.Н. Шустов; Под общ. ред. А. И. Куприянова. – М.: Вузовская книга, 2009. – 360 с.
3. Афонин, И. Е. Быстрый глобальный удар: ретроспективный анализ концепции, вероятный сценарий нанесения, состав сил и средств, последствия и приоритетные мероприятия по противодействию. Монография / И.Е.Афонин, С.И.Макаренко, Р.Л.Михайлов. – СПб.: Научные технологии, 2022. – 174 с.
4. Рябов, К. Система РЭБ Leonardo BriteStorm для ведомых БПЛА / К. Рябов. – Ижевск: ООО «ВО-медиа», 2024. URL: <https://topwar.ru/251969-sistema-rjeb-leonardo-britestorm.html> (дата обращения 10.04.2025).
5. Рябов, К. LOAD - новая концепция беспилотного летательного аппарата для борьбы с дронами / К. Рябов. – Ижевск: ООО «ВО-медиа», 2024. URL: <https://topwar.ru/262011-load-novaja-koncepciju-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-dlja-borby-s-dronami.html> (дата обращения 18.03.2025).
6. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба: учебник / А. Е. Охрименко. – М.: Воениздат, 1983. – Ч. 1: Основы радиолокации. – 456 с.

UDC 621.396.96

MASKING PROPERTIES OF ACTIVE NOISE INTERFERENCE WITH DIFFERENT BANDWIDTH AND POWER ON PULSE-DOPPLER TRACKING RADAR

Nay Lin Myint, Master's student

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Горшков Сергей Анатольевич,
директор ООО «МилитСофт
Солюшенс», кандидат технических
наук, доцент

Annotation. The article analyzes the masking properties of active noise interference (ANI) of self-covering created by an attacking aircraft to suppress quasi-continuous radar stations (RLS) of mono-pulse tracking (precise measurement of coordinates - PMC). The article considers ANI of the aiming type, in the Doppler frequency band and narrow-band response-noise interference generated by the jammer in response to each probing pulse. The conditions are the use of this interference for self-defense of unmanned aerial vehicles (UAVs), limitations of the power of the radio jammer transmitter, known type and parameters of the PMC radar, as well as its range and direction..