

УДК 621.396.97

Н.И. Рожков, Г.Н. Зубрицкий, Д.М. Запара

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ АКТИВНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ВЗРЫВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЗЕНИТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ РАКЕТ ПО ОТНОШЕНИЮ К ПАССИВНЫМ ПОМЕХАМ

*Рассматривается возможность повышения помехоустойчивости взрывательных устройств зенитных управляемых ракет при стрельбе по воздушным целям в условиях отражений от облака дипольных отражателей.*

**Ключевые слова:** взрывательное устройство, зенитная управляемая ракета, пассивные помехи.

### Введение

**Постановка проблемы.** При стрельбе по воздушным целям в условиях применения пассивных помех (ПП) снижается эффективность боевого снаряжения зенитных управляемых ракет (ЗУР) из-за преждевременного срабатывания активного импульсного взрывательного устройства, что приводит к снижению вероятности поражения цели одной ракетой ( $P_1$ ) и, как следствие, эффективности стрельбы в целом.

В работе [1] определены направления повышения помехоустойчивости импульсных взрывательных устройств (ВУ). Однако их практическая реализация сопряжена с определенными трудностями. Так, например, повышение помехоустойчивости импульсных ВУ путем дальнейшего уменьшения коэффициента усиления  $K_{ус}$  приемного устройства ограничивается его динамическим диапазоном. Повышение порога срабатывания исполнительного устройства ВУ может привести к уменьшению дальности срабатывания по цели, либо к несрабатыванию ВУ вообще. Поэтому, повышение порога срабатывания исполнительного устройства должно сопровождаться одновременно повышением энергии зондирующего сигнала.

**Целью работы** является исследование возможности повышения помехоустойчивости активных импульсных взрывательных устройств ЗУР по отношению к ПП путём применения в качестве зондирующего сигнала передатчика ВУ непрерывной последовательности радиоимпульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ радиоимпульсов).

### Основная часть

Для активного импульсного ВУ с ограниченной мощностью передающего устройства одним из способов повышения энергии сигнала является увеличение длительности импульса.

Однако при реализуемой на практике развязке между приемным и передающим трактами ВУ, воспользоваться этим способом для простых импульсных сигналов нельзя, так как их длительность должна находиться в пределах  $\tau_{и} \leq 0.05 \dots 0.15$  мкс [2].

Рассмотрим возможности повышения помехоустойчивости ВУ за счет изменения ширины спектра зондирующего сигнала.

Известно [3], что одной из основных практических схем обработки сигналов в условиях воздействия многих видов помех и пространственно-временного распределения целей является схема, использующая согласованную фильтрацию с последующей логической обработкой сигнала. Такая схема обработки сигнала в общем случае будет квазиоптимальной, однако она более универсальна и реализуема, чем схема оптимальной обработки.

В силу линейности обработки входного колебания и предположения о нормальном законе его распределения, распределение выходного сигнала схемы согласованной фильтрации также будет нормальным. Поэтому параметром, характеризующим выделение сигнала из помех и его разрешение на фоне других сигналов, для такой схемы может служить величина отношения сигнал/помеха  $q$ .

Рассмотрим случай, когда наряду с полезным сигналом на выходе канала обработки присутствует пассивная помеха (ПП) или сигналы, обусловленные отражениями от других целей. В [3 – 5] получено выражение, характеризующее выигрыш в отношении сигнал/пассивная помеха на выходе согласованных фильтров, при условии, что интенсивность помех значительно превосходит уровень тепловых шумов приемника:

$$K = \tau_{и} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{пп}(\tau) \Psi(\tau_3 - \tau) (f_d - f) dt df}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Theta_{пп}(\tau) Q(f) \Psi(\tau_3 - \tau) (f_d - f) dt df}, \quad (1)$$

где  $K$  - коэффициент подавления помехи;

$\tau_{и}$  - длительность зондирующего импульса;

$\mathcal{E}_{пп}(\tau)$  - средняя энергия сигнала ПП, поступившего на вход приемника ВУ от полосы шириной  $d\tau$  простирающейся на плоскости  $(\tau, f)$  от  $\tau$  до  $\tau + d\tau$ ;

$Q(f)$  - энергетический спектр сигнала ПП;

$\psi(\tau, f)$  - функция неопределенности зондирующего импульса;

$\tau_з, f_д$  - задержка и доплеровская частота полезного сигнала соответственно.

В качестве примера рассмотрим случай, когда распределение помехи по  $\tau$  постоянно  $\mathcal{E}_{пп}(\tau) = \mathcal{E}_{пп}$ , а по частоте  $f$  гауссово, так что

$$Q(f) = \frac{1}{\Delta f_{пп}} \exp\left\{-\pi f^2 \frac{1}{\Delta f_{пп}^2}\right\} \quad (2)$$

и корреляционная функция сигнала имеет форму

$$\psi(\tau, 0) = \exp\left\{-\pi \Delta f_c^2 \tau^2\right\}, \quad (3)$$

где  $\Delta f_c$  - эффективная ширина спектра полезного сигнала;

$\Delta f_{пп}$  - эффективная ширина спектра сигнала пассивных помех.

Для рассмотренного примера выигрыш составит:

$$K = \tau_{и} \sqrt{\Delta f_c^2 + \Delta f_{пп}^2} \exp\left\{\pi \frac{f_д^2}{\Delta f_c^2 + \Delta f_{пп}^2}\right\}. \quad (4)$$

Учитывая что

$$K = \frac{P_{с.в.ых}}{P_{п.в.ых}} \frac{P_{п.в.х}}{P_{с.в.х}} = \frac{P_{с.в.ых}}{P_{п.в.ых}} \frac{\tau_{и} \mathcal{E}_{пп}}{\mathcal{E}_с} \quad (5)$$

получим:

$$\frac{P_{с.в.ых}}{P_{п.в.ых}} \frac{\tau_{и} \mathcal{E}_{пп}}{\mathcal{E}_с} = \tau_{и} \sqrt{\Delta f_c^2 + \Delta f_{пп}^2} \exp\left\{\pi \frac{f_д^2}{\Delta f_c^2 + \Delta f_{пп}^2}\right\}. \quad (6)$$

Разделив обе части выражения (6) на  $\Delta f_{пп}$ , находим зависимость  $\frac{P_{с.в.ых}}{P_{п.в.ых}}$  от отношения  $\frac{\Delta f_c}{\Delta f_{пп}}$  при

$\frac{\mathcal{E}_{пп}}{\mathcal{E}_с} = 1$ , которая в логарифмическом масштабе

примет вид:

$$10 \lg \frac{P_{с.в.ых}}{P_{п.в.ых}} = 10 \lg \left[ \sqrt{1 + \frac{\Delta f_c^2}{\Delta f_{пп}^2}} \exp\left\{\pi \frac{\frac{f_д^2}{\Delta f_{пп}^2}}{1 + \frac{\Delta f_c^2}{\Delta f_{пп}^2}}\right\} \right]. \quad (7)$$

Графики зависимости  $\frac{P_{с.в.ых}}{P_{п.в.ых}}$  (дБ) для различных значений отношения  $\frac{f_д}{\Delta f_{пп}}$  представлены на рис. 1.

На рис. 1:

кривая 1 – при  $\frac{f_д}{\Delta f_{пп}} = 4$ ,

кривая 2 – при  $\frac{f_д}{\Delta f_{пп}} = 2$ ,

кривая 3 – при  $\frac{f_д}{\Delta f_{пп}} = 0$ .

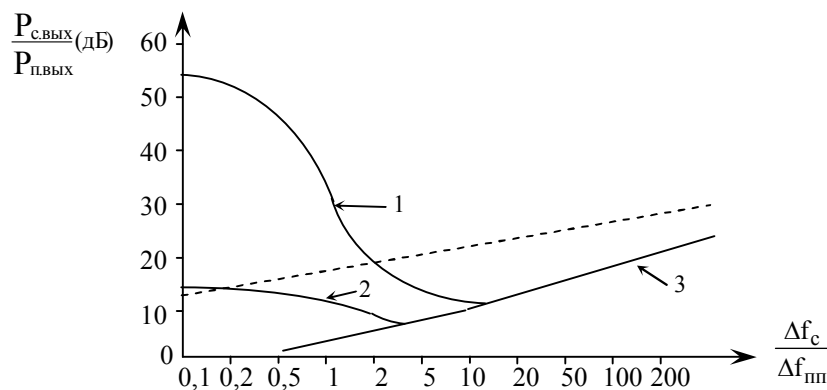


Рис. 1. Графики зависимости  $P_{с.в.ых} (P_{п.в.ых})^{-1}$  от соотношения  $\Delta f_c (\Delta f_{пп})^{-1}$

Из графиков видно, что выигрыш в отношении сигнал/пассивная помеха можно получить путем расширения спектра сигнала, а при больших значениях  $\frac{f_д}{\Delta f_{пп}}$  кроме того и путем его сужения относи-

тельно спектра простого радиоимпульса. Это иллюстрируется рис.2, где изображены сечения по уровню 0.5 функции неопределенности  $\psi(\tau, f)$  короткого радиоимпульса и функции частотно – временного распределения помехи  $\psi(\tau, \tau_з, f, f_з)$ , при этом  $\tau_з$  и

$f_3$  - рассогласование по времени и частоте функции неопределенности сигнала и функции частотно – временного распределения помехи соответственно.

Величина  $\frac{P_c}{P_{пп}}$  на выходе схемы фильтрации, настроенной на полезный сигнал, определяется площадью перекрытия указанных сечений. При доплеровской частоте, отраженного от цели сигнала  $f_d$ , равной доплеровской частоте сигнала пассивной помехи  $f_{д,пп}$ , площадь перекрытия сечений уменьшается с увеличением  $\Delta f_c$  за счет улучшения разрешения по дальности, а с уменьшением  $\Delta f_c$  ( для  $f_d \gg f_{д,пп}$ ) за счет того, что функция неопределенности сигнала может вытянуться вдоль оси  $\tau$  не пересекаясь с сечением функции частотно – временного распределения помехи.

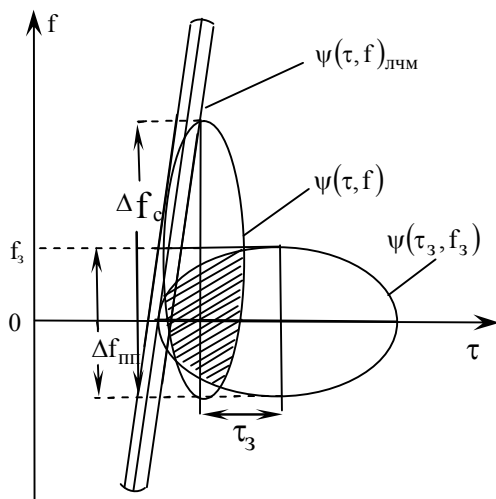


Рис. 2. Взаимное расположение сечений функции неопределенности сигнала и частотно-временного распределения помехи

Для сужения спектра простого радиоимпульса необходимо увеличивать его длительность, что в ВУ практически делать нельзя. Поэтому необходимо переходить к использованию в импульсных ВУ, сложных сигналов, которые в течение их длительности подвергаются различным видам дополнительной модуляции (линейной частотной модуляции, манипуляции по фазе, манипуляции по частоте и по фазе) (6, 7).

Характерной особенностью таких сигналов является то, что за счет дополнительной модуляции, их база  $n = \Delta f \tau_n \gg 1$ , в то время как для простого импульсного или дискретного сигнала  $n = \Delta f \tau_n = 1$ . Другими словами, при той же длительности, спектр сложного сигнала расширяется примерно в  $n$  раз или при том же спектре его длительность увеличивается в  $n$  раз.

Положительные качества сложных сигналов проявляются тогда, когда осуществляется согласованный прием с использованием коррелятора или согласованного фильтра.

При согласованном приеме вид выходного сигнала определяется видом корреляционной функции входного сигнала.

Сложные сигналы позволяют вести прием в условиях, когда мощность мешающих сигналов превышает мощность полезного сигнала на входе приемного устройства.

Помехоустойчивость сложных сигналов по отношению к флюктуационным организованным помехам тем выше, чем больше их база  $n$ . Действительно, поскольку ведется согласованный прием сигналов, то действие шумовой помехи согласно (8) зависит только от отношения энергии полезного сигнала  $\mathcal{E}_c$  к его спектральной плотности мощности

$$N = P_{пп} / \Delta f_{пп}$$

где  $P_{пп}$  - мощность помехи;  $\Delta f_{пп}$  - ширина спектра помехи.

Если в качестве сложного сигнала выбрать радиоимпульс с длительностью в  $n$  раз больше длительности простого радиоимпульса без увеличения ширины его спектра за счет применения какого-либо вида модуляции, то для такого радиоимпульса

$$\frac{\mathcal{E}_c}{N} = \frac{P_c \tau_n \Delta f_{пп}}{P_{пп}} \geq \frac{n P_c}{P_{пп}} \quad (8)$$

Таким образом, увеличение базы  $n$  позволит увеличить отношение  $\frac{\mathcal{E}_c}{N}$  и тем самым обеспечить срабатывание ВУ с малой вероятностью ошибок (ложного срабатывания) при реализуемых в настоящее время отношениях  $\frac{P_c}{P_{пп}}$ .

В качестве сложных сигналов в импульсных ВУ целесообразно использовать непрерывную последовательность радиоимпульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ радиоимпульсов). Действительно, для ЛЧМ радиоимпульсов с  $\tau_n \Delta f_c \gg 1$  при фильтровой обработке требуется всего один канал. Увеличение энергии сигнала производится увеличением длительности  $\tau_{лчм}$  радиоимпульсов в  $n$  раз ( $\tau_{лчм} = n \cdot \tau_n$ ). При этом, если в согласованном фильтре обеспечить коэффициент сжатия  $n$ , то длительность импульса на выходе фильтра становится равной  $\tau_n$  и следовательно, импульсное ВУ не требует существенного изменения своей структуры.

Оценим возможный выигрыш в отношении сигнал/пассивная помеха при применении в качестве зондирующего сигнала непрерывной после-

довательности колокольных радиоимпульсов с ЛЧМ.

Для такого сигнала комплексная амплитуда и двумерная автокорреляционная функция соответственно равны:

$$U(t) = \sqrt{P_c} \exp\{-0,5\pi(1 + jn)t^2\}; \quad (9)$$

$$\rho(\tau, f) = \exp\left\{-0,5\pi\left[(1+n)^2\tau^2\tau_{и}^2 + 2n\tau f + f^2\tau_{и}^2\right]\right\}. \quad (10)$$

Если частотно-временного распределения помехи такое же, как и в случае предыдущего примера, то выражение для отношения сигнал/пассивная помеха на выходе согласованного фильтра будет равно

$$10\lg \frac{P_{с.вых}}{P_{п.вых}} = 10\lg \left[ \sqrt{1 + \frac{\Delta f_c^2 \Delta f}{\Delta f_{пп}^2} + \left(\frac{\Delta f_c^2}{\Delta f_{пп}^2}\right)^2} \cdot \exp\left\{\pi \frac{\frac{f_d^2}{\Delta f_{пп}^2}}{1 + \frac{\Delta f_c^2 \Delta f}{\Delta f_{пп}^2} + \left(\frac{\Delta f_c^2}{\Delta f_{пп}^2}\right)^2}\right\} \right], \quad (10)$$

где  $\Delta f$  - девиация частоты ЛЧМ радиоимпульса;

График зависимости (10) представлен на рис. 1 пунктиром, а взаимное расположение сечений функции неопределенности сигнала и частотно-временного распределения помехи на рис. 2

Анализ кривых (рис.1) показывает преимущество применения в качестве зондирующих сигналов ЛЧМ радиоимпульсов по отношению к простым импульсным сигналам по критерию максима

ума  $\frac{P_c}{P_{пп}}$ . Так, например, для  $\frac{\Delta f_c}{\Delta f_{пп}} = 10$  отноше-

ние  $\frac{P_c}{P_{пп}} = 10$ , для простого радиоимпульса, тогда

как для ЛЧМ радиоимпульса длительностью  $\tau_{лчм} = 100\tau_{и}$  это отношение равно 100.

## Выводы

Использование в активных импульсных ВУ сложных (широкополосных) сигналов позволяет при постоянном уровне мощности передатчика повысить потенциал ВУ, что обеспечивает повышение помехоустойчивость последнего путем загрузки его чувствительности по срабатыванию (выбора более высокого порога срабатывания).

## Список литературы

1. Коган И.М. Ближняя радиолокация / И.М. Коган. – М.: Сов. радио, 1973. – 272 с.
2. Радиовзрыватели ЗУР средней дальности. Учебник. – М.: Воениздат МО СССР, 1980. – 286 с.
3. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов / В.К. Слока. – М.: Сов. радио, 1970. – 65 с.
4. Уестерфилд П.С. Выигрыш в отношении сигнал-пассивная помеха при использовании согласованных фильтров / П.С. Уестерфилд // Зарубежная радиоэлектроника. – 1961. – № 3. – С. 64.
5. Кук Ч. Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд. – М.: Сов. радио, 1971. – 567 с.
6. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / В.Б. Пестряков, В.П. Афанасьев, В.Л. Гурвиц и др. – М.: Сов. радио, 1973. – 423 с.
7. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов / Л.Е. варакин. – М.: Сов. радио, 1970. – 373 с.
8. Пестряков В.Б. Радиотехнические системы / В.Б. Пестряков, В.Д. Кузнецов. – М.: Радиосвязь, 1985. – 94 с.
9. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман. – Х.: ВИРТА им.Говорова Л.А., 1984. – 409 с.
10. Ширман Я.Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я.Д. Ширман, В.Н. Манжос – М.: Радио и связь, 1981. – 268 с.

Поступила в редколлегию 2 .03.2015

**Рецензент:** канд. техн. наук, проф. В.В. Бурцев, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ПЕРЕШКОДОЗАХІСТУ АКТИВНИХ ІМПУЛЬСНИХ ПІДРИВНИХ ПРИБОРІВ ВІДНОСНО ПАСИВНИХ ПЕРЕШКОД

М.І. Рожков, Г.М. Зубрицький, Д.М. Запара

*Розглядаються можливості підвищення перешкодозахисту підривних пристроїв зенітних керованих ракет під час стрільби в умовах відбиття від хмари диполів.*

**Ключові слова:** підривні пристрої, зенітна керована ракета, пасивні перешкоди.

## THE POSSIBILITIES RESEARCH FOR INTERFERENCE IMMUNITY INCREASING OF ACTIVE PULSE DETONATION DEVICE SURFACE-TO-AIR MISSILE IN COMPARISON WITH PASSIVE INTERFERENCE

M.I. Rozhkov, G.M. Zubritsky, D.M. Zapara

*The possibilities estimated for interference immunity increasing of pulse detonation device surface-to-air missile during shooting in reflection conditions from dipoles clouds.*

**Keywords:** explosive device, Surface-to-air missile, passive noise.