

УДК 621.396.96

В.В. ЛИТВИНОВ, В.И. КЛИМЧЕНКО, А.А. МАЛЫШЕВ, А.В. ОЧКУРЕНКО

Харьковский военный университет, Украина

ПОВЫШЕНИЕ МЕЖПЕРИОДНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ПАССИВНЫХ ПОМЕХ В РЛС С НИЗКОСТАБИЛЬНЫМИ ГЕНЕРАТОРНЫМИ ПРИБОРАМИ

Рассматривается способ обработки эхо-сигналов, предполагающий повышение эффективности работы системы СДЦ в РЛС с низкостабильными генераторами СВЧ за счет “обужения” спектра эхо-сигналов

эффективность работы систем СДЦ, низкостабильные генераторные приборы, “обужающий” фильтр

Постановка проблемы

В большинстве РЛС РТВ, в которых в качестве генераторного прибора используются магнетроны, ламповые автогенераторы и т.п., передатчик имеет низкую стабильность частоты, из-за чего разрушается межпериодная корреляция отражений от пассивных помех (ПП). Это один из основных факторов, влияющих на эффективность работы системы СДЦ. При этом удельный вес фактора нестабильностей несущей частоты в суммарном остатке пассивной помехи, обусловленном аппаратурными нестабильностями РЛС, может составлять от 50 до 90% [1]. Поэтому задача снижения степени влияния частотных нестабильностей передающих устройств на эффективность систем СДЦ является весьма актуальной.

Анализ литературы

Одним из известных подходов снижения влияния нестабильности на эффективность систем СДЦ является выбор генераторного прибора на этапе проектирования РЛС в соответствии с предъявленными требованиями к защищенности РЛС от ПП. При этом для заданного значения коэффициента подавления ПП определяются допустимые среднеквадратические отклонения частоты [1 – 3]. Однако, обеспечение указанной точности подбором соответствующего генераторного прибора или непо-

средственной стабилизацией частоты передатчика не всегда возможно вследствие действия многих дестабилизирующих факторов, возникающих при эксплуатации РЛС (механические вибрации, пульсации источников питания, неправильный выбор рабочей точки генераторного прибора, нестабильность периода следования импульсов запуска передающего устройства и др.) [1]. Особенно этим “страдают” РЛС старого парка, разработанные в период до 1980 года.

Другим подходом является увеличение зоны режекции в частотной характеристике СДЦ с целью компенсации расширения спектра ПП. Для этого используют многорезонансные рекурсивные и нерекурсивные фильтры и их комбинации. В расширенную таким образом полосу режекции, попадает большая часть спектра помехи. Тем самым достигается увеличение коэффициента подавления ПП системой СДЦ при расширении спектра ПП, но при этом ухудшается коэффициент прохождения сигнала [2, 3].

Третьим направлением уменьшения влияния нестабильностей несущей частоты передатчика является введение в тракт обработки принятых сигналов устройств, обеспечивающих коррекцию частотных характеристик тракта [4, 5]. В частности, на учебно-полевой базе Вирта ПВО в середине 60-х годов экспериментально проверено, что сужение полосы пропускания в два раза позволяет

улучшить коэффициент подавления ПП на 3 – 4 дБ в зависимости от внешних условий. Но такие технические решения остались на уровне рекомендаций, не найдя практического применения из-за несовершенной элементной базы. С развитием методов и устройств цифровой обработки радиолокационных сигналов в настоящее время возникли совершенно новые возможности по обработке принятых сигналов, что требует более глубокой теоретической проработки влияния введения корректирующих элементов в тракт обработки сигналов на качественные показатели РЛС в целом.

Цель статьи

Сравнить эффективность систем СДЦ, реализованных в РЛС нового и старого парка, и проанализировать возможности повышения эффективности работы системы СДЦ в РЛС с низкостабильными генераторами СВЧ за счет введения “обужения” спектра сигнала.

Изложение материалов исследований

Для выделения сигнала на фоне помехи, когда между ними нет пространственно-временных различий, может быть использован лишь метод скоростной селекции (селекции по частоте Доплера). Возможность обнаружения сигнала на фоне ПП существенно зависит от отношения мощности помехи к мощности сигнала на входе приемника, от спектральных различий между сигналом и помехой и от эффективности систем СДЦ.

Сравнительный анализ эффективности систем СДЦ обзорных РЛС различных классов (табл. 1) проводился с использованием таких показателей, как коэффициент подавления ПП ($K_{\text{п}}$) и коэффициент подпомеховой видимости ($K_{\text{пв}}$) [2].

Анализ табл. 1 показывает, что системы защиты от ПП в РЛС нового парка таких, как 55Ж6, 22Ж6, 19Ж6, имеют достаточно высокую эффективность. Она обусловлена прежде всего использованием зон-

Таблица 1

Эффективность систем СДЦ

Тип РЛС	Тип передатчика	Тип когерентности	Система защиты от ПП	Заявленная эффективность системы защиты от ПП
55Ж6	Эндотрон	Истинная внутренняя	3-кратная ЧПАК *	$K_{\text{пв}} = 36$ дБ
22Ж6	Клистрон	Истинная внутренняя	нижняя зона: 3-кратная ЧПВ верхняя зона: ЧПВ+2-кратная ЧПАК *	$K_{\text{п}} = 30$ дБ
19Ж6	Клистрон	Истинная внутренняя	8-точечное ДПФ *	$K_{\text{пв}} = 48$ дБ
П-37	Магнетрон	Эквивалентная внутренняя	2-кратная ЧПВ	$K_{\text{п}} = 20$ дБ
П-19	Магнетрон	Эквивалентная внутренняя	2-кратная ЧПВ	$K_{\text{п}} = 20$ дБ
ПРВ-13	Магнетрон	Эквивалентная внутренняя, внешняя	2-кратная ЧПВ	$K_{\text{п}} = 18$ дБ
П-18	Автогенератор. лампа	Эквивалентная внутренняя	2-кратная ЧПВ	$K_{\text{п}} = 14$ дБ
5Н84А	Автогенератор. лампа	Эквивалентная внутренняя	2-кратная ЧПВ	$K_{\text{п}} = 14$ дБ
ПРВ-17	Стабилотрон	Эквивалентная внутренняя	2-кратная ЧПВ	$K_{\text{пв}} = 30$ дБ

* – цифровая реализация устройства

дирующих сигналов с истинной внутренней когерентностью, применением передатчиков, построенных по схеме “высокостабильный возбудитель + усилитель мощности”, и внедрением цифровых методов обработки сигналов.

В РЛС старого парка K_n фактически не превышает 20 дБ. Такая низкая эффективность обусловлена использованием передающих устройств, построенных по схеме автогенератора с применением низкостабильных генераторных приборов, несовершенством аналоговых систем обработки сигналов и реализацией упрощенных алгоритмов компенсации (однократное черезпериодное вычитание, двукратное черезпериодное вычитание). Из РЛС старого парка, приведенных в таблице, можно выделить лишь высотомер ПРВ-17, для которого проблема защиты от ПП решена более-менее успешно (по отношению к таким РЛС, как П-37, П-19, П-18, ПРВ-13 и др.) за счет выбора стабильного генераторного прибора.

В последние годы для получения высокого коэффициента подавления ПП передающие устройства строятся по схеме “возбудитель – усилитель мощности”. При этом используются такие дорогостоящие усилительные приборы как клистроны, ЛБВ и т.п. Это требует использования сложных систем стабилизации питающих напряжений, устройств автоматической регулировки уровней усиления в цепочке усилителей (для получения постоянной выходной мощности), устройств согласования нагрузки для каждого промежуточного каскада усилитель-

ной линейки и т.д. Кроме того, указанные усилительные приборы имеют большие массогабаритные показатели, высокую чувствительность по фазовой модуляции, интенсивное рентгеновское излучение [3].

Построение передающих устройств по схеме “возбудитель – усилитель мощности” оправдывают тем, что их введение обеспечивает создание условий для реализации высокого коэффициента подавления ПП и считается, что на магнетронах и автогенераторных лампах невозможно получить высокую эффективность работы системы СДЦ. Это ошибочное мнение. Так в РЛС Marconi RC-733, в которой в качестве генераторного прибора используется магнетрон, коэффициент подавления ПП может достигать 40 дБ.

Основными источниками нестабильностей, влияющих на эффективность систем СДЦ типовой когерентной РЛС (рис. 1), являются частотные нестабильности магнетрона, местного гетеродина (МГ) и когерентного гетеродина (КГ). В настоящее время обеспечение высокой стабильности частоты МГ и КГ (порядка $10^{-9} \dots 10^{-8}$ за период повторения импульсов) не является проблемой. Основной вклад в снижение эффективности работы систем СДЦ РЛС старого парка вносит частотная нестабильность передающего устройства (50 – 90% от аппаратурных нестабильностей РЛС). На первый взгляд, самой радикальной мерой была бы замена передатчика. Однако, замена передающего устройства приведет к перестроению большинства узлов и компонентов

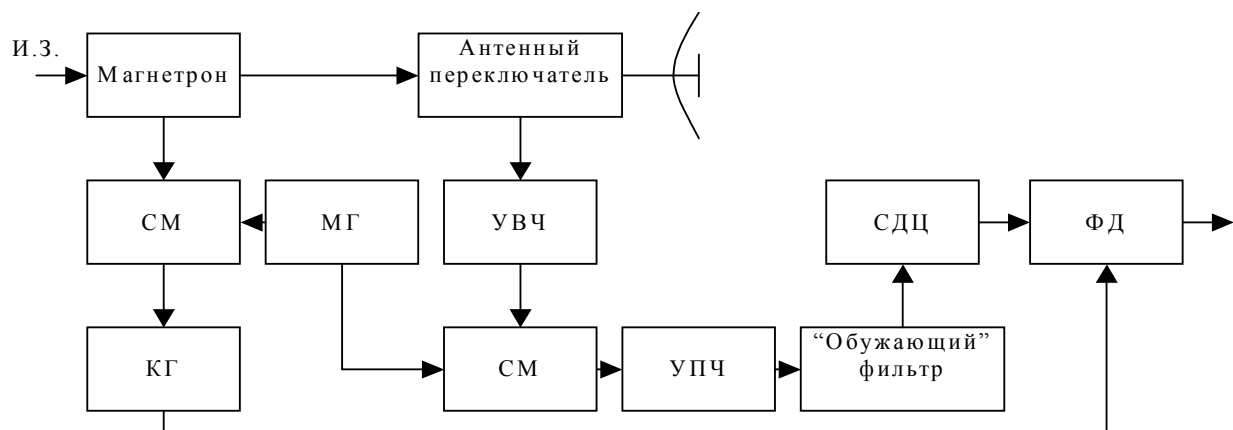


Рис. 1. Упрощенная структурная схема РЛС

РЛС, т.е. фактически к замене всей РЛС. Более предпочтительным путем повышения помехозащищенности РЛС старого парка является модернизация систем обработки принятых сигналов.

Для модернизации системы обработки сигналов необходимо определить способы уменьшения влияния частотной нестабильности передатчика на эффективность подавления отражений от ПП. Выясним механизм ухудшения эффективности работы системы СДЦ, вызванный уходом несущей частоты зондирующих сигналов (ЗС).

Как было указано, частотная нестабильность приводит к разрушению межпериодной корреляции отражений от ПП вследствие появления в спектре ЗС новых спектральных составляющих, обусловленных уходом несущей частоты. Это приводит к тому, что в системе СДЦ полной компенсации ПП не происходит, так как постоянно от импульса к импульсу появляются новые составляющие в спектре принятых сигналов.

Считалось, что устранить влияние частотной нестабильности передатчика можно с помощью соответствующего “сдвига” частоты местного гетеродина. Такое мнение ошибочно. Сдвигая частоту местного гетеродина в каждом такте зондирования можно получить для дальнейшей обработки сигналы на одной и той же частоте (промежуточной), но при этом амплитудно-фазовые изменения не устроятся.

Повысить межпериодную корреляцию можно взятием на обработку перекрывающейся части спектра зондирующих сигналов, используя “обужающий” фильтр в тракте обработки принятых сигналов.

Под “обужением” понимается уменьшение ширины полосы пропускания фильтра обработки одиночного импульса $K(\Pi)$ относительно спектра ЗС $S1(f)$ (рис. 2). Частотную характеристику “обужающего” фильтра целесообразно выбрать колокольной формы, которая наиболее близко соответствует частотным характеристикам реальных приемных трактов РЛС.

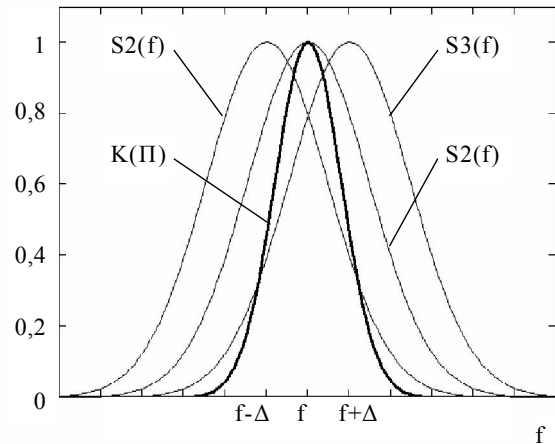


Рис. 2. Вид АЧХ “обужающего” фильтра и спектров сигналов

Таким образом, частотная характеристика “обужающего” фильтра может быть представлена как

$$K(\Pi) = \exp \left[-\frac{(2\pi f - 2\pi f_0)^2}{\pi^2 \cdot \Pi^2} \cdot \ln \left(\frac{1}{d} \right) \right], \quad (1)$$

где Π – ширина полосы пропускания “обужающего” фильтра; d – уровень, на котором определяется ширина полосы пропускания “обужающего” фильтра относительно максимума (например, $d = 0,46$ для колокольных сигналов и $d = 0,64$ для прямоугольных сигналов).

Исследование зависимости межпериодной корреляции $R(\tau)$ от частотной нестабильности генераторного прибора целесообразно проводить в спектральной области [6]:

$$R_{\Delta}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S1(f) \cdot S2(f) \cdot K^2(\Pi) \cdot \exp(j2\pi f\tau) \cdot df, \quad (2)$$

где $S1(f)$ – комплексный спектр сигнала, не смещенный относительно несущей частоты; $S2(f)$ – комплексный спектр сигнала, смещенный относительно несущей частоты на величину частотной нестабильности передатчика Δ (рис. 2).

Наличие внутренних шумов уменьшает коэффициент корреляции ПП. Учесть влияние внутренних шумов на корреляцию ПП можно с помощью следующей записи функции межпериодной корреляции:

$$R_{\Delta,n}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} (S1(f) \cdot K(\Pi) + N_0 \cdot K(\Pi)) \times (S2(f) \cdot K(\Pi) + N_0 \cdot K(\Pi)) \cdot \exp(j2\pi f\tau) \cdot df, \quad (3)$$

где N_0 – спектральная мощность шумов.

Для расчетов удобней использовать не функцию корреляции, а нормированную величину – коэффициент корреляции. Тогда выражение (4) примет следующий вид:

$$\rho_{\Delta,n}(\tau) = \frac{R_{\Delta,n}(\tau)}{\sqrt{D1} \cdot \sqrt{D2}}, \quad (4)$$

где $D1$ и $D2$ – дисперсии смесей $[S1(f) + N_0]$ и $[S2(f) + N_0]$.

На коэффициент корреляции ПП существенно влияют хаотические перемещения отражателей, которые вызывают флуктуации отраженного сигнала. Энергетический спектр флуктуаций помехи будем аппроксимировать гауссовой кривой

$$G(f) = G_0 \cdot \exp\left(-\frac{f^2}{2 \cdot \sigma_{f_{nn}}^2}\right), \quad (5)$$

где $\sigma_{f_{nn}}$ – полуширина спектра флуктуаций ПП.

При таком энергетическом спектре коэффициент корреляции (при условии учета только хаотического перемещения отражателей) имеет вид

$$\rho_{гаус}(\tau) = \exp\left(-2 \cdot \pi^2 \cdot \sigma_{f_{nn}}^2 \cdot \tau^2\right). \quad (6)$$

Будем считать, что временные нестабильности (нестабильность периода посылки и длительности импульса) ЗС незначительны.

Поскольку все рассмотренные факторы, влияющие на статистические характеристики ПП, являются независимыми, то результирующая функция корреляции может быть найдена как произведение частных функций корреляции [1]:

$$\rho_{рез}(\tau) = \rho_{\Delta,n}(\tau) \cdot \rho_{гаус}(\tau). \quad (7)$$

Рассмотрим две наиболее типичные формы огибающей сигнала: колокольную и прямоугольную.

Сначала проанализируем случай использования колокольного сигнала. В случае отсутствия частотной расстройки спектр будет иметь вид:

$$S1(f) = S_{max} \cdot \exp\left[-\frac{(2\pi f - 2\pi f_0)^2 \cdot \alpha^2}{2}\right], \quad (8)$$

где α – параметр сигнала, однозначно связанный с длительностью колокольного импульса, равный

$$\alpha = \sqrt{\frac{\tau_{имп}^2}{8 \cdot (-\ln(d))}}; \quad (9)$$

$\tau_{имп}$ – длительность импульса.

При наличии частотной расстройки Δ спектр $S2(f)$ сдвинут относительно несущей частоты f_0 на величину Δ :

$$S2(f) = S_{max} \cdot \exp\left[-\frac{(2\pi f - 2\pi f_0 - 2\pi\Delta)^2 \cdot \alpha^2}{2}\right]. \quad (10)$$

Исследование эффективности работы системы СДЦ в случае применения “обужающего” фильтра проводилось на примере систем СДЦ с однократным и двукратным вычитанием. Исследования проводились для типового значения отношения помеха/шум, равного 40 дБ и отношения сигнал/шум, равного 10 дБ.

Зависимость изменений коэффициента межпериодной корреляции от относительной величины частотной расстройки $\Delta/\text{По}$ передатчика (По – ширина спектра зондирующего сигнала) при фиксированной полосе пропускания П “обужающего” фильтра приведена на рис. 3 (сплошная линия). Зависимость изменения значений отношения сигнал/шум от относительной величины полосы пропускания П/По “обужающего” фильтра приведена на рис. 4 (сплошная линия). Результаты расчетов показывают, что использование “обужающего” фильтра приводит, с одной стороны, к увеличению коэффициента межпериодной корреляции ПП, а с другой стороны – к уменьшению отношения сигнал/шум.

График, представленный на рис. 5, показывает изменение значений коэффициента подавления ПП от относительной величины полосы пропускания П/По “обужающего” фильтра, для значения отношения помеха/шум равного 40 дБ ($\sigma_{пп} = 10$ Гц), при

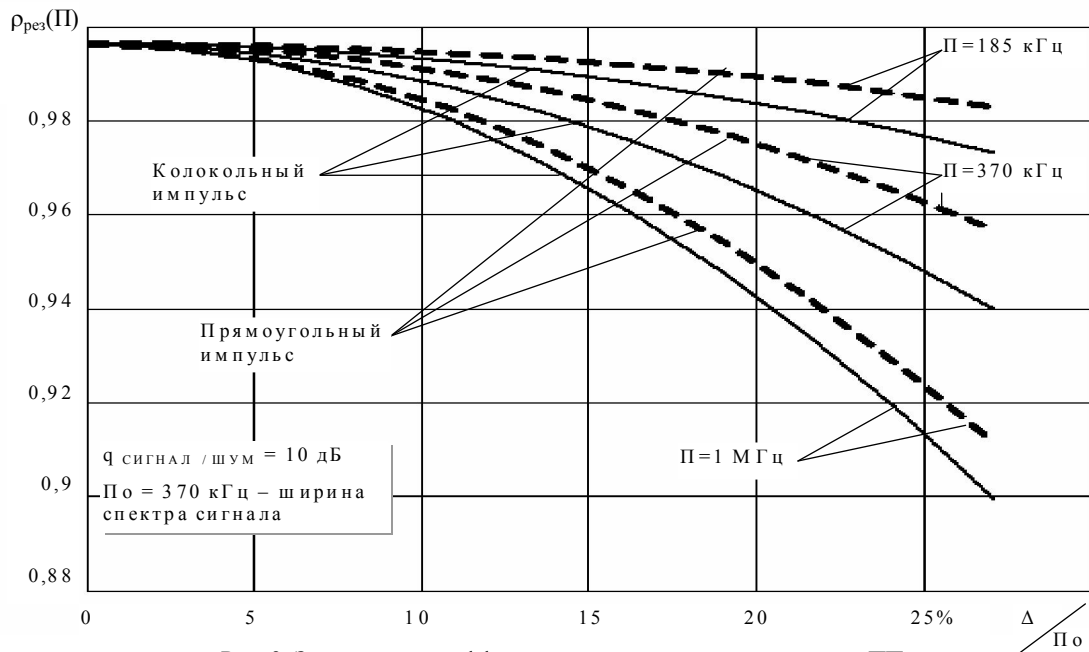


Рис. 3. Зависимость коэффициента межпериодной корреляции ПП от относительной расстройки частоты генераторного прибора

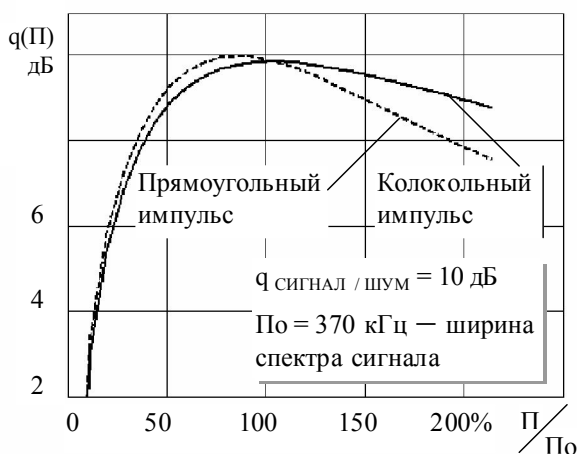


Рис. 4. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе системы СДЦ от относительной ширины полосы пропускания “обужающего” фильтра

ухе частоты передатчика, равного 10% от ширины спектра сигнала P_o (кривая соответствующая колокольному импульсу изображена сплошной линией).

Исследование эффективности работы системы СДЦ с использованием “обужающего” фильтра для прямоугольного импульса проводилось при тех же исходных условиях, что и для колокольного импульса.

На рис. 3 (пунктирная линия) показано изменение величины коэффициента межпериодной корреляции от относительной величины частотной

расстройки Δ/P_o передатчика СВЧ при фиксированной полосе пропускания “обужающего” фильтра для прямоугольного импульса. Изменение отношения сигнал/шум от относительной величины полосы пропускания P/P_o “обужающего” фильтра показано на рис. 4 (пунктирная линия).

На рис. 5 показано изменение величины коэффициента подавления ПП от относительной ширины полосы пропускания P/P_o “обужающего” фильтра для значений отношения помеха/шум, равного 40 дБ (кривые соответствующие прямоугольному импульсу отмечены пунктирной линией).

Заклучение

В целом полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Использование “обужающих” фильтров в тракте обработки принятых сигналов позволяет повысить эффективность систем СДЦ.

Так, при уменьшении полосы пропускания фильтра на 50% и при 10% расстройке частоты зондирующего сигнала (относительно ширины спектра ЗС) в системе СДЦ с однократным ЧПВ коэффициент подавления ПП повышается на 1,1 дБ для колокольного импульса и 0,8 дБ для

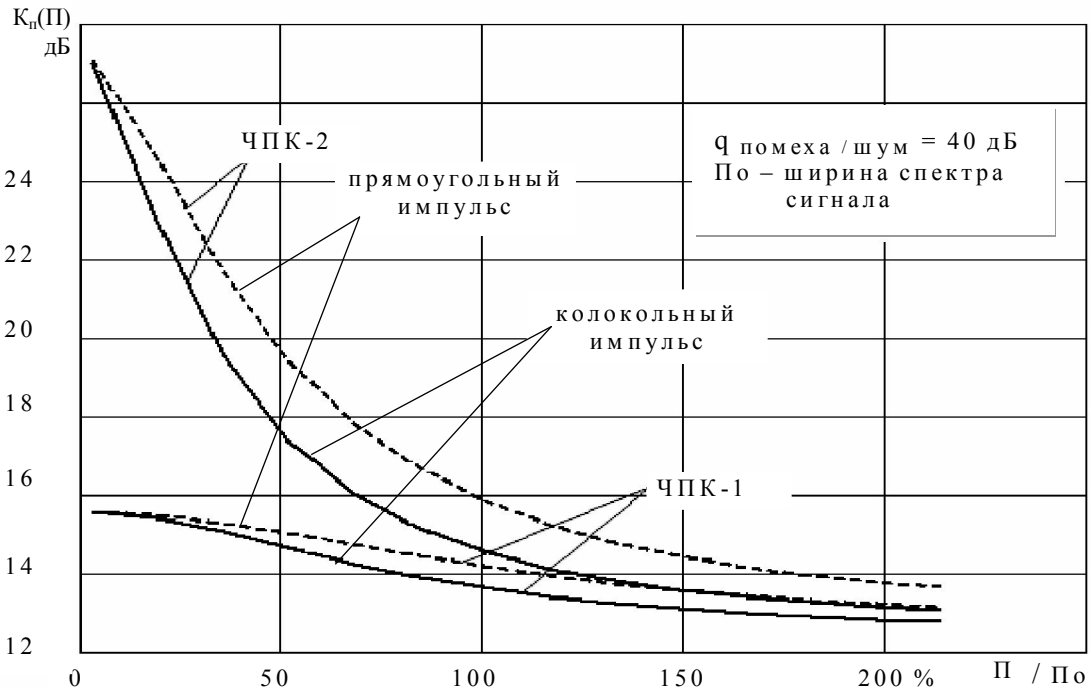


Рис.5. Зависимость коэффициента подавления ПП от относительной ширины полосы пропускания “обужающего” фильтра

прямоугольного импульса, а в системе СДЦ с двукратным ЧПВ – на 2,85 дБ для колокольного импульса и 3,6 дБ для прямоугольного импульса. При этом отношение сигнал/шум ухудшилось на 0,7 дБ для прямоугольного импульса и на 1 дБ для колокольного импульса.

2. Допустимое обужение полосы пропускания приемного тракта составляет до 50% от ширины спектра обрабатываемых сигналов. При этом обеспечивается существенное повышение K_p при приемлемом уменьшении отношения “сигнал/шум”.

3. Согласованную фильтрацию принимаемых сигналов целесообразно проводить до обработки их в системе СДЦ, так как использование трактов с полосой пропускания большей, чем ширина спектра сигнала, приводит к ухудшению коэффициента корреляции.

Следует отметить, что описанный вариант повышения эффективности работы системы СДЦ целесообразно применять в существующих образцах РЛС типа П-37, П-18, 5Н84А, П-19, поскольку внедрение “обужающего” фильтра не требует значительных затрат.

Литература

1. Кравченко Н.И. Отчет по НИР Косинус. Т. 1. № 61397. – Х.: ВИРТА ПВО, 1967. – 638 с.
2. Ширман Я.Д., Голиков В.Н., Бусыгин И.Н. Теоретические основы радиолокации. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
3. Скольник М. Справочник по радиолокации. Том 3. – М.: Сов. радио, 1979. – 528 с.
4. Литвинов В.В., Поляков В.И. Череспериодная автокомпенсация отражений от местности на волне 3 см при некогерентном излучении // Труды академии. – Х.: ВИРТА. – 1966. – № 72. – С. 157 – 164.
5. Гут Р.Э., Окунев Ю.Б., Сидоров Н.М. Влияние расстройки частоты на помехоустойчивость автокорреляционного приема сигналов // Радиотехника. – 1986. – № 7. – С. 67 – 70.
6. Горяинов В.Т., Журавлев А.Г., Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. Примеры и задачи. – М.: Сов. радио, 1980. – 544 с.

Поступила в редакцию 8.08.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.П. Кондратенко, Харьковский военный университет, Харьков.