

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.14>

УДК: УДК 621.396:681.323

СЕЛЕКЦИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ БОРТОВОЙ РЛС С ВНУТРЕННЕЙ КОГЕРЕНТНОСТЬЮ

С.И. Зиятдинов, О.И. Красильникова

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения,
190000, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67

Статья поступила в редакцию 23 июня 2025 г.

Аннотация. *Введение.* Рассмотрена работа бортовой системы селекции движущихся целей (СДЦ) с внутренней когерентностью в режиме малой скважности. Для решения задачи одновременного подавления пассивных помех и измерения дальности до движущейся на встречном курсе цели использованы протяженные зондирующие импульсы, обеспечивающие доплеровскую фильтрацию отраженных сигналов в пределах одного периода зондирования с одновременным измерением дальности до цели. *Цель.* Разработать и исследовать средства селекции движущихся целей бортовой РЛС с внутренней когерентностью. Показать возможность одновременного решения задачи обнаружения движущейся цели и измерения ее дальности на фоне пассивных помех бортовой РЛС в режиме внутренней когерентности с малой скважностью по одному периоду зондирования. Оценить эффективность предлагаемого метода и устройства обработки сигналов с использованием машинного моделирования. *Материалы и методы.* В основу работы положен спектрально-корреляционный метод анализа статистических свойств сигналов и устройств их обработки. *Результаты.* Разработаны модели сигналов и устройства селекции движущихся целей бортовой РЛС с внутренней когерентностью в режиме малой

скважности. Методом машинного моделирования получены численные показатели эффективности режекции пассивных помех и ошибок измерения дальности до движущейся цели. **Выводы.** Предложенный метод и устройство обработки сигналов в бортовой системе СДЦ с внутренней когерентностью позволяет одновременно решать задачу обнаружения движущейся цели и измерять ее дальность бортовой РЛС на фоне пассивных помех с использованием протяженных зондирующих импульсов в режиме малой скважности. Полученные в статье результаты могут быть полезны при проектировании бортовых доплеровских РЛС, использующих средства СДЦ.

Ключевые слова: пассивная помеха, протяженный зондирующий импульс, система селекции движущихся целей, доплеровский фильтр, коэффициент подавления пассивной помехи, ошибки измерения дальности.

Автор для переписки: Зиятдинов Сергей Ильич, ziat.53@mail.ru

Введение

В реальных условиях работа РЛС осложняется различными помехами, такими как внутриприемный шум, пассивные и специально организованные помехи. К числу естественных пассивных помех относят отражения от земной, водной поверхностей, местных предметов и перемещающихся метеообразований. При этом уровень пассивных помех может на 20-40 дБ и более превышать полезные сигналы, отраженные обнаруживаемыми целями [1-10]. Пассивные помехи являются относительно узкополосными, ширина их энергетического спектра может лежать в диапазоне от единиц до нескольких сотен Герц [9].

Для обнаружения движущихся целей на фоне достаточно мощных пассивных помех используют разнообразные средства селекции движущихся целей виде устройств череспериодного вычитания необходимой кратности или полосовых доплеровских фильтров [5-9].

В наземных РЛС решение задачи построения средств СДЦ не вызывает серьезных трудностей, так как частота отраженных земной, водной

поверхностями и местными предметами сигналов совпадает с частотой зондирующих радиосигналов. Сигналы, отраженные перемещающимися метеообразованиями, содержат доплеровское смещение частоты, которое в силу относительно невысокой скорости движения метеообразований не превышает единиц килогерц. Для режекции сигналов от метеообразований используют либо схемы “компенсации” скорости ветра, либо адаптивные устройства СДЦ.

Задача обнаружения движущихся целей бортовыми РЛС резко усложняется из-за больших скоростей носителей РЛС, составляющих от сотен до нескольких тысяч километров в час. При этом значение частоты Доплера сигналов пассивных помех может достигать нескольких десятков килогерц.

В бортовых РЛС для селекции движущихся целей используют, как правило, системы СДЦ с внешней когерентностью, когда в качестве опорного напряжения для устройства СДЦ выступает непосредственно сигнал пассивной помехи [9].

Однако на практике отражения от земной или водной поверхностей носят разрывный во времени характер. Так при спокойной водной поверхности отраженный сигнал практически отсутствует, что нарушает нормальную работу средств СДЦ. Причем разрывы в пассивных помехах могут колебаться от единиц до нескольких десятков микросекунд и более.

В [9] предложен метод создания внутренней когерентности на борту подвижного носителя доплеровской РЛС. Суть данного метода заключается в том, что с помощью бортового вычислителя по информации с бортовых датчиков углового положения антенны и датчика путевой скорости рассчитывается значение доплеровской поправки частоты, которое далее вводится в частоту опорного гетеродина системы СДЦ. Однако на практике данный метод не реализован из-за большой ошибки вычисления доплеровской поправки частоты.

В [9] рассмотрен метод селекции движущихся целей бортовой РЛС на встречных курсах с использованием квазинепрерывного излучения

зондирующих радиоимпульсов, при котором применяется режим малой скважности, а частота повторения излучаемых импульсов заведомо больше возможной частоты Доплера сигналов, отраженных подстилающей поверхностью и местными предметами. Существенным недостатком данного метода является невозможность определения дальности до цели, что резко снижает эффективность бортовой РЛС.

В статье рассматривается метод селекции движущихся целей на встречных курсах бортовой РЛС с внутренней когерентностью и возможностью одновременного измерения дальности до обнаруженной цели.

1. Постановка задачи.

В большинстве практических случаев для одновременного обнаружения целей и измерения их координат (дальности) используется режим большой скважности в работе передатчика РЛС. При этом излучаются короткие сверхвысокочастотные радиоимпульсы с заданным периодом, обеспечивающим однозначное измерение дальности по времени задержки отраженных от целей импульсов [1-9].

Как отмечалось выше, при данном методе селекция движущихся целей возможна только при использовании внешней когерентности. Представляет интерес разработка технического решения одновременной селекции движущихся целей средствами СДЦ и измерения их дальности бортовой РЛС с внутренней когерентностью в режиме малой скважности при использовании в пределах каждого радиолокационного периода протяженных зондирующих сверхвысокочастотных радиоимпульсов длительностью несколько миллисекунд. Решение данной задачи составляет основное содержание статьи.

2. Зондирующий сигнал и доплеровская фильтрация.

На рис. 1 показан протяженный зондирующий радиоимпульс длительностью $T/2$, где T -период следования излучаемых передатчиком импульсов. При длительности зондирующих радиоимпульсов, например, $\tau_{\text{и}} = 2$ мс период следования излучаемых импульсов составит $T = 4$ мс.

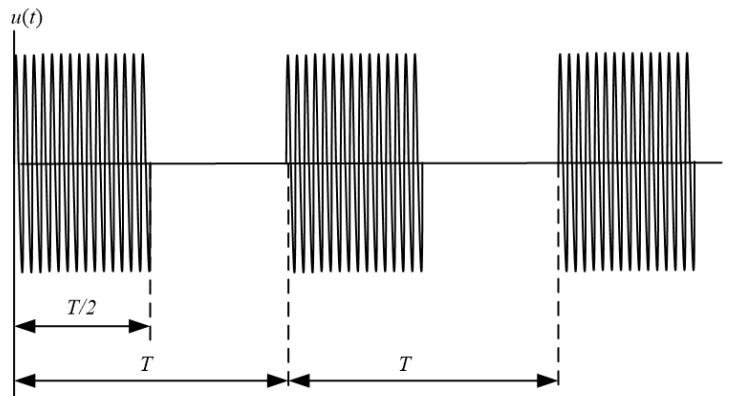


Рис. 1. Зондирующие импульсы.

Покажем, что использование протяженных зондирующих импульсов позволяет за время одного периода повторения осуществить одновременное обнаружение движущейся цели путем доплеровской фильтрации на фоне пассивных помех и измерить с определенной точностью дальность до обнаруженной цели по времени задержки отраженного сигнала. Для этого определим необходимые требования к параметрам зондирующего радиоимпульса и средствам СДЦ для эффективного решения поставленной задачи.

Пусть в системе СДЦ для режекции пассивных помех и выделения сигналов от движущихся целей используется полосовой доплеровский фильтр с нижней граничной частотой $f_{\text{н}}$. Частоту Доплера сигнала от пассивной помехи обозначим как $F_{\text{п}}$. На рис. 2 представлены энергетические спектры пассивной помехи $G_{\text{п}}(f)$, полезного сигнала от движущейся цели $G_{\text{с}}(f)$ и амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) полосового доплеровского фильтра системы СДЦ. Из рис. 2 следует, что боковые составляющие спектра пассивной помехи попадают в полосу пропускания доплеровского фильтра и тем самым затрудняют обнаружение движущейся цели.

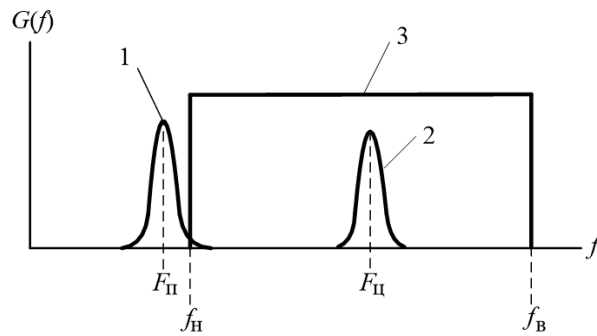


Рис. 2: 1 – энергетический спектр пассивной помехи $G_{\text{п}}(f)$;
 2 – энергетический спектр движущейся цели $G_{\text{с}}(f)$ со средней частотой $F_{\text{ц}}$;
 3 – АЧХ доплеровского фильтра.

Для прямоугольного по форме зондирующего радиоимпульса длительность $\tau_{\text{и}}$ спектральная плотность типа $\sin x / x$ является бесконечно широкой с эффективной шириной $\Delta F = 1 / \tau_{\text{и}}$, в которой сосредоточено 90% энергии импульса [10,11]. При $\tau_{\text{и}} = T / 2$ эффективная ширина энергетического спектра зондирующего импульса составляет $\Delta F = 2 / T$. Так, например, при $T = 4$ мс получим $\Delta F = 500$ Гц.

Определим нижнюю граничную частоту $f_{\text{н}}$ АЧХ доплеровского фильтра, обеспечивающую необходимый коэффициент подавления пассивной помех, который можно вычислить с помощью следующего соотношения:

$$K_{\text{п}} = 2 \frac{\int_{f_{\text{н}}}^{f_{\text{в}}} G_{\text{п}}(f) df}{P_{\text{п}}},$$

где $G_{\text{п}}(f) = \tau_{\text{и}}^2 \left\{ \sin \left[\frac{(f - f_{\text{п}}) \tau_{\text{и}}}{2} \right] \right\}^2$ – энергетический спектр пассивной помехи

в виде прямоугольного радиоимпульса в области положительных частот; $f_{\text{н}}$, $f_{\text{в}}$ – нижняя и верхняя граничные частоты АЧХ доплеровского фильтра; $P_{\text{п}}$ – мощность пассивной помехи на входе доплеровского фильтра, которая для прямоугольного радиоимпульса пассивной помехи единичной амплитуды равна $P_{\text{п}} = 1$.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента подавления пассивной помехи от относительной величины смещения нижней граничной частоты АЧХ

доплеровского фильтра $\Delta f = (f_n - F_n)\tau_n$ для случая, когда верхняя граничная частота АЧХ доплеровского фильтра много больше нижней граничной частоты АЧХ доплеровского фильтра $f_v \gg f_n$.

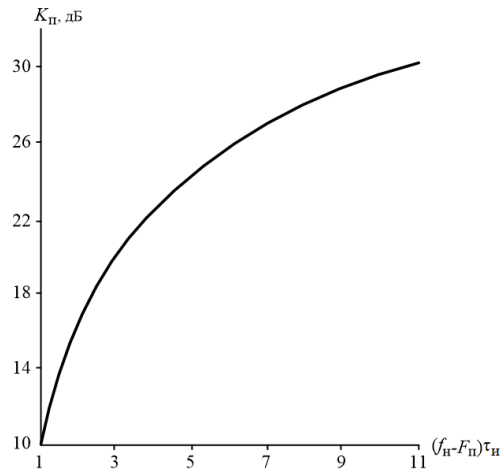


Рис. 3. Коэффициент подавления пассивной помехи.

Из полученных результатов следует, что для получения коэффициента подавления пассивной помехи $K_n > 30$ дБ необходимо обеспечить смещение нижней граничной частоты доплеровского фильтра f_n относительно средней частоты энергетического спектра пассивной помехи более чем на величину $\Delta f > 10 / \tau_n$. Так при $\tau_n = 1$ мс смещение частоты должно быть $\Delta f > 10$ кГц.

С учетом требования одновременного подавления пассивной помехи и точного измерения дальности до движущейся цели требуется широкая полоса пропускания доплеровского фильтра $\Delta f_{дф} = f_v - f_n$. При длительности переднего фронта выходного сигнала доплеровского фильтра $t_f < 1$ мкс полоса пропускания доплеровского фильтра должна быть $\Delta f_{дф} > 1$ МГц.

Соблюдение данного условия предполагает проведение доплеровской фильтрации входных сигналов на достаточно высокой частоте, т.е. период данного колебания должен быть много меньше длительности фронта выходного сигнала доплеровского фильтра. Однако на частотах в несколько десятков мегагерц практическая реализация полосового доплеровского фильтра с необходимой крутизной АЧХ не представляется возможной.

Поэтому с учетом физической реализуемости полосового доплеровского фильтра возьмем компромиссный вариант, при котором в приемном устройстве

РЛС принимаемые СВЧ радиоимпульсы преобразуются на промежуточную частоту, например, не более одного МГц.

В работе [10] показано, что при прохождении прямоугольного радиоимпульса через полосовой фильтр возникают в виде выбросов значительные по уровню переходные процессы, которые при решении задачи режекции мощных пассивных помех могут нарушить работу устройства СДЦ.

На рис. 4 представлена АЧХ полосового доплеровского фильтра с нижней граничной частотой $f_n = 1$ МГц и верхней граничной частотой $f_v = 2$ МГц.

При моделировании процесса обработки сигналов в качестве доплеровского фильтра был взят полосовой фильтр Чебышева восьмого порядка [12].

На рис. 5а изображена огибающая переднего фронта выходного сигнала доплеровского фильтра при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса пассивной помехи единичной амплитуды с частотой $f_n = 0,98$ МГц ($f_n < f_n$) и длительностью $\tau_n = 1$ мс. На рис. 5б показана огибающая выходного сигнала доплеровского фильтра при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса от движущейся цели единичной амплитуды с частотой $f_n = 1,02$ МГц ($f_n > f_n$) и длительностью $\tau_n = 1$ мс.

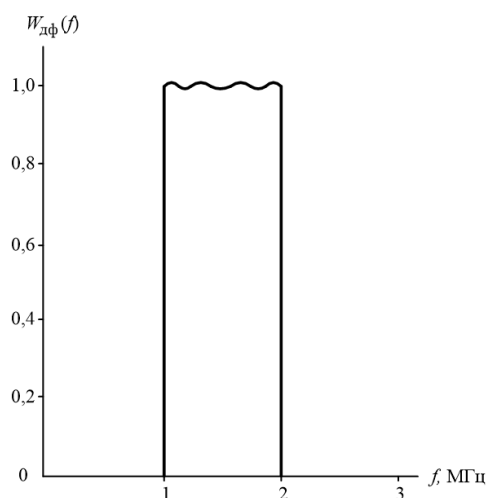


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика полосового доплеровского фильтра.

Полученные результаты моделирования показывают, что воздействие на доплеровский фильтр пассивной помехи в виде прямоугольного радиоимпульса единичной амплитуды приводит к появлению на фронтах выходного сигнала доплеровского фильтра мощных выбросов уровня 0,22, соответствующих коэффициенту подавления пассивной помехи $K_{\text{п}} = 13,2$ дБ, что недостаточно для эффективной селекции движущейся цели. Столь небольшой коэффициент подавления пассивной помехи определяется прямоугольной формой огибающей радиоимпульса пассивной помехи. Вместе с тем при прохождении через доплеровский фильтр сигнала от движущейся цели в выходном сигнале возникают завалы фронтов, что, несомненно, снижает точность измерения дальности до цели.

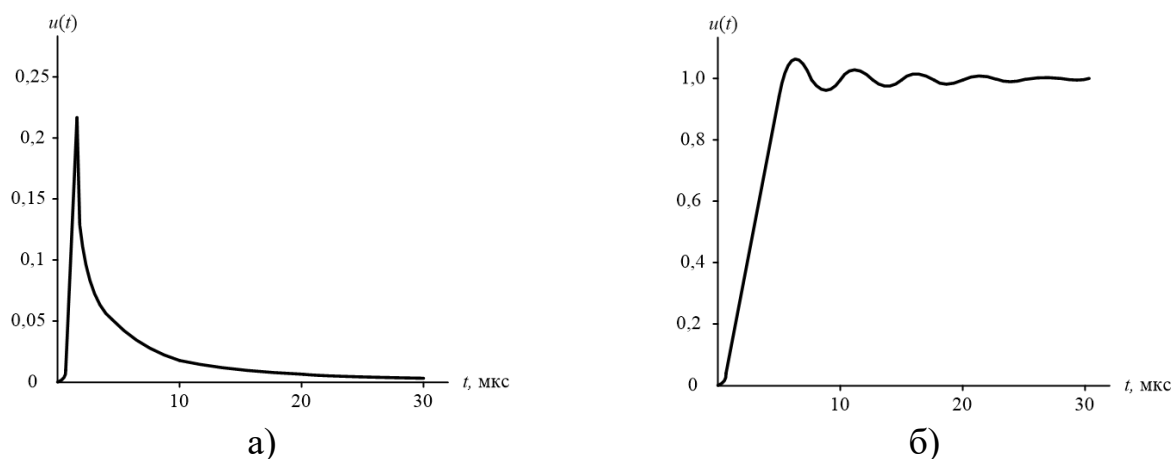


Рис. 5. Огибающая переднего фронта выходного сигнала доплеровского фильтра: а) – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса пассивной помехи; б) – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса от движущейся цели.

Следует отметить, что в составе приемного устройства РЛС имеется относительно узкополосный усилитель промежуточной частоты (УПЧ).

Рассмотрим влияние полосы пропускания УПЧ на коэффициент подавления пассивной помехи и величину завалов фронтов выходного сигнала системы СДЦ. При моделировании в качестве УПЧ был взят полосовой фильтр Чебышева третьего порядка с частотой настройки $f_{\text{упч}} = 1$ МГц, АЧХ которого с различной шириной полосы пропускания Δf представлена на рис. 6.

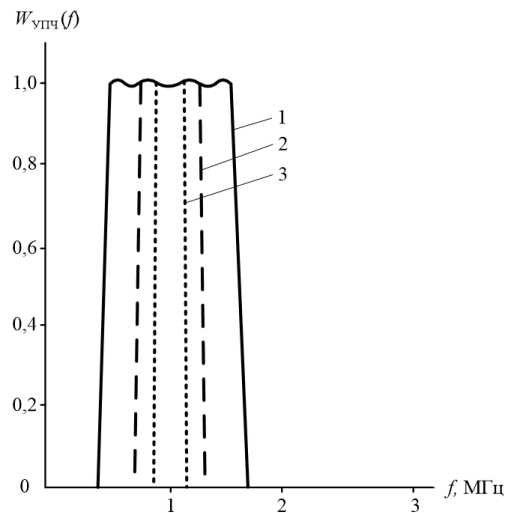


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики усилителя промежуточной частоты: 1 – $\Delta f = 1$ МГц; 2 – $\Delta f = 470$ кГц; 3 – $\Delta f = 220$ кГц.

На рис. 7а показана огибающая переднего фронта сигнала пассивной помехи на выходе доплеровского фильтра при полосе пропускания УПЧ $\Delta f = 1$ МГц. На рис. 7б показаны аналогичны результаты моделирования для сигнала движущейся цели.

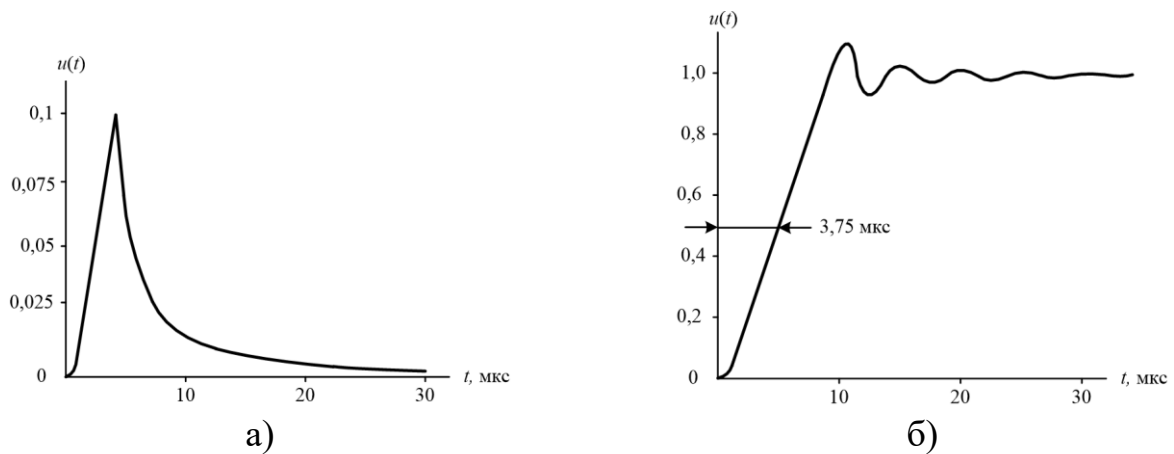


Рис. 7. Огибающая переднего фронта выходного сигнала доплеровского фильтра: а – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса пассивной помехи; б – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса от движущейся цели при полосе пропускания УПЧ $\Delta f = 1$ МГц.

Для принятых исходных данных коэффициент подавления пассивной помехи составляет $K_{\Pi} = 20$ дБ при длительности переднего фронта выходного сигнала (по уровню 0,5) движущейся цели $t_{\Phi} = 3,75$ мкс. Возникающая ошибка измерения дальности составляет $\Delta D = 560$ м.

На рис. 8а и 8б показаны результаты моделирования при полосе пропускания УПЧ $\Delta f = 470$ кГц.

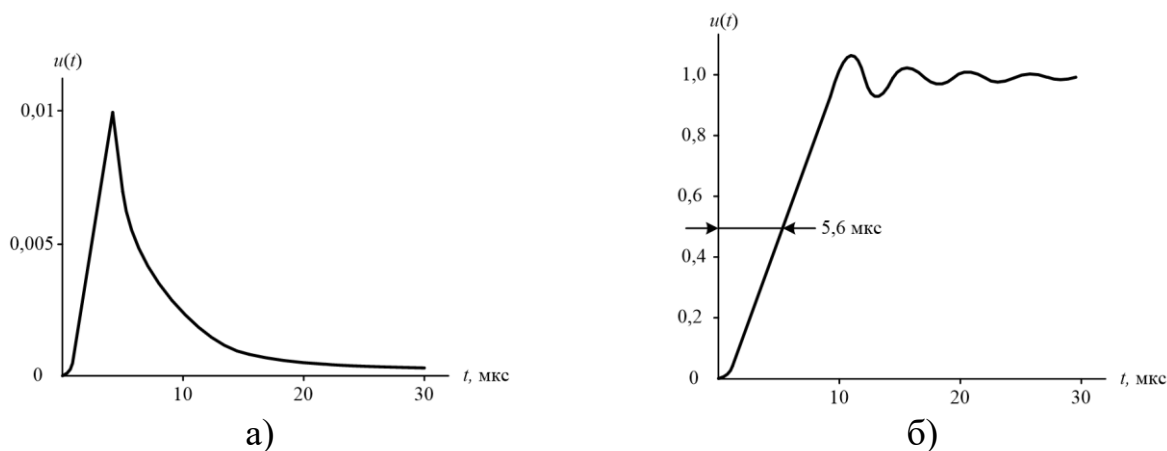


Рис. 8. Огибающая переднего фронта выходного сигнала доплеровского фильтра: а – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса пассивной помехи; б – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса от движущейся цели при полосе пропускания УПЧ $\Delta f = 470$ кГц.

Для принятых исходных данных коэффициент подавления пассивной помехи составляет $K_{\text{п}} = 40$ дБ, а длительность переднего фронта выходного сигнала движущейся цели $t_{\text{ф}} = 5,6$ мкс. При этом ошибка измерения дальности равна $\Delta D = 840$ м.

На рис. 9а и 9б представлены результаты моделирования при полосе пропускания УПЧ $\Delta f = 220$ кГц.

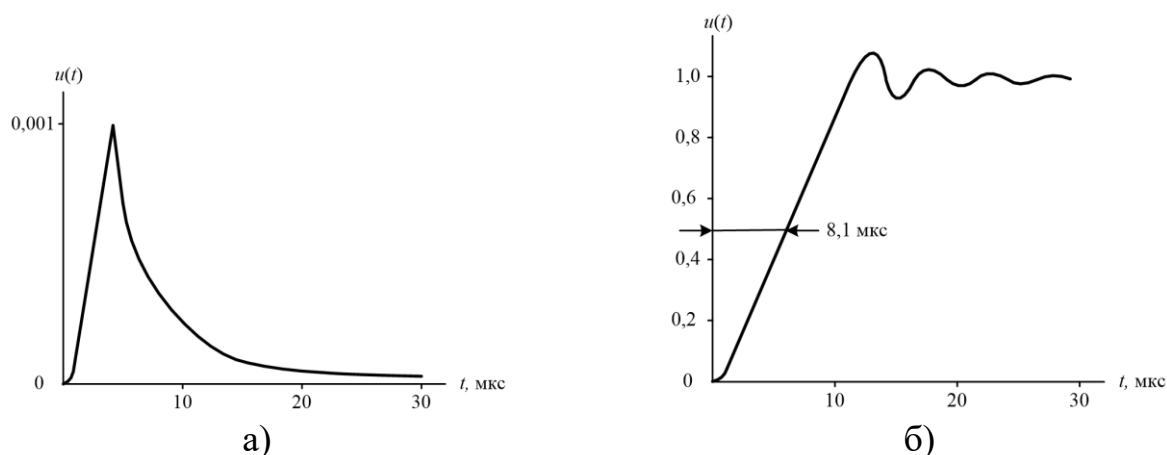


Рис. 9. Огибающая переднего фронта выходного сигнала доплеровского фильтра: а – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса пассивной помехи; б – при подаче на его вход прямоугольного радиоимпульса от движущейся цели при полосе пропускания УПЧ $\Delta f = 220$ кГц

В рассматриваемом варианте коэффициент подавления пассивной помехи составляет $K_{\pi} = 61,9$ дБ при длительности переднего фронта выходного сигнала движущейся цели $t_{\phi} = 8,1$ мкс. В данном случае ошибка измерения дальности равна $\Delta D = 1200$ м.

3. Обсуждение результатов.

Проведенные исследования показали, что использование протяженных зондирующих радиоимпульсов позволяет осуществить в одном радиолокационном периоде эффективную фильтрацию сигналов движущихся целей на фоне интенсивных пассивных помех с одновременным измерением дальности до цели. Для получения коэффициента подавления пассивных помех, например, больше 30 дБ при длительности зондирующего импульса 1 мс необходимо обеспечить смещение нижней граничной частоты доплеровского фильтра относительно средней частоты энергетического спектра пассивной помехи больше 10 кГц. В тоже время при длительности зондирующего импульса 4 мс указанное смещение нижней граничной частоты доплеровского фильтра должно быть больше 2,5 кГц.

При прямоугольной форме огибающей зондирующего радиоимпульса коэффициент подавления пассивной помехи доплеровским фильтром не превышает 13,2 дБ. В случае использования в тракте обработки сигналов усилителя промежуточной частоты с полосой пропускания 1 МГц коэффициент подавления пассивной помехи составляет 20 дБ при ошибке измерения дальности до цели 560 м. Для усилителя промежуточной частоты с полосой пропускания 470 кГц коэффициент подавления пассивной помехи составляет 40 дБ при ошибке измерения дальности до цели 840 м и при полосе пропускания усилителя промежуточной частоты 220 кГц коэффициент подавления пассивной помехи составляет 61,9 дБ при ошибке измерения дальности до цели 1200 м.

Заключение.

Использование в бортовой РЛС с внутренней когерентностью протяженных зондирующих импульсов позволяет за время одного радиолокационного периода решить задачу одновременного подавления мощных пассивных помех и измерения с определенной точностью дальности до обнаруженной движущейся цели. Дополнительное сглаживание фронтов обрабатываемых радиоимпульсов отраженных сигналов относительно узкополосными усилителями промежуточной частоты обеспечивает высокий коэффициент подавления пассивных помех при допустимых ошибках измерения дальности. Рассмотренный в статье материал будет полезен при разработке бортовых систем обнаружения движущихся целей на фоне пассивных помех.

Литература

1. Ботов М.И., Вяхирев В.А., Девогач В.В. *Введение в теорию радиолокационных систем*. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 394 с.
2. Филиппов Б.И. *Радиотехнические системы*. Новосибирск: НГТУ, 2015. 386 с.
3. Казаринов Ю.М., Коломинский Ю.А., Кутузов В.М., Леонтьев В.В. *Радиотехнические системы*. М.: Академия, 2008. 592 с.
4. *Справочник по радиолокации*: в 2 кн. Кн.1/ под ред. М.И. Сколника. М.: Техносфера. 2015. 680 с.
5. Попов Д.И. Адаптация рекурсивных режекторных фильтров. *Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки*. 2022. №4. С. 45-56. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2022-4-5>
6. Котоусов А.С., Морозов А.К. *Оптимальная фильтрация и компенсация помех*. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. 166 с.
7. Зиатдинов С.И. Влияние рассогласования параметров квадратурных каналов на работу адаптивной системы селекции движущихся целей. *Известия вузов. Радиоэлектроника*. 2020. Т. 23. №3. С. 6-8. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-3-25-31>

8. Зиятдинов С.И., Осипов Л.А. Подавление коррелированных помех адаптивными режекторными фильтрами при модуляции периода повторения импульсов. *Информационно-управляющие системы*. 2021. №3. С. 53-60. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-3-53-60>
9. Бакулев П.А. *Радиолокационные системы*. М.: Радиотехника, 2004. 319 с.
10. Баскаков С.И. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: URS, 2016. 915 с.
11. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы*. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
12. Воробьев С.Н. *Цифровая обработка сигналов*. М.: Академия, 2013. 318 с.

Для цитирования:

Зиятдинов С.И., Красильникова О.И. Селекция движущихся целей бортовой РЛС с внутренней когерентностью. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.14>