
**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

УДК 621.396.96

МЕТОД РЕЖЕКЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

© 2019 г. А. В. Новиков¹, *, М. В. Осипов¹

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
Российская Федерация, 634050 Томск, просп. Ленина, 40

*E-mail: anatolii.v.novikov@tusur.ru

Поступила в редакцию 22.09.2017 г.

После доработки 10.01.2018 г.

Принята к публикации 12.01.2018 г.

Предложен метод режекции импульсных помех в радиолокационных станциях с линейной частотной модуляцией, основанный на совместном использовании информации из частотной и временной областей представления сигнала. Метод реализован на двухъядерном процессоре с ARM (Advanced RISC Machine) архитектурой.

DOI: 10.1134/S0033849419040065

В настоящее время широко распространены обзорные малогабаритные радиолокационные станции (РЛС) с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и гомодинной обработкой принятого сигнала [1]. В то же время эксплуатируются мощные импульсные РЛС, которые приводят к зашумлению радиолокационного (РЛ) изображения на индикаторе кругового обзора (ИКО) РЛС с ЛЧМ (рис. 1).

Мешающее влияние импульсных РЛС особенно проявляется в прибрежных акваториях крупных портов, где на подходах скапливаются десятки и сотни кораблей. В связи с этим, проблема режекции импульсных помех в РЛС с ЛЧМ является актуальной.

Процесс гомодинной обработки принятого ЛЧМ-сигнала включает в себя спектральный анализ сигнала биений $v(t)$, который является результатом перемножения сигналов передатчика и приемника и последующей низкочастотной фильтрации [1]. При этом, как известно [2], частота составляющей в спектре $V(\omega)$ сигнала биений $v(t)$ прямо пропорциональна задержке отраженного сигнала относительно момента излучения, которая в свою очередь определяется расстоянием до отражающего объекта. Таким образом, на выходе спектроанализатора формируется сигнал $V(\omega)$, образующий строку дальности (индикатор типа А), элементы которой $V(\omega)$ несут информацию об амплитуде $|V(\omega)|$ отраженного сигнала и дальности r до объекта отражения, где $r = \omega c / 4\pi k$, ω – круговая частота биений (рад/с), c – скорость

света (м/с), k – скорость изменения мгновенной частоты ЛЧМ-сигнала (Гц/с).

При отсутствии перегрузок линейного тракта приемника импульсная помеха $n(t)$ является аддитивной, причем ее длительность много меньше интервала зондирования T_3 РЛС с ЛЧМ, т.е. длительности сигнала биений $v(t)$. В результате при наличии импульсной помехи (как правило, не одной на интервале зондирования T_3), в сигнале $V(\omega)$ появляется аддитивная шумовая составляющая с уровнем N_0 , который зависит от суммарной энергии помехи (рис. 2).

Анализ множества РЛ-данных показал, что скорость нарастания амплитуды помехи $n(t)$ может быть как много больше скорости нарастания амплитуды полезного сигнала, так и сравнима с ней, при этом соотношение амплитуд помехи и полезного сигнала также может быть произвольным (рис. 3а).

Применение к множеству РЛ-данных методов режекции импульсных помех, основанных на анализе статистики скорости нарастания амплитуды сигнала $v(t)$ [3], а также на ограничении этой амплитуды [4, 5], дало неудовлетворительный с точки зрения оператора РЛС результат. В целом, доля строк дальности на ИКО, которые после режекции помехи субъективно остаются «грязными», составляет около 50%.

Известен также аппаратный способ режекции импульсных помех на входе приемника (РЛС “Lowrance”), основанный на детекторе пиковой СВЧ-мощности и коммутируемом аттенюаторе.

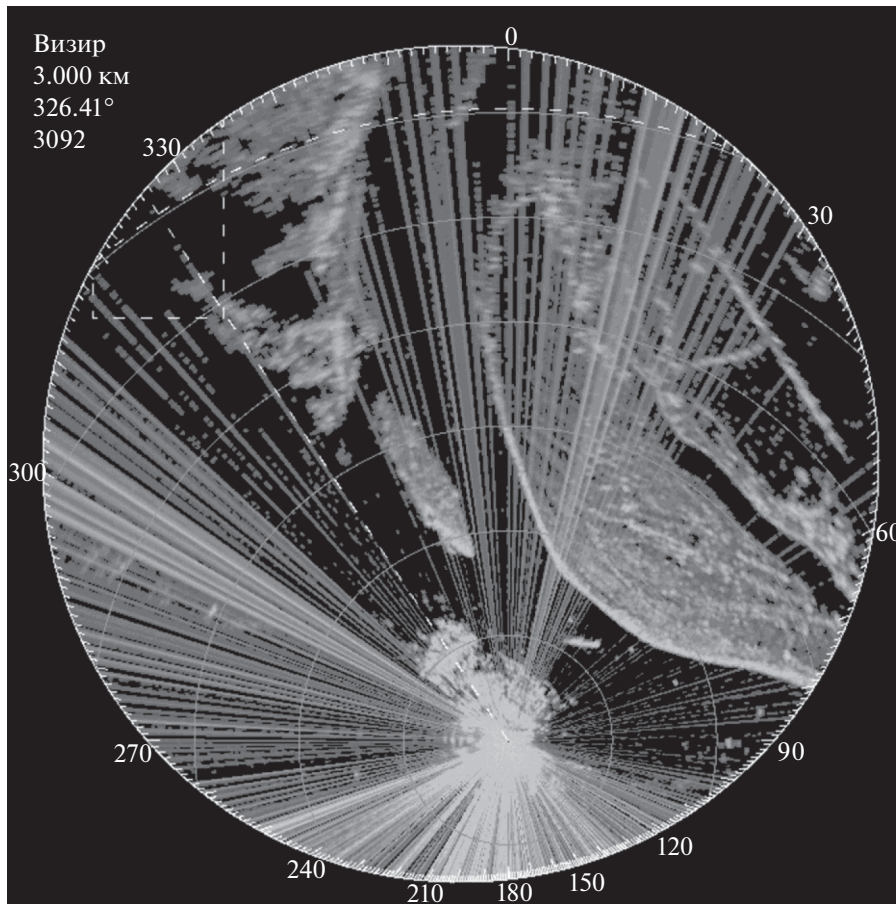


Рис. 1. Импульсные помехи от РЛС “Furuno” на ИКО РЛС “Река” (АО НПФ “Микран”), наблюдаемые в виде множества радиальных линий.

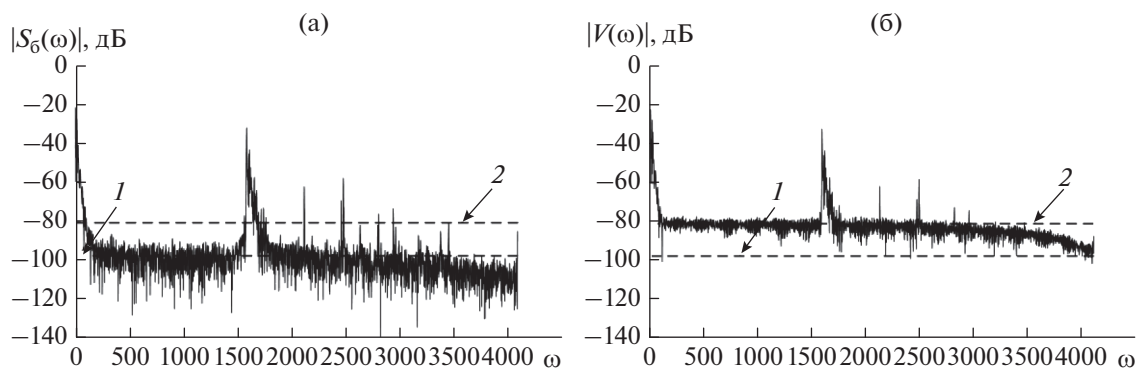


Рис. 2. Зависимость уровня шума в выходном сигнале спектроанализатора от импульсных помех: строка дальности без импульсной помехи (а) и при наличии импульсной помехи (б); 1 – уровень собственных шумов спектроанализатора, 2 – уровень шумов N_0 при наличии импульсной помехи.

Однако он применяется в СВЧ-тракте приемника и может комбинироваться с предлагаемым методом режекции импульсной помехи, работающим на видеочастоте.

Предлагаемый метод основан на совместном использовании временного $v(t)$ и частотного $V(\omega)$

представления выходного сигнала гомодинного приемника и заключается в амплитудной селекции по некоторому порогу в сигнале $V(\omega)$ наиболее мощных составляющих $S_m(\omega)$, восстановления их во временной области в виде сигнала $s_m(t)$, их компенсации в сигнале $v(t)$ путем формирова-

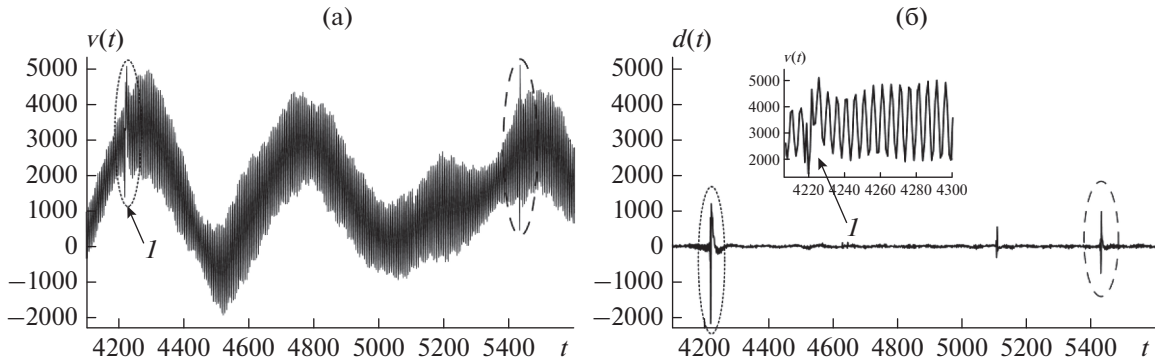


Рис. 3. Импульсная помеха во временной области представления: а – сигнал биений $v(t)$, б – разностный сигнал $d(t)$, I – окрестность импульсной помехи в сигнале $v(t)$.

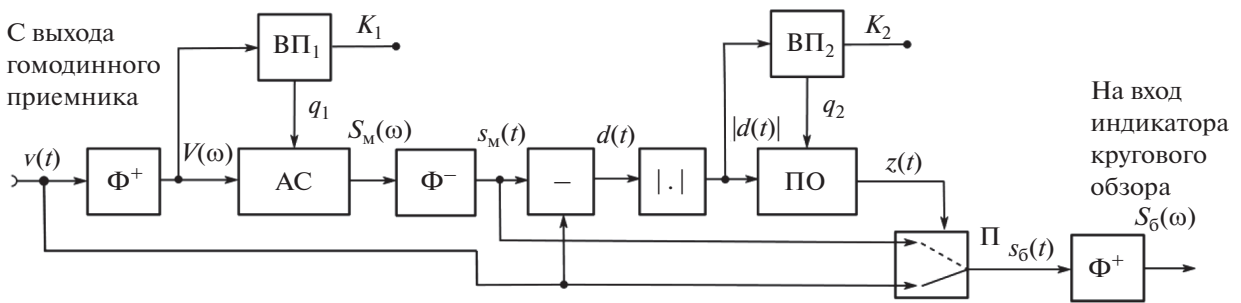


Рис. 4. Блок-схема алгоритма режекции импульсной помехи в РЛС с ЛЧМ: АС – амплитудная селекция, ВП – вычисление порога, ПО – пороговая обработка, П – переключение, Φ – преобразование Фурье.

ния разностного сигнала $d(t) = v(t) - s_M(t)$. При этом сигнал $d(t)$ будет состоять из “слабой” составляющей сигнала биений и сигнала импульсной помехи (рис. 3б). Поскольку мощная составляющая сигнала биений скомпенсирована, сигнал импульсной помехи с высокой вероятностью может быть обнаружен в разностном сигнале $d(t)$ путем его пороговой обработки. При обнаружении помехи ее текущее значение в сигнале $v(t)$ заменяется текущим значением сигнала $s_M(t)$.

Таким образом, алгоритм предлагаемого метода состоит в следующем (рис. 4).

1. Выходной сигнал $v(t)$ гомодинного приемника (сигнал биений) на интервале зондирования T_z подвергается прямому преобразованию Фурье Φ^+ , в результате чего формируется комплексный сигнал $V(\omega)$.

2. Из сигнала $V(\omega)$ путем амплитудной селекции (АС) формируется сигнал $S_M(\omega)$, при этом АС заключается в обнулении в сигнале $V(\omega)$ тех значений, которые по модулю меньше порога q_1 .

3. К сигналу $S_M(\omega)$, практически не содержащему информации о помехе, применяется обратное преобразование Фурье Φ^- , в результате чего

только мощная составляющая $s_M(t)$ сигнала $v(t)$ формируется во временной области.

4. Далее формируется разностный сигнал $d(t) = v(t) - s_M(t)$, содержащий информацию только о “слабой” составляющей полезного сигнала и сравнительно мощной импульсной помехе (например, как на рис. 3б).

5. Из сигнала $d(t)$ путем вычисления модуля $|d(t)|$ и последующей пороговой обработки ПО формируется бинарный управляющий сигнал $z(t)$, при этом в те моменты времени, когда порог q_2 превышен, импульсная помеха присутствует и $z(t) = 1$, в противном случае помеха отсутствует и $z(t) = 0$.

6. Из сигналов $v(t)$ и $s_M(t)$ с помощью управляющего сигнала $z(t)$ и операции переключения П формируется сигнал биений $s_6(t)$, не содержащий сигнала импульсной помехи. При этом при $z(t) = 1$ значения сигнала $s_6(t)$ заменяются значениями сигнала $s_M(t)$, свободного от импульсной помехи, а при $z(t) = 0$ значения сигнала $s_6(t)$ заменяются значениями сигнала $v(t)$, который в этом случае помеху не содержит.

7. Сигнал $s_6(t)$ подвергается прямому преобразованию Фурье Φ^+ , в результате чего формирует-

ся “отрежектированная” строка дальности $S_6(\omega)$ (см. рис. 2а), отображаемая на ИКО РЛС.

Из анализа рис. 3 следует, что компенсация мощной составляющей сигнала биений позволяет повысить вероятность правильного обнаружения импульсной помехи с помощью пороговой обработки. Следует отметить, что те сигналы импульсной помехи, которые окажутся ниже порога и поэтому не будут отрежектированы, относительно малы по уровню и практически не скажутся на качестве РЛ-изображения.

Примеры работы предлагаемого метода режекции импульсной помехи во временной области и на ИКО показаны на рис. 5 и 6 соответственно. Эффективность метода доказывает сравнение рис. 1 и рис. 6.

Оставшиеся радиальные линии в нижней части ИКО на рис. 6 вызваны перегрузкой приемного тракта мощным сигналом, отраженным от крупного близко расположенного здания. В случае перегрузки предлагаемый метод режекции не работает.

Экспериментальное сравнение предлагаемого метода с известными [3–5] показало, что предлагаемый метод отфильтровывает более 95% искаженных помехой дальностных строк. Критерием отфильтрованности строки является субъективная оценка ее информационной значимости, например, при отображении на ИКО. Методы [3–5] отфильтровывают в среднем 50% строк.

В спектральной области режекция импульсной помехи предлагаемым методом может составлять 20 дБ (см. рис. 2).

Алгоритм предлагаемого метода реализован (рис. 4) на чипе типа “система на кристалле” Cyclone V с двумя ARM-ядрами Cortex-A9.

Математическое моделирование показало, что пороги в блоках ВП₁ и ВП₂ (см. рис. 4) предпочтительнее вычислять в виде среднего значения модуля входного сигнала на интервале зондирования T_3 , причем в блоке ВП₁ среднее вычисляется по логарифму модуля входного сигнала. Сигналы K_1 и K_2 блоков ВП₁ и ВП₂ являются множителями для порогов q_1 и q_2 соответственно и предназначены для ручной настройки алгоритма режекции импульсной помехи

$$q_1 = K_1 \exp(h), \quad h = \int_{T_3} \ln |V(\omega)| d\omega,$$

$$q_2 = K_2 \int_{T_3} |d(t)| dt.$$

Для улучшения качества режекции помехи в переключателе П (см. рис. 4) можно задавать интервал времени, в течение которого при обнаружении помехи сигнал $z(t)$ удерживается в единичном состоянии. Этот интервал можно установить исходя из среднестатистической длительности им-

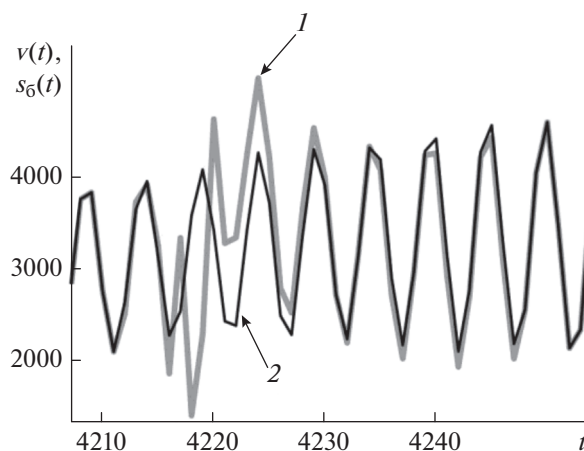


Рис. 5. Режекция импульсной помехи (см. рис. 3 позиция 1) во временной области представления предлагаемым методом: 1 – сигнал биений $v(t)$ при наличии импульсной помехи, 2 – сигнал биений $s_6(t)$ после режекции импульсной помехи.

пульсной помехи. Предлагаемый “трюк” позволяет уменьшить отрицательное влияние “неидеальностей” разностного сигнала $d(t)$ на качество обнаружения помехи за счет устранения возможного “дребезга” управляющего сигнала $z(t)$ в течение действия помехи, в результате чего большая часть помехи во временной области будет отрежектирована. Дополнительно, для улучшения качества режекции можно ввести упреждающую по времени установку сигнала $z(t)$ в единицу. Например, при упреждении 20% и обнаружении помехи в момент времени t_0 устанавливаем $z(t) = 1$ для всех $t_0 - 0.2t_n < t < t_0 + 0.8t_n$.

Следует отметить, что сигнал $v(t)$ перед всякой обработкой необходимо взвешивать оконной функцией (например, окном Блэкмана), применение которой, помимо повышения качества РЛ-изображения, также повышает качество режекции импульсной помехи.

Таким образом, совместное использование информации из частотной и временной областей представления сигнала биений позволяет эффективно режектировать импульсную помеху в выходном сигнале гомодинного приемника РЛС с ЛЧМ. При этом доля радиальных линий на ИКО, которые после режекции субъективно остаются неотфильтрованными, составляет менее 5%.

Предлагаемый метод режекции может быть использован в системах, использующих ЛЧМ-сигналы и их гомодинную обработку.

Также предлагаемый метод не требует особых затрат и может быть реализован на общедоступной элементной базе цифровой схемотехники.

Авторы выражают искреннюю благодарность ведущему научному сотруднику НИИ РТС ТУСУРА

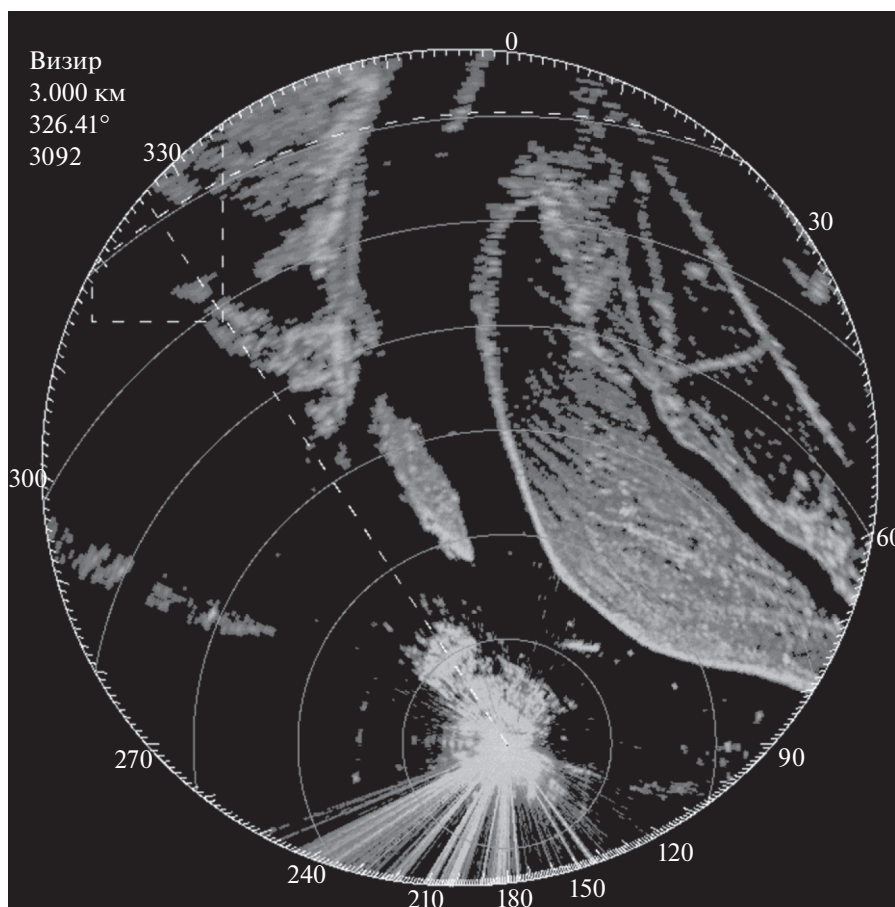


Рис. 6. Режекция импульсных помех на ИКО РЛС “Река” предлагаемым методом (ср. с рис. 1).

В.А. Хлусову за множество полезных рекомендаций и замечаний.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение № 14.577.21.0279 от 26.09.2013, идентификатор RFMEFI57717X0279).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доценко В.В., Осипов М.В., Хлусов В.А. // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2011. № 1. С. 29. <http://old.tusur.ru/filearchive/reports-magazine/2011-23-1/29.pdf>.
2. Бакулев П.А. Радиолокационные системы: Учебник для вузов. М.: Радиотехника, 2004. С. 234.
3. Kelly T.M., Aeder R.G., Woodington W.G. System and Method for Reducing a Radar Interference Signal. Патент US 2006/0125682 A1, Pub. Date: Jun. 15, 2006.
4. Лёзин Ю.С. Введение в теорию и технику радиотехнических систем: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 1986. С. 209.
5. Михеев П.В. Способ защиты от импульсных помех при обнаружении сложных радиолокационных сигналов. Патент на изобретение. РФ № 2308047 С2, Опубл. 10.10.2007.