



УДК 621.396.669.8

**СОГЛАСОВАННЫЙ ФИЛЬТР
С ПОВЫШЕННОЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ
УСТОЙЧИВОСТЬЮ***Кравцов Е. В., Лихоманов М. О.,
Рюмшин Р. И., Дудариков О. Н.*

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил России «Военно-воздушная академия им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Российская Федерация

evgenijkravtsov@mail.rulikhomanovmikhail@mail.runeonspider@mail.rududas@inbox.ru

На примере согласованного фильтра предлагается возможный способ повышения функциональной устойчивости элементов радиоприемного тракта за счет применения процедур безмультипликативной обработки. Данная задача вытекает из необходимости защиты чувствительных к воздействию сверхвысокочастотных помех элементов радиоприемного тракта радиоэлектронных средств, порождаемых приобретающим все большее значение и распространение оружием функционального поражения. Получены амплитудные и статистические характеристики, проведено качественное сравнение предлагаемого фильтра с фильтром на умножении, результаты свидетельствуют о выигрыше в уменьшении уровня выходных сигналов при сохранении того же отношения сигнал/шум на выходе элемента. Применение представленного способа призвано обеспечить элементы приемного тракта внутренне присутствующим свойством функциональной устойчивости, управляемым динамическим диапазоном, сократить время реакции тракта на поражающее воздействие.

Ключевые слова: функциональное поражение, функциональная устойчивость, согласованная фильтрация, безмультипликативная обработка сигналов.

UDC 621.396.669.8

**MATCHED FILTER WITH INCREASED
FUNCTIONAL STABILITY***Kravtsov E. V., Likhomanov M. O.,
Riumshin R. I., Dudarikov O. N.*

MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russian Federation

evgenijkravtsov@mail.rulikhomanovmikhail@mail.runeonspider@mail.rududas@inbox.ru

In the article, the authors, using the example of a matched filter, propose a possible way to increase functional stability of the elements of radio-receiving path through the use of non-multiplicative signal processing procedures. This task stems from the need to protect the elements of radio-receiving path of radio-electronic systems that are sensitive to the effects of microwave radiation, which are generated by functional damage weapons with their increasing importance and distribution. The authors obtained amplitude and statistical characteristics, they carried out a qualitative comparison of the proposed filter with the multiplication filter. The results show the reduced level of output signals with the same signal-to-noise ratio at the element output. The use of the presented method is intended to provide the elements of the receiving path with the inherent characteristic of functional stability, controlled dynamic range, to reduce the time of the path reaction to a damaging effect.

Keywords: functional damage, functional stability, matched filtration, non-multiplicative signal processing.

Введение. Работа радиоэлектронных средств в условиях радиоэлектронной борьбы в настоящее время делает актуальной задачу повышения функциональной устойчивости элементов приемных трактов к воздействию мощных помех и излучений оружия функционального поражения. В ряде случаев это происходит путем нелинейной обработки сигналов в приемном тракте с помощью ограничителей и соответствующих алгоритмов на их основе. Однако применение ограничителей приводит к расширению спектра сигнала, что не всегда приемлемо. Кроме того, могут быть ограничены возможности по месту их установки в тракте, количеству и управлению режимом работы. Цель данной статьи — показать возможность использования безмультипликативной нелинейной обработки сигналов для ослабления мешающих эффектов помех, вызываемых сверхвысокочастотными колебаниями большой амплитуды.

Расширение возможностей нелинейной обработки можно ожидать от применения при обработке сигналов процедуры пересечения \cap , которая имеет вид:

$$z = x \cap y = 0.5 \cdot (|x + y| - |x - y|), \quad (1)$$

где x и y — входные сигналы произвольного вида или их дискретные значения в заданные моменты времени, ограничения на которые не накладываются [1].

Один из входных сигналов может быть опорным в виде компонент импульсной характеристики в случае согласованной фильтрации, коэффициентов круговой свертки при анализе спектра и др. Из выражения (1) следует, что операция пересечения сводится к выделению меньшего по абсолютной величине из входных значений, при этом знак результата определяется произведением знаков входных величин.

В плане повышения функциональной устойчивости практическое значение приобретает именно это свойство выбора меньшего или свойство нелинейности. В то же время операция пересечения ведет себя как линейный управляемый элемент по отношению к меньшему по модулю входному значению, что позволяет при необходимости легко управлять границей нелинейности. В этом случае любое устройство приемного тракта, использующее процедуру (1), приобретает функционально (внутренне) присущее свойство управляемой нелинейности.

Основная часть. Рассмотрим обозначенное положение в приложении к согласованному фильтру (СФ), построенному на процедуре (1). В этом случае задача заключается в вычислении дискретного аналога автокорреляционной функции (АКФ) на процедуре пересечения $R_n(t)$ вида:

$$R_n(t, k) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_2} [s(\tau) \cap k \cdot h(\tau - t)] d\tau \quad (2)$$

где $s(\tau)$ — входной сигнал фильтра,

$h(\tau)$ — импульсная характеристика (ИХ) фильтра, являющаяся зеркальной копией входного сигнала,

k — коэффициент включения ИХ.

При этом возникает необходимость проверки степени адекватности представления АКФ на процедуре пересечения с классическим — на процедуре умножения для различных коэффициентов включения [2]. Кроме того, необходимо получение и исследование амплитудной характеристики СФ на пересечении, как основной характеристики функциональной устойчивости.

Для количественной оценки погрешности представления $\Delta\rho$ АКФ используется соотношение вида:

$$\Delta\rho(R, R_n, k) = \frac{1}{\Delta T} \int_{t_n}^{t_k} |R(t) - R_n(t, k)| dt \quad (3)$$

где $R(t)$ — АКФ на процедуре умножения.

Для исследования СФ используется фазоманипулированный радиоимпульс (ФМИ), полученный на основе 7-элементного кода Баркера с манипуляцией фаз «0», « π », и линейно-частотно-модулированный радиоимпульс (ЛЧМИ) [2].

Результаты обработки ФМИ длительностью 7 мкс с длительностью дискреты 1 мкс и несущей частотой 8 мГц при частоте дискретизации 54 мГц в СФ на процедуре пересечения представлены на рис. 1.

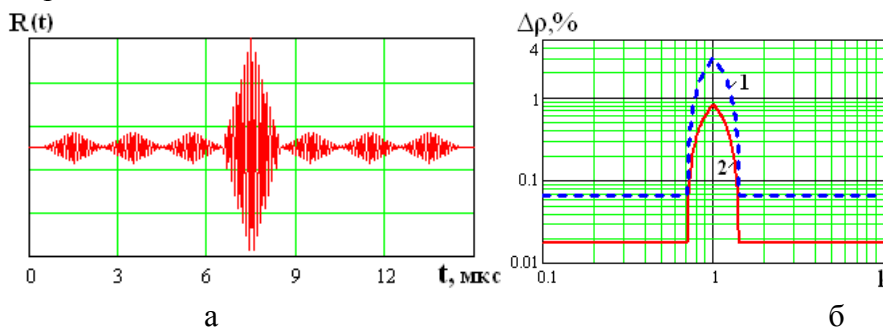


Рис. 1. Обработка фазоманипулированного радиоимпульса

АКФ ФМИ, полученная в соответствии с (2) при $k = 1$, показана на рис. 1, а. Форма АКФ не отличается от полученной на операции умножения.

Погрешность обработки ФМИ СФ на пересечении, по сравнению с обработкой аналогичным фильтром на умножении, рассчитанная в соответствии с (3), представлена на рис. 1, б. Здесь цифрой 1 обозначена зависимость погрешности в пределах основного лепестка АКФ, а цифрой 2 — в пределах длительности всей АКФ. Как следует из графика, максимальная погрешность представления АКФ сосредоточена в узкой области при $k = 1$ и не превышает 3 %, а в широком диапазоне изменений коэффициента включения она не превышает 0,07 %.

Результаты обработки ЛЧМИ длительностью $\sim 2,57$ мкс, с центральной частотой 4,35 мГц и шириной спектра (девиацией частоты) $\sim 3,8$ мГц при частоте дискретизации 96 мГц в СФ на процедуре пересечения представлены на рис. 2.

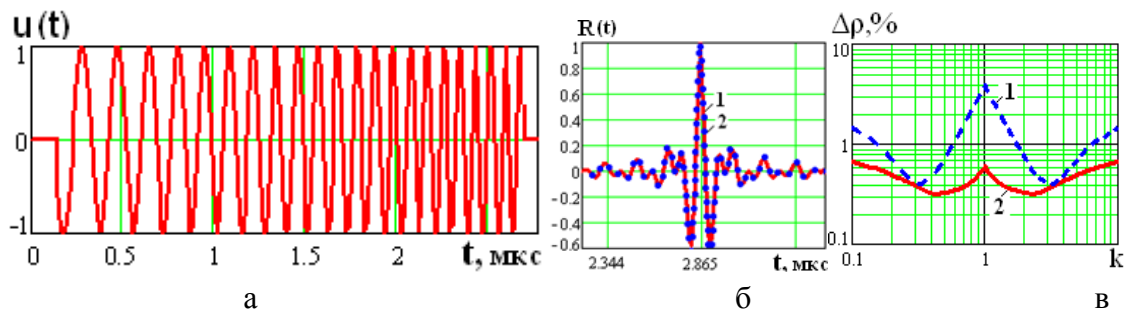


Рис. 2. Обработка линейно-частотно-модулированного радиоимпульса

На рис. 2, а показан обрабатываемый в СФ ЛЧМ сигнал с указанными параметрами. На рис. 2, б приведены нормированные АКФ на выходе СФ: 1 — реализованном на процедуре пересечения; 2 — реализованном на процедуре умножения. Как и в случае с ФМИ, имеет место почти полное совпадение АКФ. Более детально результаты оценки погрешности совпадения АКФ, полученные по (3), иллюстрирует рис. 2, в. Здесь кривая 1 характеризует зависимость погрешности от коэффициента включения ИХ в пределах основного лепестка АКФ, а кривая 2 — в пределах всей длительности АКФ.

Как видно на рисунке, характер зависимостей несколько отличается от аналогичных для ФМИ, имеет место наличие минимумов. Общим является концентрация погрешности в области $k = 1$ и примерно такие же цифровые значения в диапазоне изменения $k \geq 120$ дБ.

Исследование амплитудной характеристики СФ ФМИ проведено для различных коэффициентов включения ИХ. Результаты исследования амплитудной характеристики СФ показаны на рис. 3. Здесь для наглядности представление сделано в логарифмическом (рис. 3, а) и линейном (рис. 3, б) масштабе. Амплитудная характеристика СФ ФМИ на пересечении (1) исследовалась в виде зависимости $R_{\max}/U_{\text{вх}} = f(U_{\text{вх}}/U_{\text{их}})$.

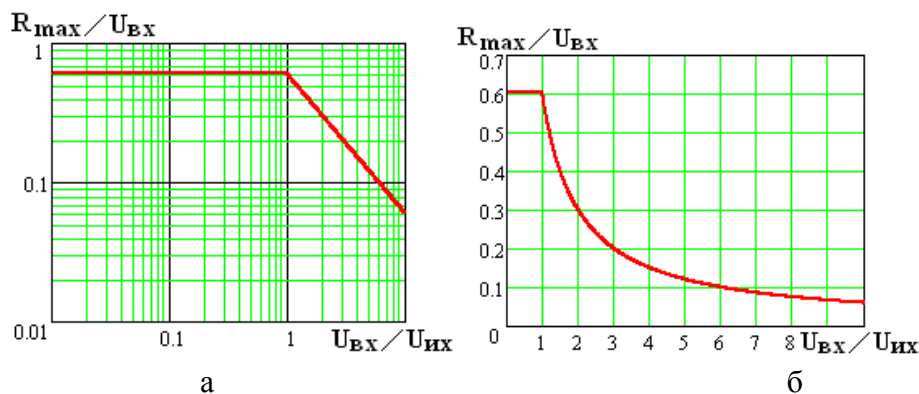


Рис. 3. Амплитудные характеристики СФ ФМИ

Нормировка амплитуды входного напряжения $U_{\text{вх}}$ к амплитуде импульсной характеристики $U_{\text{их}}$ позволяет все многообразие зависимостей для различных коэффициентов включения k представить в одном графике.

Анализ показывает, что график имеет обобщающий характер для согласованных фильтров и позволяет проводить оценку или выбор диапазонов соответствующих участков характеристики, коэффициента включения и амплитуды АКФ при решении задачи управления функциональной устойчивостью тракта обработки сигнала.

При проведении оценок целесообразно наличие аналитического описания обобщенной амплитудной характеристики СФ, которое по результатам аппроксимации для участка $x \geq 1$ может быть представлено следующим соотношением:

$$f(x) \approx 0,875 - 0,354x + 0,052x^2 - 0,0025x^3 \quad (4)$$

где переменная x представляет собой отношение амплитуды входного сигнала к амплитуде импульсной характеристики.

Весьма важным представляется выяснение влияния на статистические параметры СФ на пересечении режимов работы, определяемых коэффициентом включения ИХ. Результаты по выяснению этого влияния после их статистической обработки представлены на рис. 4.

Наиболее наглядно влияние коэффициента включения на свойство функциональной устойчивости СФ на пересечении проявляется по изменению среднеквадратического отклонения (СКО) выходного шума. Зависимости СКО шума на выходе СФ, нормированные к коэффициенту включения, от СКО шума на входе представлены на рис. 4, а в линейном масштабе, а на рис. 4, б — логарифмическом.

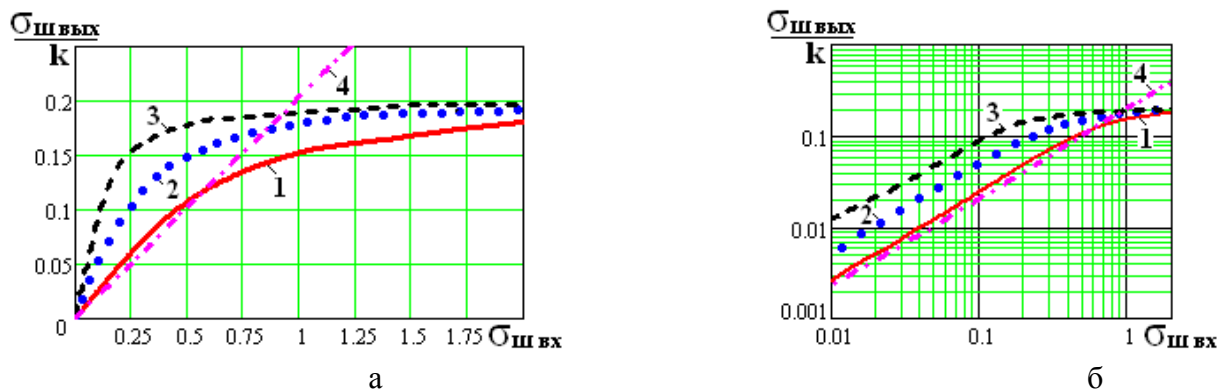


Рис. 4. Зависимости СКО выходного шума

На рис. 4 зависимости 1, 2, 3 характеризуют СФ на пересечении для коэффициентов включения ИХ $k = 1$, $k = 0,5$ и $k = 0,25$ соответственно. Для сравнения на рисунке показана линейно изменяющаяся зависимость выходного СКО шума для СФ на умножении, обозначенная цифрой 4.

Анализ графиков показывает, что коэффициент включения ИХ существенно влияет на уровень выходного шума, особенно при малых значениях входного СКО. Это происходит на плоском участке амплитудной характеристики СФ на пересечении. Чем меньше значение коэффициента включения, тем при меньших значениях СКО входного шума фиксируется постоянный уровень выходного и начинается пологий участок амплитудной характеристики, обеспечивающий реализацию свойства функциональной устойчивости СФ на пересечении. При этом протяженность пологого участка амплитудной характеристики может превышать десятки децибел. Это особенно заметно на рис. 4, а, где кривые представлены в линейном масштабе. В частности, зависимости $\sigma_{ш\text{вых}}/k$, обозначенные цифрами 2 и 3, для коэффициентов включения $k = 0,5$ и $k = 1$ быстро нарастают, затем следует протяженный плоский участок, где выходные значения сигнала и шума фиксированы. Этот плоский участок на логарифмическом масштабе становится пологим рабочим участком для функциональной устойчивости. Что касается кривых на рис. 4, б, то они параллельны характеристике СФ на умножении и характеризуют работу СФ на пересечении в линейном режиме при относительно малых значениях входных сигналов и шумов. Поэтому для анализа здесь более удобен логарифмический масштаб.

Сигналы функционального воздействия на радиоэлектронные средства можно интерпретировать как мощные «шумовые вспышки», или помехи, аддитивно накладываемые на полезные сигналы. В этом случае выделение полезного сигнала фильтром на пересечении при заданном коэффициенте включения ИХ и работе на пологом участке до уровня, достаточного для последующего обнаружения с заданным качеством, определяется входным отношением сигнал/помеха и зависит от базы сигнала. Проиллюстрировано это положение на примере обработки скрытого в помехе сигнала в виде ФМИ на основе семиэлементного кода Баркера длительностью 7 мкс, несущей частотой 8 мГц, длительностью дискретности 1 мкс и амплитудой 30 В.

Помехой является нормально распределенный шум с нулевым средним значением и СКО, равным 50 В, то есть отношение сигнал/помеха на входе составляет 0,6. Входная смесь сигнала $U_c(t)$ и помехи $n(t)$ в вольтах приведена на рис. 5, а.

Обработка смеси проведена в СФ на пересечении с коэффициентом включения ИХ $k = 0,1$ и для сравнения — в СФ на умножении с единичной ИХ. Выходной сигнал СФ на пересечении $R_n(t)$ показан на рис. 5, б. На рис. 5, в показан выходной сигнал СФ на умножении $R(t)$. На рисунках сохранены абсолютные значения амплитуд входных и выходных сигналов. Оба фильтра обеспечивают выделение полезного сигнала из помех. Однако при примерно одинаковых выходных отношениях сигнал/помеха отличие в уровнях выходных сигналов достигает почти 100 децибелл. Причем, на выходе СФ на пересечении этот уровень составляет примерно 0,15 В и не меняется с увеличением амплитуды входного сигнала, что и требуется для обеспечения функциональной устойчивости.

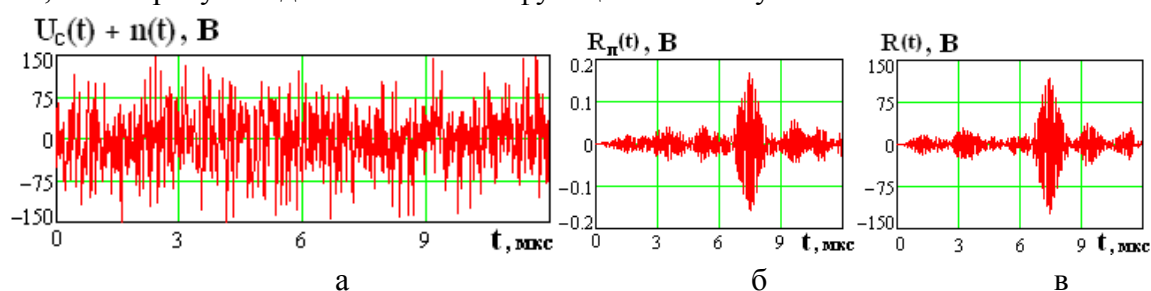


Рис. 5. Входные и выходные сигналы согласованных фильтров

Заключение. На примере проведенного моделирования СФ показана возможность и даже целесообразность использования безмультипликативной нелинейной обработки сигналов для ослабления мешающих эффектов преднамеренных и непреднамеренных помех, вызываемых сверхвысокочастотными колебаниями большой амплитуды с целью повышения электромагнитной совместимости и функциональной устойчивости радиоэлектронных средств.

Применение представленного способа призвано обеспечить элементы приемного тракта внутренне присущим свойством функциональной устойчивости, управляемым динамическим диапазоном, сократить время реакции тракта на поражающее воздействие.

Библиографический список

1. Универсальный многофункциональный структурный элемент систем обработки информации / В. И. Гордиенко [и др.] // Известия вузов. Радиоэлектроника. — 1998. — № 3. — С. 13–17.
2. Радиотехнические цепи и сигналы. Учеб. пособие для вузов / Д. В. Васильев [и др.] ; под ред. К. А. Самойло. — Москва : Радио и связь, 1982. — 528 с.