

С. М. Семченков, Е. А. Печенев

Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А. М. Василевского, Смоленск, Россия

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗА СЧЕТ ИНВЕРСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотрен способ повышения разрешающей способности за счет инверсной фильтрации импульсных сигналов с ограничением спектра зондирующего сигнала снизу. Представлены результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, свидетельствующие о сходимости результатов.

Ключевые слова: инверсная фильтрация, импульсный сигнал, сверхразрешение, простой радиоимпульс.

Для цитирования: Семченков С. М., Печенев Е. А. Способ повышения разрешающей способности за счет инверсной фильтрации импульсных сигналов // Радиопромышленность. 2017. № 3. С. 103–109.

S. M. Semchenkov, E. A. Pechenev

The Military Academy of the Combat Air Defence of the Armed Forces of the Russian Federation named after Marshal of the Soviet Union A. M. Vasilevsky, Smolensk, Russia

METHOD OF INCREASING THE RESOLVING POWER THROUGH INVERSE FILTERING OF PULSE SIGNALS

A method for increasing the resolving power through inverse filtering of impulse signals with a limitation of the spectrum of the probing signal from below is reviewed. The results of mathematical modeling and experimental studies, which testify to the convergence of the results, are presented.

Keywords: inverse filtering, pulse signal, superresolution, simple radio impulse.

For citation: Semchenkov S. M., Pechenev E. A. Method in resolution by the inverse filtration of pulse signals. Radiopromyshlennost, 2017, no. 3, pp. 103–109 (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2017-3-103-109

Повышение разрешающей способности – один из подходов к повышению эффективности использования локатора, что, в свою очередь, достигается обеспечением решения задач радиовидения и распознавания.

Повысить разрешающую способность одновременно по всем координатам не всегда возможно. Для активного импульсного наземного локатора с пассивным ответом, обнаруживающего объекты в воздушном пространстве, следует учесть, что при разрешении воздушных объектов по скорости (частоте Доплера) объекты, имеющие различную скорость, со временем начнут различаться по дальности. При разрешении по угловым координатам –

с увеличением дальности до объектов (т. е. с ухудшением отношения сигнал/шум) – увеличиваются требования к разрешающей способности. Отсюда следует, что для выбранного типа локатора наиболее предпочтительным параметром для повышения разрешающей способности является дальность.

Повысить разрешающую способность по дальности можно различными подходами. Классическим является расширение спектра сигнала. Однако уровень развития СВЧ-устройств не всегда позволяет реализовать это на практике, особенно если энергетический потенциал обеспечивается увеличением длительности импульса, а сверхширокополосность – внутриимпульсной модуляцией.

Известно, что при излучении и приеме протяженного, достаточно широкополосного сигнала структура его внутриимпульсной модуляции искажается. На рис. 1–4 представлены результаты эксперимента по формированию ЛЧМ-импульса. Из рисунков видно, что не столь существенные искажения амплитудно-частотного спектра (рис. 1 и 3) приводят к существенным искажениям сжатого сигнала, показанного на рис. 4. Протяженность сигнала увеличилась в несколько раз, в огибающей возник провал, характерный для ситуации, когда сигнал образован двумя источниками. Результат оптимальной обработки по протяженности оказался сравним с результатом обработки аналогичного по длительности узкополосного сигнала [1].

Вторым подходом к повышению разрешающей способности является применение алгоритмов сверхрэлеевского разрешения [2]. Реализацию данных алгоритмов обеспечивают возможности систем цифровой обработки сигналов, алгоритмов параллельных вычислений и активных цифровых антенных решеток.

Для дальнейшего анализа предлагается различать методы сверхрэлеевского разрешения по двум направлениям. Первое – методы «разрешения-обнаружения», второе – методы «разрешения-измерения» [3].

В основе методов «разрешения-обнаружения» лежит проверка гипотезы о количестве объектов разрешения. Их недостаток – отсутствие измерения координат каждого объекта, достоинство – простота реализации, низкие потребные вычислительные затраты, высокая устойчивость результатов обработки.

Методы «разрешения-измерения» позволяют измерять параметры разрешаемых объектов. К недостаткам таких методов относится необходимость знания априорной информации об условиях измерения и высокие вычислительные затраты.

К особой группе методов повышения разрешающей способности следует отнести инверсную фильтрацию [6]. В импульсной дальнометрии данный метод позволяет определить положение каждого источника с точностью до интервала дискретизации АЦП, не требует высоких вычислительных затрат и прост в реализации. Однако инверсная фильтрация не получила распространение в импульсной дальнометрии. Известно ее применение в подповерхностной радиолокации и задачах повышения контрастности изображений [7]. Причиной отсутствия известных приложений инверсной фильтрации к повышению разрешающей способности РЛС является низкая устойчивость ее результатов обработки к воздействию шума. Это обусловлено тем, что, если частотная характеристика инверсного фильтра $H(\omega)$ принимает нулевые или близкие к нулевым значения, то значения передаточной функции $1/H(\omega)$ будут стремиться к бесконечности. Последнее приводит к бесконечному усилению спектральных составляю-

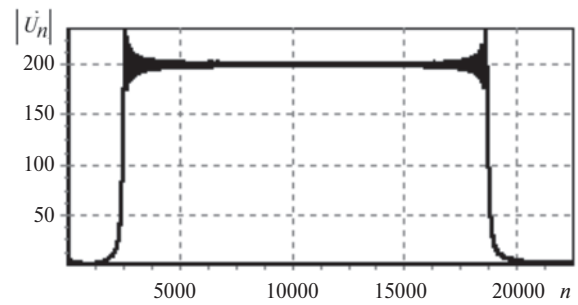


Рисунок 1. Амплитудно-частотный спектр прямоугольного ЛЧМ-импульса

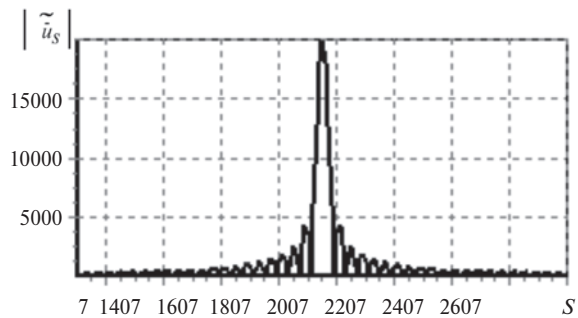


Рисунок 2. Огибающая сжатого ЛЧМ-импульса в районе максимума

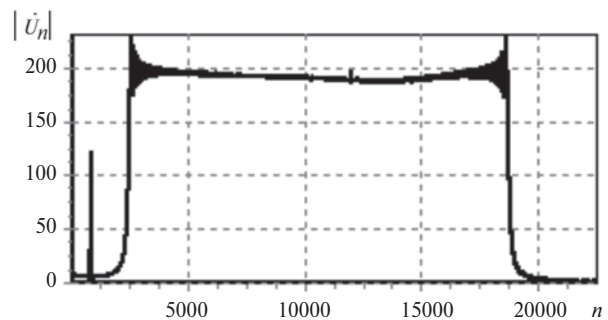


Рисунок 3. Амплитудно-частотный спектр прямоугольного ЛЧМ-импульса, полученного экспериментально

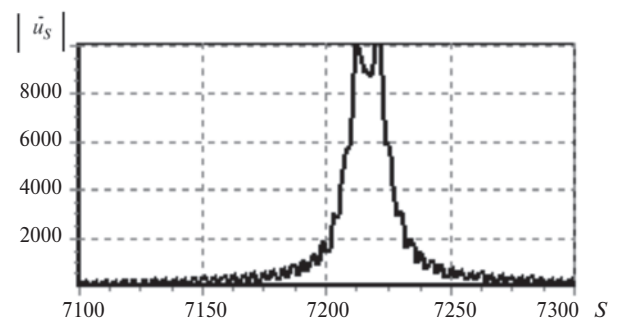


Рисунок 4. Огибающая сжатого ЛЧМ-импульса в районе максимума, полученного экспериментально

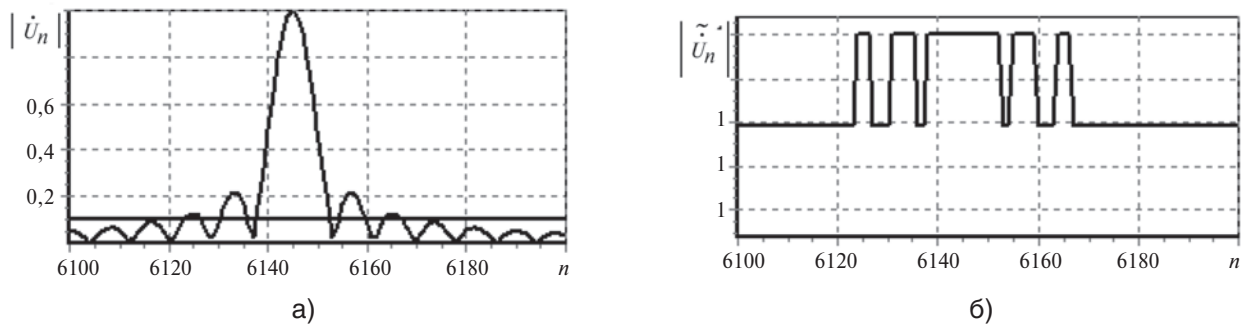


Рисунок 5. АЧС простого радиоимпульса до и после инверсной фильтрации. Уровень ограничения снизу нормированного спектра опорного сигнала – 0,1; а – АЧС простого радиоимпульса до инверсной фильтрации; б – АЧС простого радиоимпульса после инверсной фильтрации

щих шума и, как следствие, к неустойчивости результата обработки.

Проведенный анализ существующих подходов повышения устойчивости результатов обработки методом инверсной фильтрации в задачах повышения контрастности изображений [4, 5, 6] позволяет сделать вывод о том, что для практической реализации в импульсной дальнометрии наиболее подходящим является способ, основанный на ограничении спектра зондирующего сигнала снизу.

На рис. 5 представлены результаты, поясняющие суть ограничения снизу спектра сигнала. На рис. 5а показана огибающая спектра ожидаемого сигнала типа «простой радиоимпульс», из которого в дальнейшем формируется передаточная функция инверсного фильтра $1/H(\omega)$. Горизонтальной линией отмечен уровень ограничения. В процессе инверсной фильтрации участвует та часть спектра, находящаяся выше уровня, который в данном случае составляет 0,1 от максимума. На рис. 5б показана огибающая спектра сигнала с выхода инверсного фильтра после такой обработки. Составляющие спектра, находящиеся ниже уровня ограничения, равны нулю.

Для описания предлагаемого процесса обработки рассмотрим обработку M импульсов в дискретном виде. Комплексная амплитуда спектральной составляющей с номером n сигнала рассеянного M объектами описывается выражением

$$\begin{aligned} \dot{U}_n = \exp\left[j\frac{\pi}{N}(S-1)(X-n)\right] \times \\ \times F_n(X) \sum_{m=1}^M \left(\tilde{a}_m \exp\left[-j\frac{2\pi}{N}n_m n\right] \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где S – число отсчетов в импульсе; f_0 – частота; ΔT – интервал дискретизации;

$$f_0 \Delta T = X / N;$$

$$\tilde{a}_m = \dot{a}_m \exp[-j2\pi f_0 t_{3m}] \exp\left[j\frac{2\pi}{N}Xn_m\right].$$

Выражение для обратного дискретного преобразования Фурье над ограниченным инверсным спектром примет вид

$$\begin{aligned} \tilde{u}_s \sum_{l=1}^L \sum_{n=n_l}^{n_l+k_l} \left(\tilde{U}_n \exp\left[j\frac{2\pi}{N}ns\right] \right), \\ 0 \leq s < N, \end{aligned} \quad (2)$$

где L – количество лепестков спектра, превышающих порог; l – номер текущего лепестка спектра, превысившего порог; n_l – начальный номер спектральной составляющей l -го лепестка спектра, превысившей порог; k_l – количество спектральных составляющих l -го лепестка спектра, превысивших порог.

Работоспособность данного способа была проверена на экспериментальной установке (структурная схема представлена на рис. 6) на сигнале типа «простой радиоимпульс» с несущей частотой 41 кГц, длительностью импульсов 10 мс, периодом повторения 500 мс.

Экспериментальная установка включала в себя аналоговую и цифровую части. Аналоговая часть состоит из генератора простого радиоимпульса SIGLENT SDG-1010, источника питания BK Precision 1670A, ультразвукового передатчика MA40S4S (УЗП), ультразвукового приемника MA40S4T (УЗПр) и инструментального усилителя AD622AR. Цифровая часть установки состоит из АЦП ЛА-1,5РС1 и ПЭВМ типа Pentium Dual-Core CPU E5700 3,00 GHz.

Внешний вид экспериментальной установки для проведения физического эксперимента представлен на рис. 7.

На рис. 8, 9 представлены результаты, полученные на экспериментальной установке в ситуации, когда входной сигнал был образован тремя импульсами, сдвинутыми друг относительно друга на 0,1 от длительности импульса при отношении сигнал/шум 18 дБ с ограничением спектра сигнала (рис. 8) и без ограничения спектра сигнала (рис. 9). Из рис. 8 видно, что число импульсов определяется правильно.

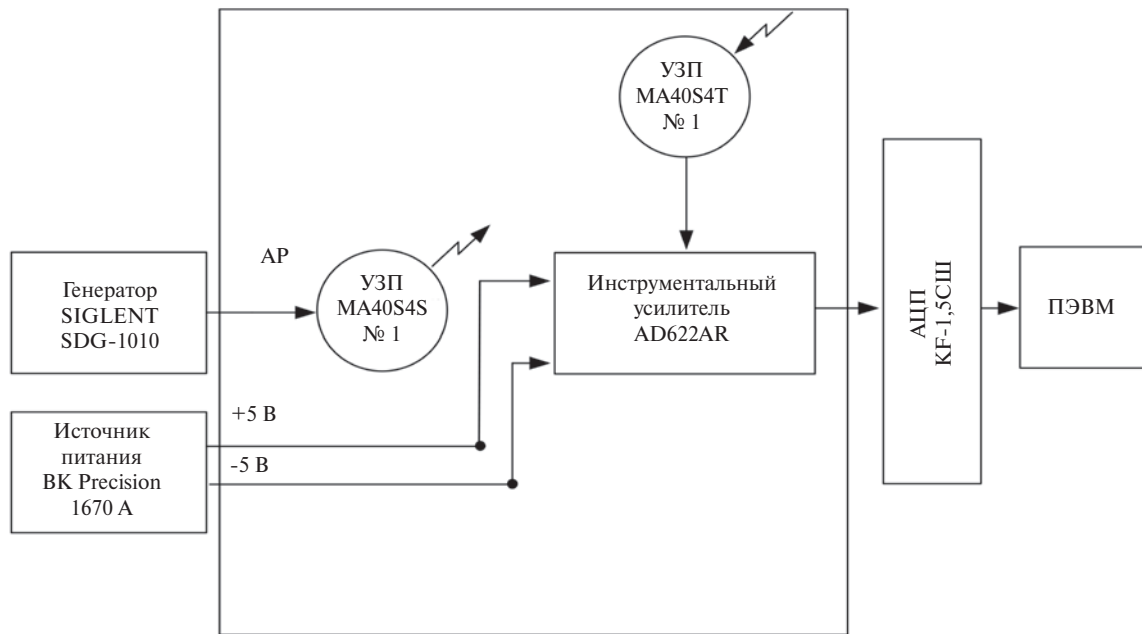
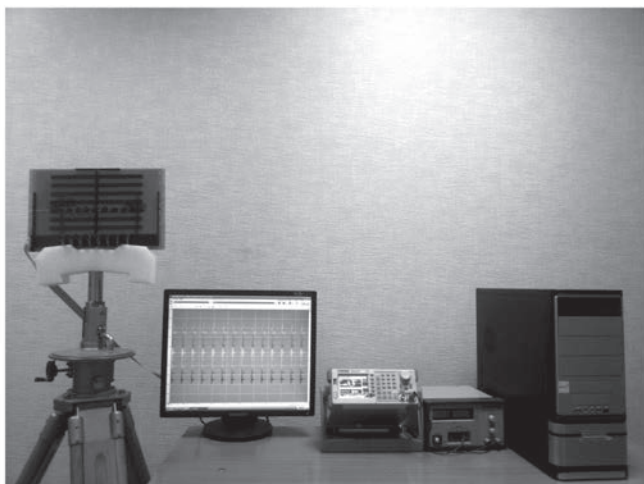
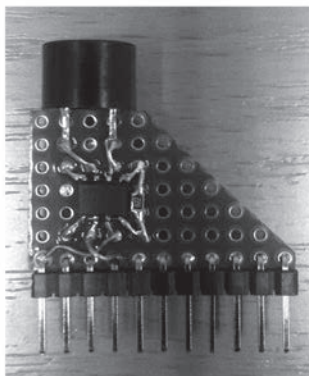


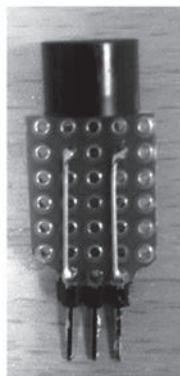
Рисунок 6. Структурная схема экспериментальной установки



а)



б)



в)

Рисунок 7. Внешний вид экспериментальной установки для проведения физического эксперимента: а – общий вид; б – ультразвуковой приемный модуль (УЗПр и инструментальный усилитель); в – ультразвуковой передатчик

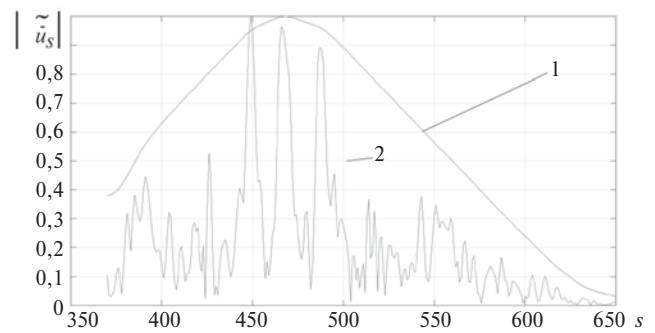


Рисунок 8. Огибающая сигнала трех простых радиоимпульсов, сдвинутых друг относительно друга на 100 дискретных отсчетов, уровень ограничения – 0,1; 1 – результат обработки сигналов оптимальным фильтром; 2 – результат обработки сигналов инверсным фильтром; ОСШ – 18 дБ

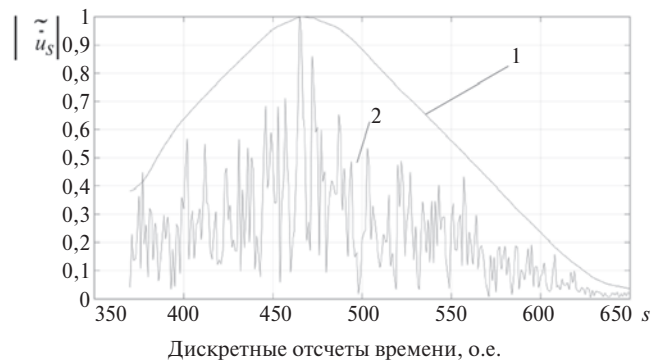


Рисунок 9. Огибающая сигнала трех простых радиоимпульсов, сдвинутых друг относительно друга на 100 дискретных отсчетов, без ограничения; 1 – результат обработки сигналов оптимальным фильтром; 2 – результат обработки сигналов инверсным фильтром; ОСШ – 18 дБ

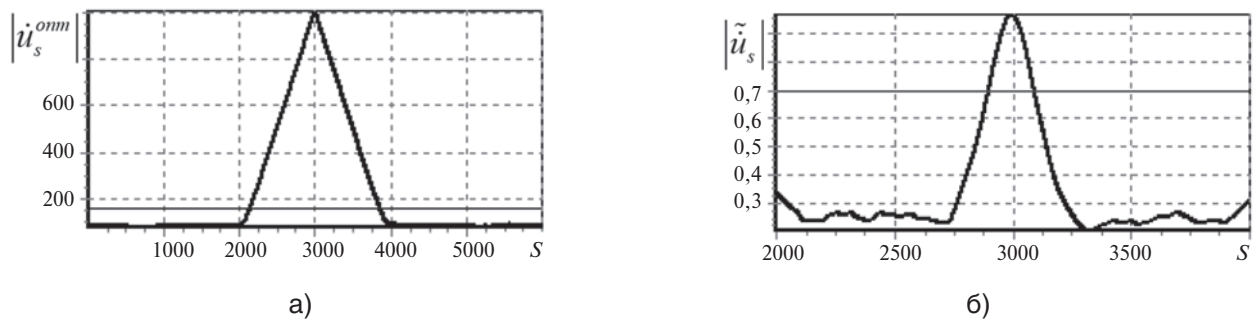


Рисунок 10. Огибающая сигнала одиночного простого радиоимпульса на выходе оптимального и инверсного фильтров, ОСШ – 23 дБ; а – огибающая простого радиоимпульса на выходе оптимального фильтра; б – огибающая простого радиоимпульса на выходе инверсного фильтра

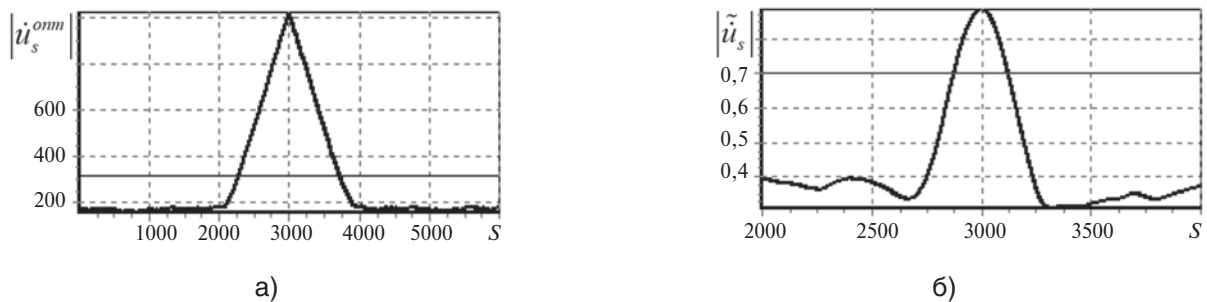


Рисунок 11. Огибающая сигнала одиночного простого радиоимпульса на выходе оптимального и инверсного фильтров, ОСШ – 18 дБ; а – огибающая простого радиоимпульса на выходе оптимального фильтра; б – огибающая простого радиоимпульса на выходе инверсного фильтра

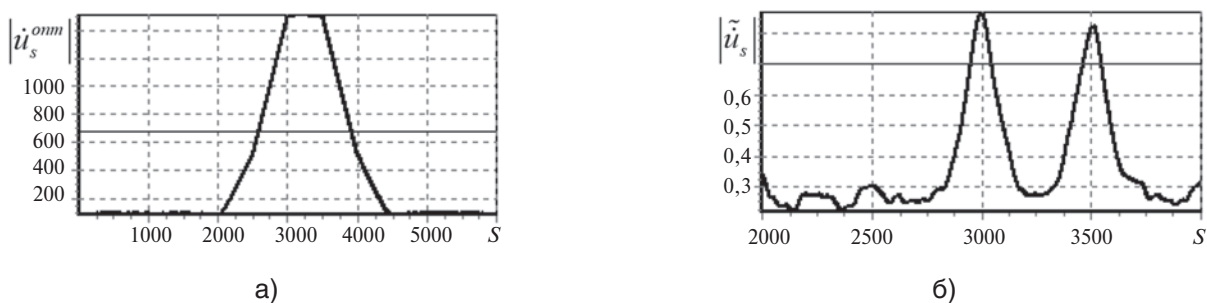


Рисунок 12. Огибающая сигнала двух простых радиоимпульсов, сдвинутых друг относительно друга на 500 дискретных отсчетов на выходе оптимального и инверсного фильтров, ОСШ – 23 дБ; а – огибающая простого радиоимпульса на выходе оптимального фильтра; б – огибающая простого радиоимпульса на выходе инверсного фильтра

На рис. 10–14 представлены результаты, полученные математическим моделированием обработки сигналов способом инверсной фильтрации с ограничением спектра сигнала снизу.

Из рис. 14 видно, что результаты математического моделирования и экспериментальных исследований имеют высокую степень сходимости.

Анализ результатов статистической обработки результатов моделирования способа обработки сигналов

инверсной фильтрацией с ограничением спектра сигнала снизу [8] позволяет сделать вывод о том, что способ ограничения спектра зондирующего сигнала снизу позволяет повысить разрешающую способность при отношении сигнал/шум от 18 дБ. Это позволяет рассматривать метод инверсной фильтрации в целом и способ инверсной фильтрации с ограничением спектра сигнала снизу как подход к повышению разрешающей способности по дальности в импульсном дальнометре.

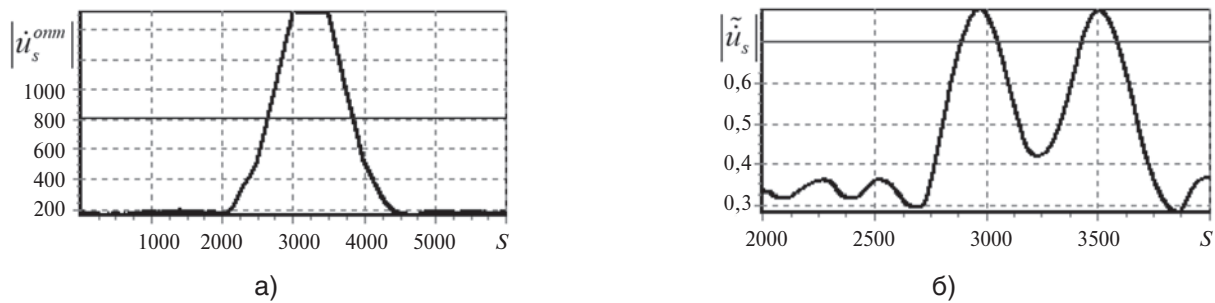


Рисунок 13. Огибающая сигнала двух простых радиоимпульсов, сдвинутых друг относительно друга на 500 дискретных отсчетов на выходе оптимального и инверсного фильтров, ОСШ – 18 дБ; а – огибающая простого радиоимпульса на выходе оптимального фильтра; б – огибающая простого радиоимпульса на выходе инверсного фильтра

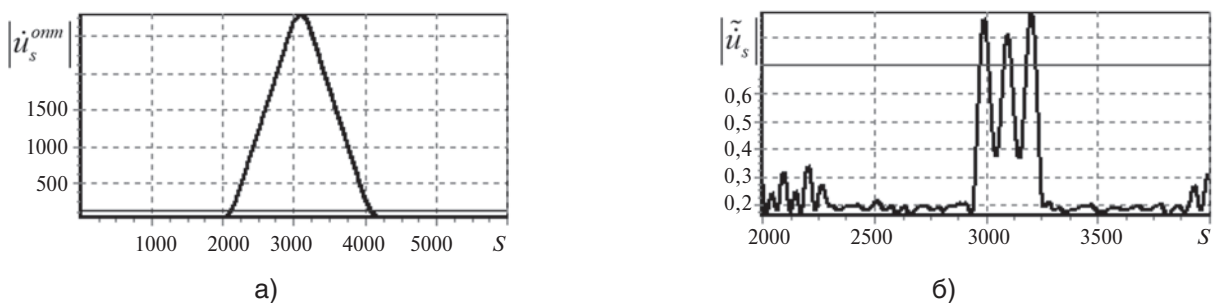


Рисунок 14. Огибающая сигнала двух простых радиоимпульсов, сдвинутых друг относительно друга на 100 дискретных отсчетов на выходе оптимального и инверсного фильтров, ОСШ – 30 дБ; а – огибающая простого радиоимпульса на выходе оптимального фильтра; б – огибающая простого радиоимпульса на выходе инверсного фильтра

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абраменков В. В., Семченков С. М. Способ коррекции искажений спектра широкополосного сигнала в режиме приема и обработки. Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2015. 6 с.
2. Разрешение и распознавание радиолокационных объектов / В. В. Абраменков, С. А. Климов, Л. А. Бондарев, В. А. Юдин. М.: УлГТУ, 2012. 195 с.
3. Акимцев В. В. Алгоритм разрешения неизвестного числа целей по дальности. СПб.: СПВВУРЭ (ВИ), 2013. 8 с.
4. Майорова В. И., Банников А. М., Зайцев К. И. Математическое моделирование процесса радиометрической коррекции снимков дистанционного зондирования Земли. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. 20 с.
5. Грузман И. С. Цифровая обработка изображений в информационных системах. М.: Изд-во НГТУ, 2002. 395 с.
6. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов. О редукации к идеальному прибору в физике и технике. М.: Советское радио, 1979. 271 с.
7. Зражевский А. Ю., Кокошкин А. В., Коротков В. А. Особенности применения инверсной фильтрации для восстановления изображений с учетом квантования яркости при записи в BMP файл. Москва. ИПЭ им. В. А. Котельникова РАН, 2013. 6 с.
8. Абраменков В. В., Абраменков А. В., Семченков С. М. Обработка радиосигнала методами инверсной фильтрации. Воронеж: ООО НПФ «САКВОЕЕ», 2015. 9 с.

REFERENCES

1. Abramnikov V. V., Semchenkov S. M. *Sposob korrekcii iskazhenij spektra shirokopolosnogo signala v rezhime priema i obrabotki* [A method for correction distortions in the spectrum of a wireband signal in the reception and processing mode]. Smolensk: VA VPVO VS RF, 2015, 6 p. (In Russian).
2. Abramnikov V. V., Klimov S. A., Bondarev L. A., Yudin V. A. *Razreshenie i raspoznavanie radiolokacionnykh ob'ektov* [Resolution and recognition of radar objects]. Moscow, ULGTU, 2012. 195 p. (In Russian).
3. Akimtsev V. V. *Algoritm razresheniya neizvestnogo chisla celej po dal'nosti* [Algorithm for resolution an unknown number of targets by range]. Saint-Petersburg, SPVVURE, 2013, 8 p. (In Russian).

4. Mayorova V. I., Bannikov A. M., Zaitsev K. I. *Matematicheskoe modelirovanie processa radiometricheskoy korrekcii snimkov distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Mathematical modeling of the process of radiometric correction of Earth remote sensing images] Moscow, BMSTU, 2013, 20 p. (In Russian).
5. Gruzman I. S. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v informacionnyh sistemah* [Digital image processing in radar systems]. Moscow, NSTU, 2002, 395 p. (In Russian).
6. Vasilenko G. I. *Teorija vosstanovlenija signalov. O redukcii k ideal'nomu priboru v fizike i tehnike* [Signal recovery theory. On reduction to an ideal device in physics and engineering. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979, 271 p. (In Russian).
7. Zrazhevskiy A. U., Kokoshkin A. V., Korotkov V. A. *Osobennosti primeneniya inverсноj fil'tracii dlja vosstanovlenija izobrazhenij s uchetom kvantovaniya jarkosti pri zapisi v BMP fajl* [Especially the use of inverse filtering to restore images, taking into account the quantization of brightness when writing to a BMP-file]. Moscow. IRE im. V. A. Kotelnikova, 2013, 6 p. (In Russian).
8. Abramnikov V. V., Abramnikov A. V., Semchenkov S. M. *Obrabotka radiosignala metodami inverсноj fil'tracii* [Radio signal processing by inverse filtering methods]. Voronezh, ООО HPF «SAKVOEE», 2015, 9 p. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Семченков Сергей Михайлович, к. т. н., начальник отдела, Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А. М. Василевского (ВА ВПВО ВС РФ), 214027, Смоленск, ул. Котовского, д. 2, тел.: 8 (920) 312-17-57, e-mail: ssm010283@gmail.com.

Печенев Евгений Александрович, адъюнкт очной штатной адъюнктуры, Военная академия войсковой противовоздушной обороны Вооруженных Сил Российской Федерации имени Маршала Советского Союза А. М. Василевского (ВА ВПВО ВС РФ), 214027, Смоленск, ул. Котовского, д. 2, тел.: 8 (915) 633-27-55, e-mail: pecheneff.evgeny@yandex.ru.

AUTHORS

Semchenkov Sergey, PhD, head of department, The Military Academy of the Combat Air Defence of the Armed Forces of the Russian Federation named after Marshal of the Soviet Union A. M. Vasilevsky (VA VPVO), 2, ulitsa Kotovskogo, Smolensk, 214027, Russian Federation, tel.: +7 (920) 312-17-57, e-mail: ssm010283@gmail.com.

Pechenev Evgeniy, postgraduate student, The Military Academy of the Combat Air Defence of the Armed Forces of the Russian Federation named after Marshal of the Soviet Union A. M. Vasilevsky (VA VPVO), 2, ulitsa Kotovskogo, Smolensk, 214027, Russian Federation, tel.: +7 (915) 633-27-55, e-mail: pecheneff.evgeny@yandex.ru.