

НОВЫЕ МЕТОДЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ СЕМЕЙСТВОМ АТОМАРНЫХ ФУНКЦИЙ

В. Ф. Кравченко, Д. В. Чуриков

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова, Российская Академия наук

В работе рассмотрены комбинированные методы корреляционной обработки радиолокационных сигналов (РС), основанные на теории атомарных и WA-системах функций. Предложены алгоритмы их оптимальной обработки. Введены новые конструкции весовых функций (ВФ) Кравченко-Лапласа-Чемпернауна и модифицированного логистического распределения. Построен функционал качества, позволяющий оценить точность и эффективность обработки РС для конкретных физических моделей. Показано, что предложенный подход существенно улучшает качество когерентного анализа РС.

Введение

Известно [1,2], что в радиолокационных системах и устройствах для оптимальной обработки сигналов используются додетекторная и последдетекторная фильтрация. Додетекторная фильтрация использует когерентную пару сигналов: опорного и входного. Такое устройство когерентной фильтрации (КФ) выполняет следующую операцию:

$$|Y(\tau, p)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_x(t) S_0^*(t - \tau) \exp(-jpt) dt \right|, \quad (1)$$

где $S_x(t)$ и $S_0(t)$ – комплексные огибающие входного колебания и опорного сигнала соответственно, τ – время запаздывания сигнала относительно момента зондирования, p – доплеровский сдвиг частоты сигнала относительно нулевой доплеровской частоты. Если у принятого и опорного сигналов частоты совпадают, то

$$|Y(\tau)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} S_x(t) S_0^*(t - \tau) dt \right|. \quad (2)$$

Постановка задачи и метод решения

Большая помехозащищенность радиолокационных устройств может быть достигнута использованием сложных зондирующих сигналов [1]. Кроме того, это позволяет уменьшить энергопотребление аппаратуры по сравнению с применением частотно-модулированных видеоимпульсов. Однако при КФ возникают интерференционные эффекты и искажения результатов обработки. Это явление можно устранить путем введения в корреляционный интеграл весовой функции (ВФ) $w(t)$. Тогда используется выражение следующего вида:

$$|Y(\tau, p)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} w(t) S_x(t) S_0^*(t - \tau) \exp(-jpt) dt \right|, \quad (3)$$

где ВФ $w(t)$ отвечает за пространственную фильтрацию и время-частотное разрешение преобразования.

Используем в данном случае, построенные на основе АФ [2-8] в сочетании с вероятностными распределениями [9], следующий класс весовых функций:

- Кравченко-Коши $w_1(t) = \frac{g}{c\pi(g^2 + t^2)} h_a\left(\frac{t}{b}\right),$ (4)

- Кравченко-Лапласа $w_2(t) = \frac{2}{2} \lambda \exp(-\lambda|t|) h_a\left(\frac{t}{b}\right),$ (5)

- модифицированное логистическое распределение $w_3(t) = \frac{1}{4\lambda \operatorname{ch}\left[\left(\frac{t}{2\lambda}\right)^2\right]} h_a\left(\frac{t}{b}\right),$ (6)

- Кравченко-Чемпернауна $w_4(t) = \frac{\alpha}{\pi \operatorname{ch}(\alpha t)} h_a\left(\frac{t}{b}\right).$ (7)

В (4)-(7) g, b, λ, α – параметры масштаба. Поведение ВФ, функций неопределенности (ФН) $\left(\chi(x, p) \equiv Y(x, p)\big|_{S_1(t)=S_0(t)}\right)$ и линий уровней ФН представлены на рис. 1-4.

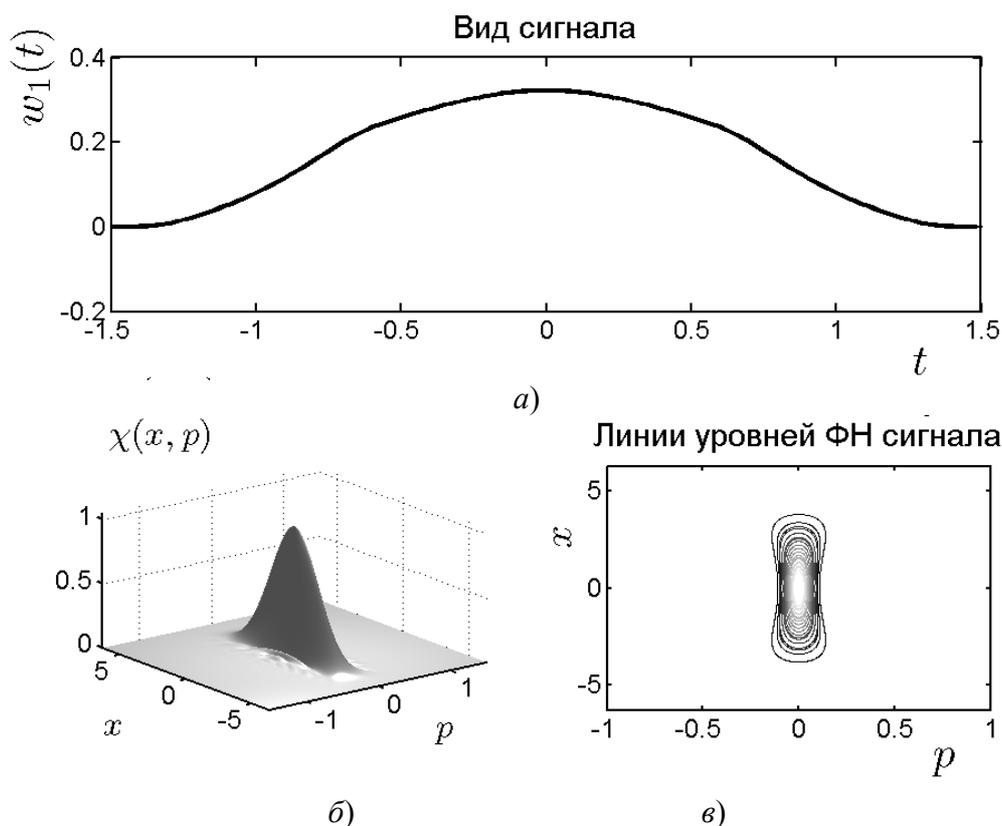


Рис. 1. Поведение $w_1(t)$ (а), функции неопределенности (б), линии уровней (в) ($a = 3, b = 3, g = 1$)

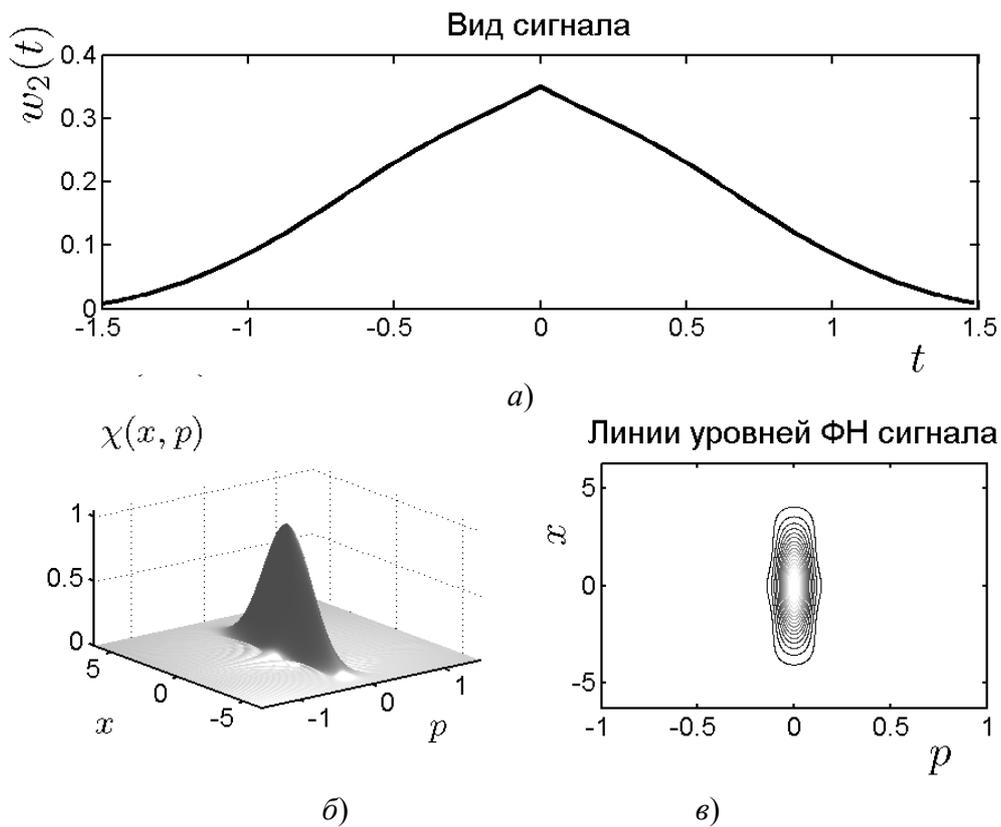


Рис. 2. Поведение $w_2(t)$ (а), функции неопределенности (б), линий уровней (в) ($a = 2, b = 2, \lambda = 0,7$)

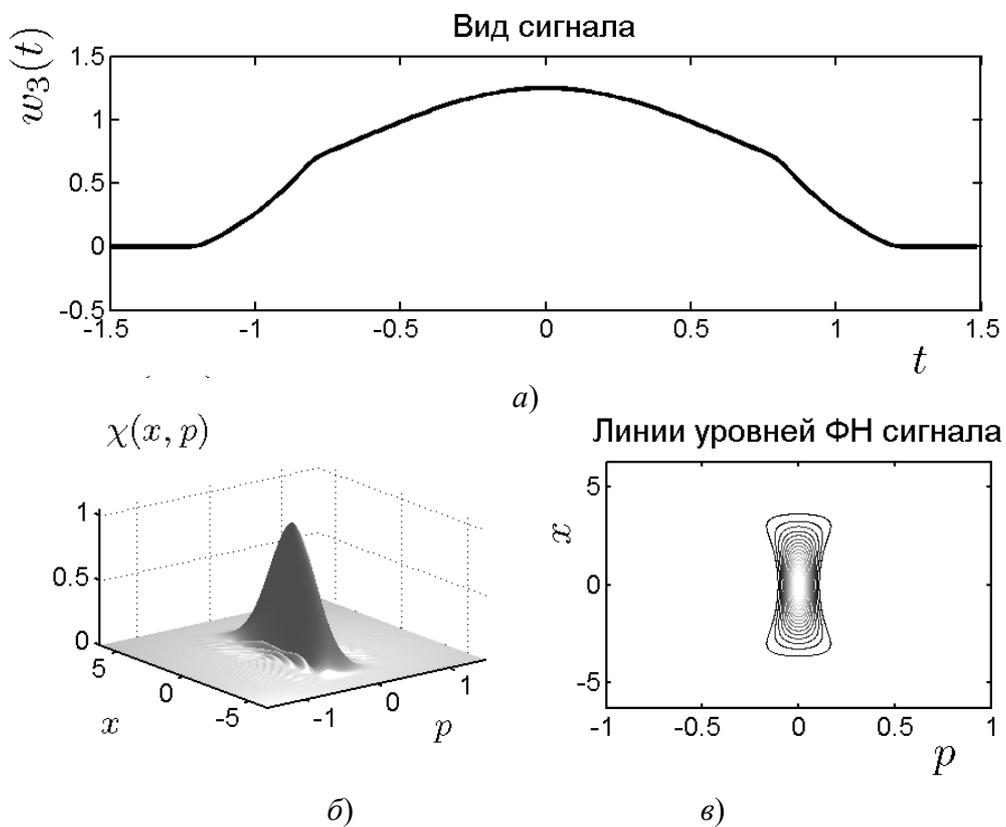


Рис. 3. Поведение $w_3(t)$ (а), функции неопределенности (б), линий уровней (в) ($a = 5, b = 5, \lambda = 0,5$)

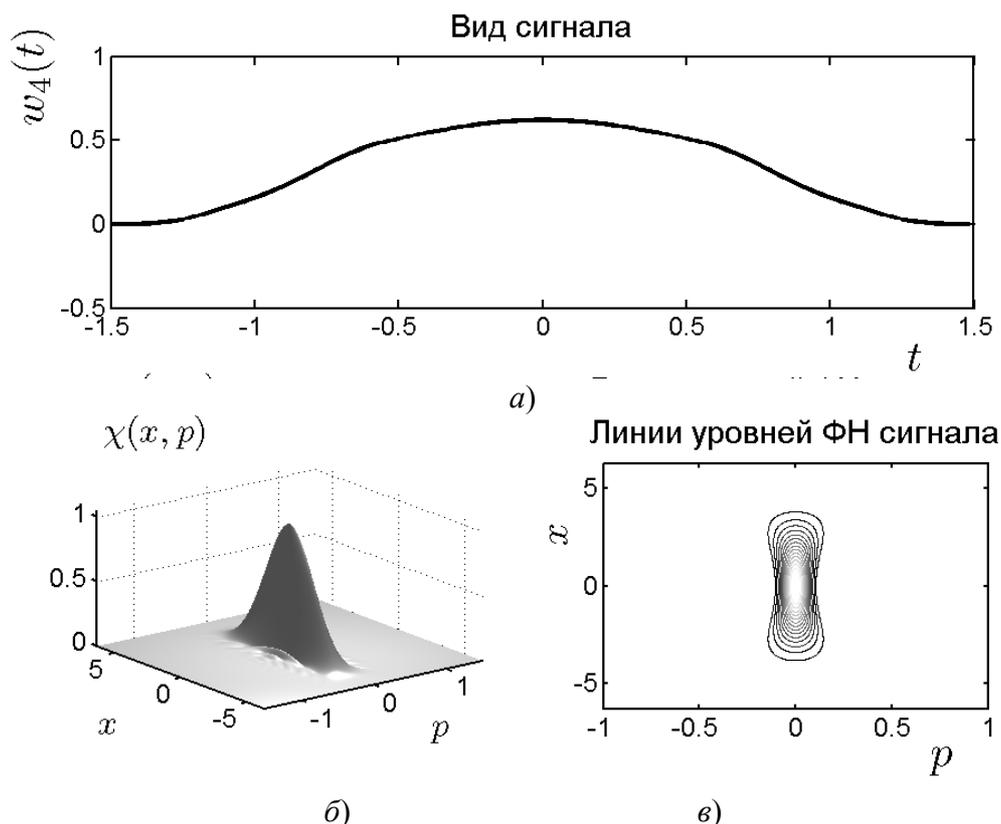


Рис. 4. Поведение $w_4(t)$ (а), функции неопределенности (б), линий уровней (в) ($a = 3, b = 3, \alpha = 1,3$)

Структурная схема модифицированного алгоритма дискретной когерентной фильтрации радиолокационного сигнала приведена на рис. 5.

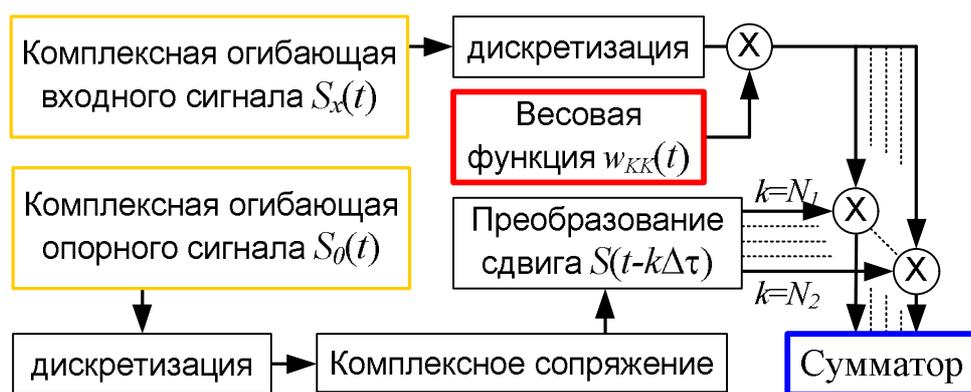


Рис. 5. Структурная схема модифицированного алгоритма дискретной когерентной фильтрации радиолокационного сигнала

Блок-схема алгоритма определения доплеровской частоты с уточнением приведена на рис. 6. Здесь происходит корреляционная обработка входного и опорного сигналов. Далее определяются частотные каналы с максимальным и следующим за ним значением сигнала. Комплексная огибающая проходит через систему фильтров. На заключительном этапе вычисляется величина доплеровского сдвига (относительно опорного сигнала) и уточнение по формуле

$$p_{\dot{\omega}} = \frac{|Y(p)|_{\max} - |Y(p)|_{\max-1}}{|Y(p)|_{\max} + |Y(p)|_{\max-1}}, \quad (8)$$

а уточненное значение доплеровского сдвига так

$$p_{\dot{\omega}} = (p_{\max} - p_{\max 0}) + p_{\dot{\omega}}, \quad (9)$$

где $p_{\max 0}$ – положение максимума автокорреляционной функции опорного сигнала.

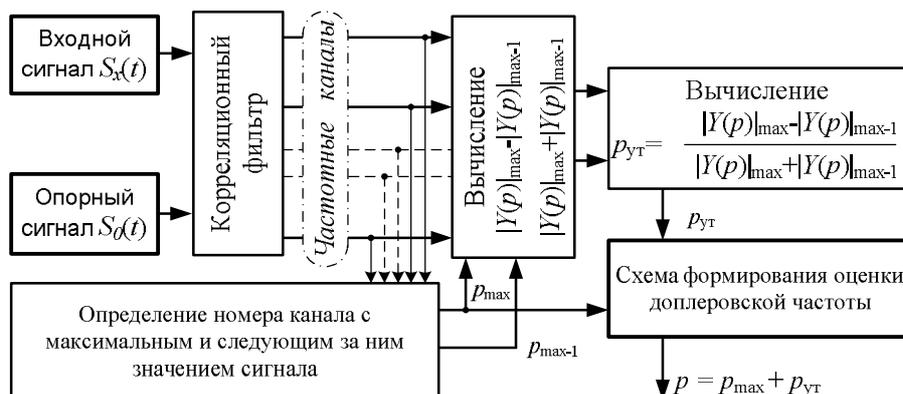


Рис. 6. Блок-схема определения доплеровской частоты с оценкой

Применение ВФ позволяет снизить уровень боковых лепестков (УБЛ), расположенных вблизи главного максимума. Поэтому при наложении нескольких сигналов наблюдается улучшение разрешения их максимумов. При этом ограничением является уширение главного лепестка. Согласно критерию Релея это приводит к увеличению минимального частотного сдвига (доплеровской частоты), который может быть определен. Для определения максимального значения сигнала используется схема с разностным дифференцированием (см. рис. 7).



Рис. 7. Блок-схема поиска максимума функции

В качестве тестового сигнала выбран полином Эрмита 6-го порядка. Его график, ФН и линии уровней представлены на рис. 8. На рис. 9 а показаны результаты когерентной фильтрации без весовой обработки сигнала со сдвигом по фазе. Введение весовой обработки РС позволяет улучшить корреляционную обработку (см. рис. 9 б).

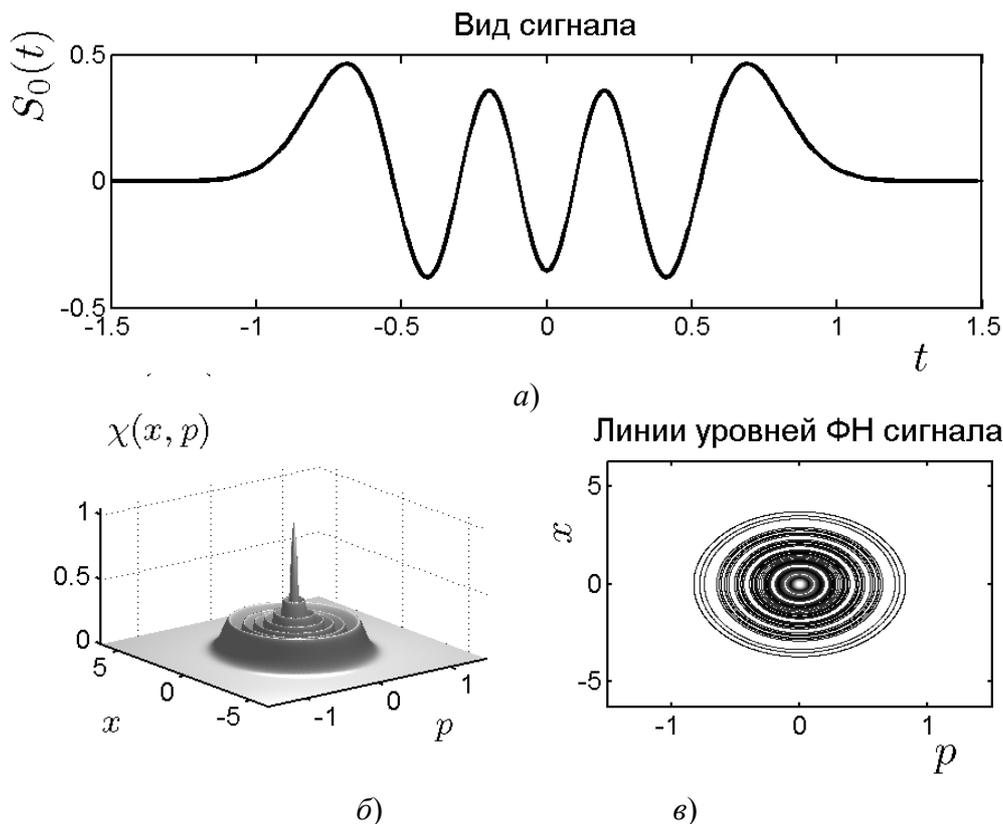


Рис. 8. График полинома Эрмита 6-го порядка (а), функция неопределенности (б), линии уровней (в)

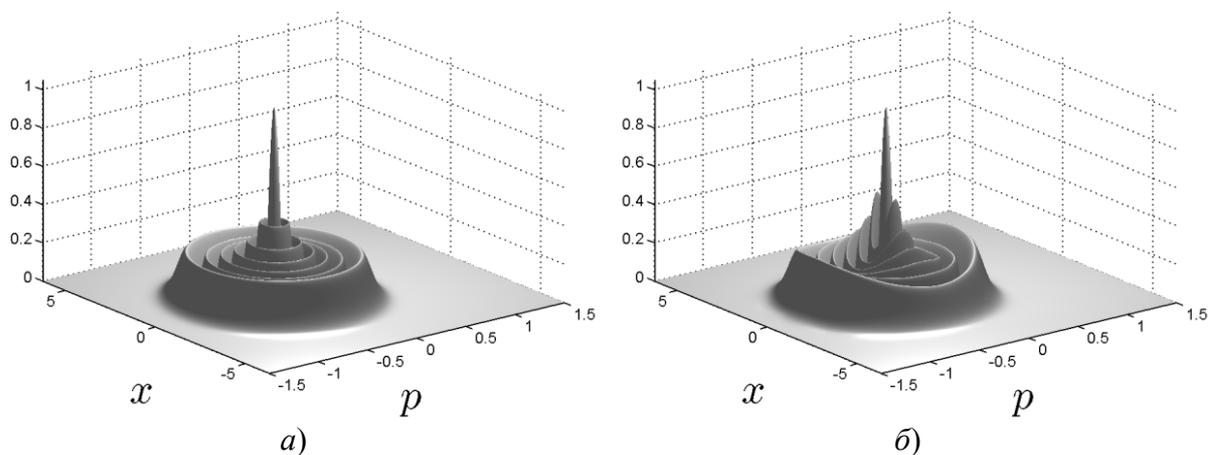


Рис. 9. Когерентная фильтрация радиолокационного сигнала со сдвигом фазы без весовой обработки (а) и с учетом её (б)

Фильтрация корреляционной функции с помощью атомарных и WA-систем функций

В случае, когда результаты корреляционной обработки подвержены воздействию помех, стандартная схема разностного дифференцирования может стать причиной существенных ошибок. Тогда для поиска локальных максимумов целесообразно предварительно провести фильтрацию сигналов атомарными [4-6] и WA-системами функций [6-8]. На следующем этапе проводится определение максимума по алгоритму,

блок-схема которого представлена на рис. 7. Зашумленный срез ($x = 0$) корреляционной функции нормальным шумом с дисперсией $D = 0,25$ приведен на рис. 10 а. Рассмотрим некоторые вейвлет-системы, которые можно использовать для фильтрации зашумленных результатов корреляционной обработки. На рис. 10 б, в, г приведены примеры фильтрационной обработки ортогональными вейвлетами Кравченко $\{\tilde{h}_a\}$ и вейвлет-модулированной ВФ [6] $\psi_1(t)$ зашумленного среза ($x = 0$) КФ.

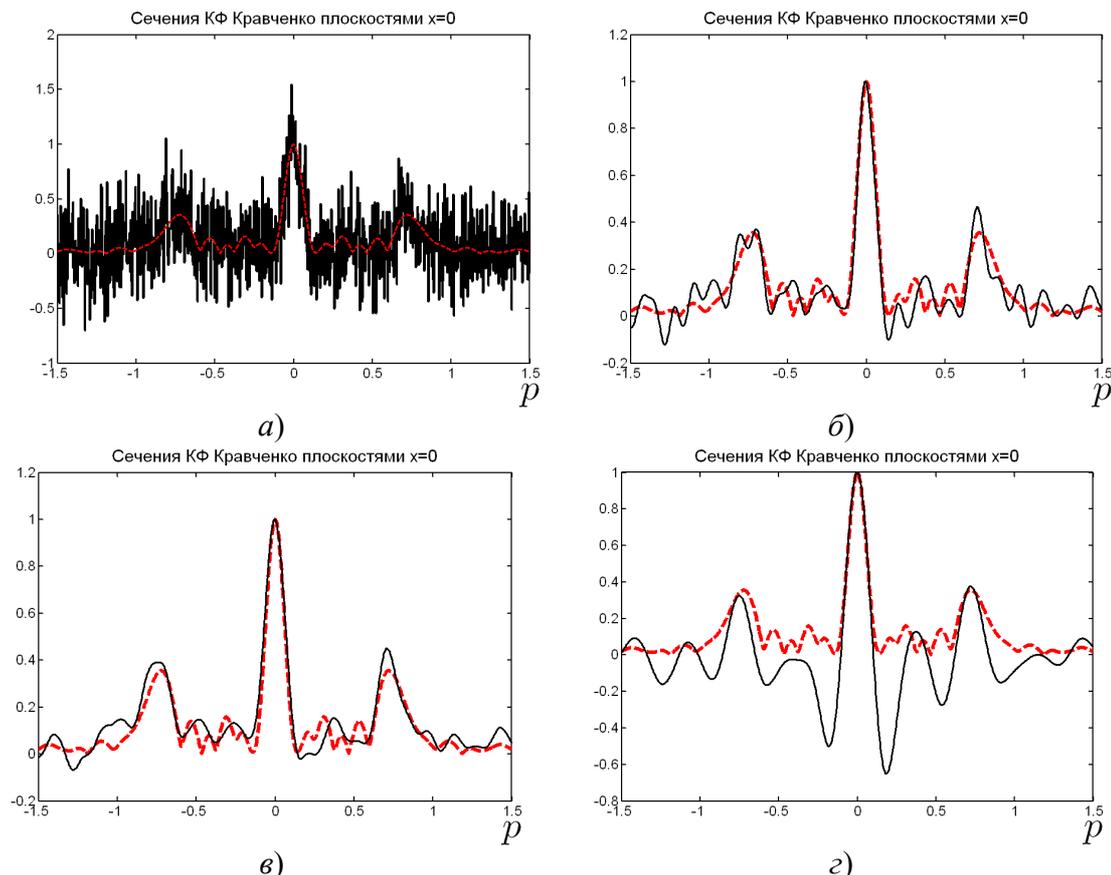


Рис. 10. Зашумленный срез ($x = 0$) КФ (а), фильтрационная обработка ортогональными вейвлетами Кравченко $\{\tilde{h}_4\}$ (б), весовой функцией $w_1(t)$ ($a = 3, b = 1, g = 0,5$) (в) и вейвлет-модулированной ВФ $\psi_1(t)$ ($\eta \approx 3,8878, a = 3, b = 3, g = 1$) (г) (сплошная линия – результат фильтрации, пунктирная – эталонный сигнал)

Как следует из рис. 10, фильтрация, основанная на применении АФ и ВА-систем функций, является эффективной при обработке зашумленных сигналов. Особенность применения вейвлет-модулированных ВФ состоит в том, что отфильтровывается постоянная составляющая сигнала. Этот физический эффект может оказаться полезным при анализе РС.

Функционал качества когерентной обработки радиолокационных сигналов

Для оценки качества обработки РС используем следующие физические параметры: относительное уширение главного лепестка по уровню -3 дБ ($\Delta_3, \%$), максимальный

УБЛ (γ_1), положение бокового лепестка с максимальным уровнем (γ_2), относительное уменьшение уровня первого бокового лепестка (γ_3). Доплеровская частота определяется предложенным алгоритмом (см. рис 6). Функционал качества имеет вид

$$J = \frac{1}{4} \left(\sqrt{2\Delta_3} + (12 + \gamma_1) - 100(\gamma_2 - 0,69) - 3\gamma_3 \right). \quad (11)$$

Коэффициенты подбираются, исходя из соображений физической интерпретации оценки корреляционной обработки. Проведем анализ следующих слагаемых выражения (11):

- $\sqrt{2\Delta_3}$ – учитывает нелинейный вклад уширения главного лепестка,
- $(12 + \gamma_1)$ – эталонное значение максимального УБЛ выбрано эмпирически и равняется 12,
- $(\gamma_2 - 0,69)$ – здесь вершина бокового лепестка среза КФ без весовой обработки с максимальным уровнем имеет ординату $p = 0,69$.

Численные значения функционала качества для конкретных весовых окон приведены в таблицах 1-7.

Численный эксперимент

Рассмотрим следующие примеры для исследования качества когерентной обработки РС (3).

Пример 1. В качестве опорного сигнала выбран полином Эрмита 6-го порядка (см. рис. 11 а). Входной сигнал получается из опорного так

$$S_1(t) = \frac{1}{2} S_0(t) \exp(-i0.3\pi t). \quad (12)$$

Произведена коррекция времени запаздывания для анализа частотных изменений. Действительная и мнимая части входного сигнала показаны на рис. 11 б. Срез корреляционной функции без весовой обработки (см. рис. 12).

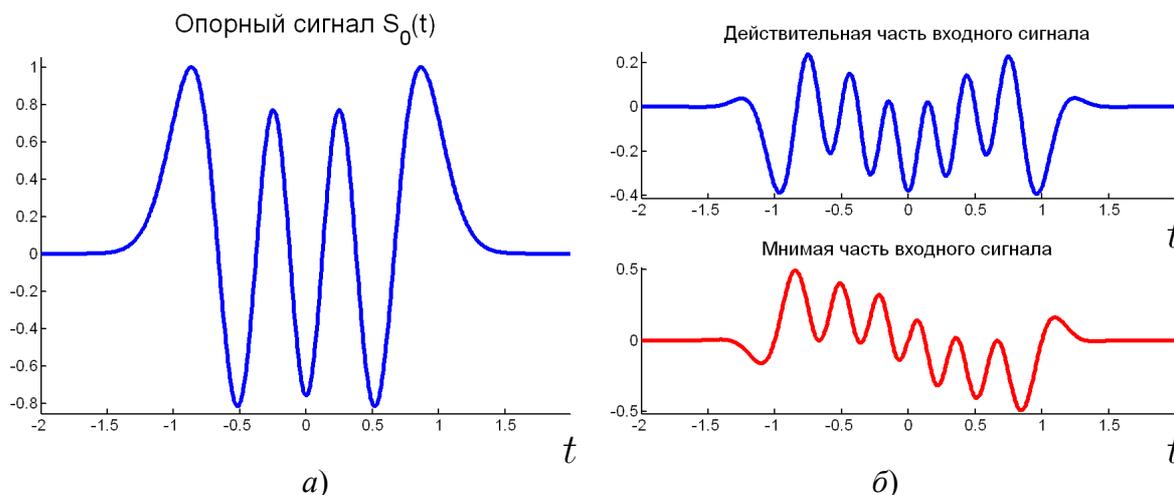


Рис.11. Опорный сигнал (а), действительная и мнимая части входного сигнала (б)

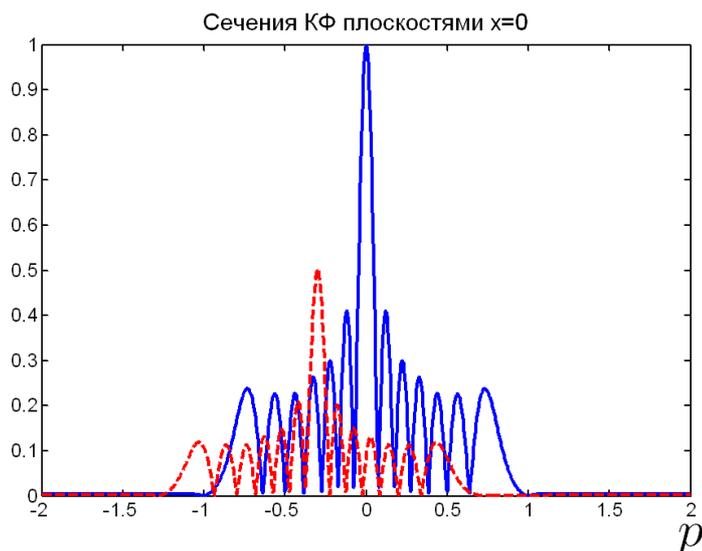


Рис. 12. Срез корреляционной функции без весовой обработки

Входные сигналы с весовой обработкой, а также результаты их когерентной фильтрации (см. рис. 13-16). Физические характеристики и значение функционала качества представлены в таблицах 1-7.

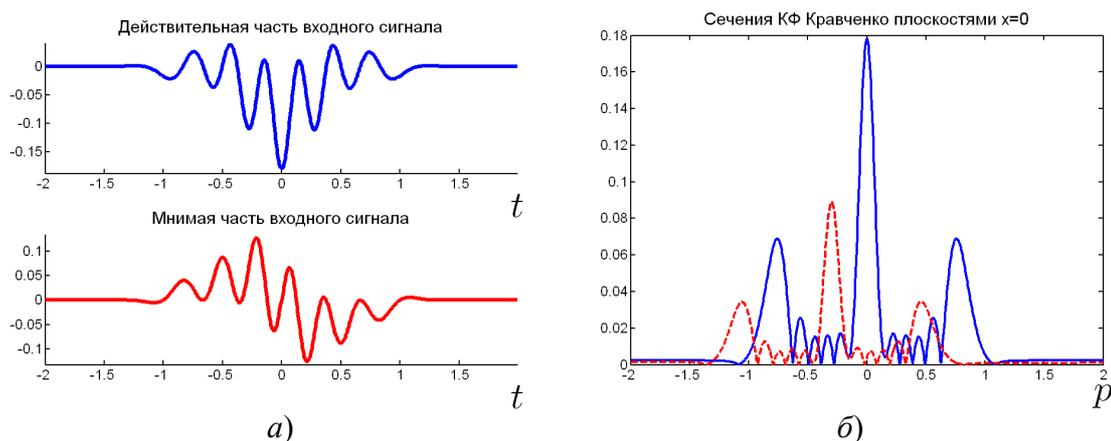


Рис. 13. Действительная и мнимая части входного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_1(t)$ ($a = 2, b = 2, g = 0,5$)

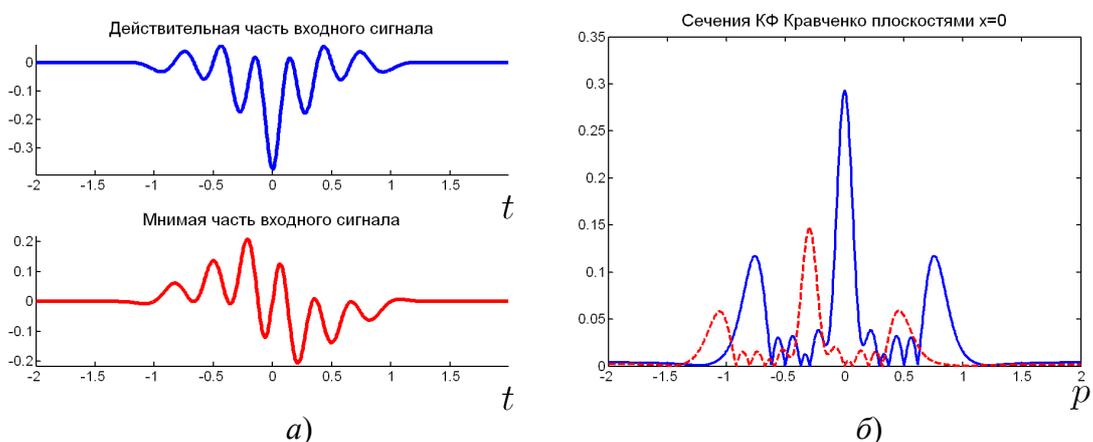


Рис. 14. Действительная и мнимая части входного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_2(t)$ ($a = 2, b = 2, \lambda = 2$)

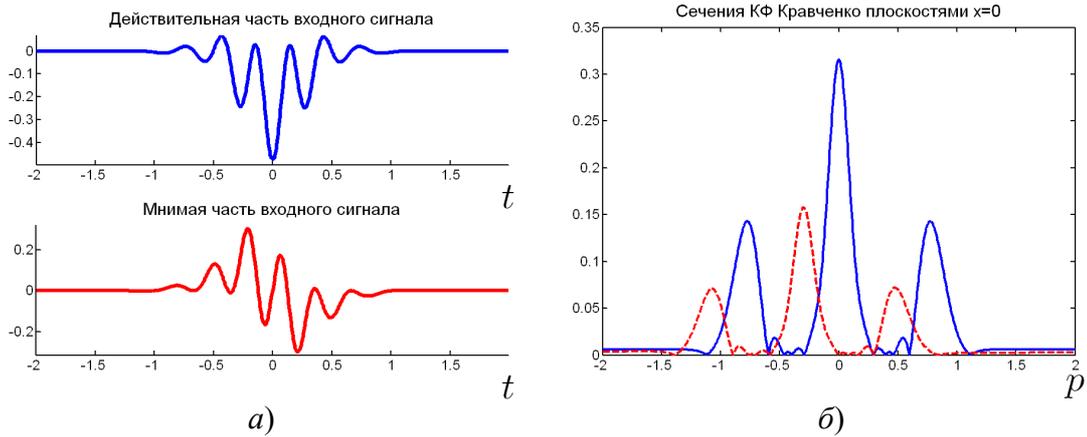


Рис. 15. Действительная и мнимая части входного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_3(t)$ ($a = 2, b = 2, \lambda = 0,2$)

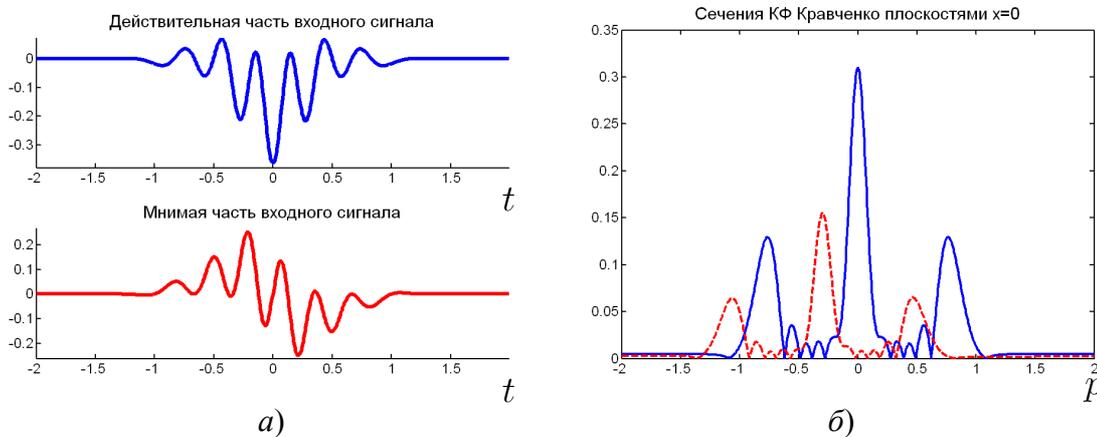


Рис. 16. Действительная и мнимая части входного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_4(t)$ ($a = 2, b = 2, \alpha = 3$)

Табл. 1. Значения физических параметров и функционала качества когерентной обработки радиолокационных сигналов для весовой функции $w_1(t)$ ($b = a$)

a	g		$\Delta_3, \%$	γ_1	γ_2	γ_3	J
2	0,6	0,097	27,650	-9,310	0,702	1,260	1,287
2	0,7	0,103	22,923	-9,609	0,702	0,960	1,271
2	0,8	0,107	19,628	-9,852	0,699	0,778	1,295
2	0,9	0,111	17,192	-10,054	0,699	0,655	1,236
2	1	0,114	15,330	-10,220	0,696	0,568	1,253
3	0,6	0,100	23,209	-9,609	0,699	0,982	1,340
3	0,7	0,106	18,911	-9,921	0,696	0,735	1,356
3	0,8	0,111	15,903	-10,174	0,696	0,581	1,281
3	0,9	0,115	13,610	-10,383	0,693	0,475	1,277
3	1	0,118	11,891	-10,554	0,693	0,399	1,207
4	0,6	0,100	20,917	-9,915	0,699	0,900	1,239
4	0,7	0,107	16,762	-10,251	0,696	0,665	1,236
4	0,8	0,112	13,754	-10,527	0,693	0,516	1,218
4	0,9	0,116	11,605	-10,753	0,693	0,414	1,131
5	0,6	0,101	20,201	-10,007	0,699	0,882	1,200
5	0,7	0,107	16,046	-10,362	0,699	0,651	1,113
5	0,8	0,112	13,037	-10,650	0,696	0,502	1,088
5	0,9	0,117	10,888	-10,890	0,693	0,401	1,068

Табл. 2. Значения физических параметров и функционала качества когерентной обработки радиолокационных сигналов для весовой функции $w_2(t)$ ($b = a$)

a	g		$\Delta_3, \%$	γ_1	γ_2	γ_3	J
2	0,4	0,116	11,175	-10,685	0,693	0,414	1,125
2	0,5	0,112	12,464	-10,540	0,696	0,480	1,103
2	0,6	0,108	14,040	-10,395	0,696	0,551	1,163
2	0,7	0,104	15,473	-10,254	0,696	0,628	1,206
2	0,8	0,101	17,049	-10,116	0,696	0,711	1,248
3	0,6	0,112	10,458	-10,743	0,693	0,381	1,097
3	0,7	0,108	11,891	-10,597	0,693	0,445	1,161
3	0,8	0,104	13,324	-10,453	0,693	0,515	1,216
4	0,8	0,106	11,318	-10,833	0,690	0,449	1,144
5	0,8	0,106	10,458	-10,974	0,693	0,433	1,000

Табл. 3. Значения физических параметров и функционала качества когерентной обработки радиолокационных сигналов для весовой функции $w_2(t)$ ($b = a - 1$)

a	g		$\Delta_3, \%$	γ_1	γ_2	γ_3	J
3	0,4	0,104	33,524	-8,566	0,702	0,962	1,884
3	0,5	0,102	35,244	-8,484	0,702	1,051	1,890
3	0,6	0,099	36,963	-8,404	0,702	1,148	1,887
3	0,7	0,096	38,825	-8,325	0,705	1,253	1,807
3	0,8	0,094	40,688	-8,246	0,705	1,368	1,793
4	0,4	0,111	20,774	-9,407	0,696	0,567	1,685
4	0,5	0,107	22,350	-9,305	0,696	0,636	1,718
4	0,6	0,104	23,926	-9,203	0,699	0,711	1,671
4	0,7	0,101	25,501	-9,102	0,699	0,792	1,691
4	0,8	0,098	27,077	-9,003	0,699	0,880	1,704
5	0,4	0,114	14,183	-9,931	0,690	0,360	1,579
5	0,5	0,111	15,616	-9,821	0,690	0,422	1,626
5	0,6	0,107	17,049	-9,709	0,693	0,487	1,592
5	0,7	0,104	18,481	-9,600	0,693	0,557	1,627
5	0,8	0,101	19,914	-9,493	0,693	0,631	1,657

Табл. 4. Значения физических параметров и функционала качества когерентной обработки радиолокационных сигналов для весовой функции $w_3(t)$ ($b = a$)

a	g		$\Delta_3, \%$	γ_1	γ_2	γ_3	J
2	0,4	0,105	23,496	-9,516	0,702	0,928	1,339
2	0,5	0,112	17,192	-10,036	0,696	0,629	1,336
2	0,6	0,118	13,754	-10,365	0,696	0,484	1,207
2	0,7	0,122	11,605	-10,586	0,693	0,400	1,183
3	0,4	0,108	19,484	-9,818	0,696	0,715	1,420
3	0,5	0,116	13,467	-10,359	0,693	0,455	1,292
4	0,4	0,109	17,335	-10,138	0,696	0,647	1,302
4	0,5	0,118	11,605	-10,727	0,693	0,395	1,152
5	0,4	0,109	16,619	-10,246	0,699	0,634	1,179
5	0,5	0,118	10,745	-10,863	0,693	0,382	1,081

Табл. 5. Значения физических параметров и функционала качества когерентной обработки радиолокационных сигналов для весовой функции $w_3(t)$ ($b = a - 1$)

a	g		$\Delta_3, \%$	γ_1	γ_2	γ_3	J
3	0,5	0,105	39,685	-8,223	0,705	1,146	1,937
3	0,6	0,108	35,817	-8,404	0,702	0,990	1,972
3	0,7	0,110	33,524	-8,523	0,702	0,899	1,942
3	0,8	0,112	31,948	-8,606	0,702	0,842	1,915
4	0,4	0,104	33,095	-8,593	0,702	1,042	1,804
4	0,5	0,110	26,648	-8,957	0,699	0,758	1,792
4	0,6	0,114	23,209	-9,189	0,699	0,617	1,718
4	0,7	0,117	21,060	-9,343	0,696	0,536	1,734
4	0,8	0,119	19,771	-9,448	0,696	0,486	1,696
5	0,4	0,106	25,788	-9,027	0,696	0,809	1,782
5	0,5	0,113	19,771	-9,432	0,693	0,547	1,729
5	0,6	0,118	16,476	-9,686	0,693	0,419	1,624
5	0,7	0,121	14,613	-9,855	0,690	0,343	1,630
5	0,8	0,123	13,324	-9,970	0,690	0,296	1,576

Табл. 6. Значения физических параметров и функционала качества когерентной обработки радиолокационных сигналов для весовой функции $w_4(t)$ ($b = a$)

a	g		$\Delta_3, \%$	γ_1	γ_2	γ_3	J
2	1	0,122	11,318	-10,630	0,693	0,388	1,166
2	1,1	0,120	12,321	-10,514	0,696	0,431	1,139
2	1,2	0,118	13,467	-10,393	0,696	0,479	1,190
2	1,3	0,116	14,756	-10,270	0,696	0,533	1,241
2	1,4	0,114	16,046	-10,146	0,696	0,589	1,288
3	1,3	0,120	11,318	-10,605	0,693	0,368	1,188
3	1,4	0,118	12,464	-10,476	0,693	0,418	1,241

Табл. 7. Значения физических параметров и функционала качества когерентной обработки радиолокационных сигналов для весовой функции $w_4(t)$ ($b = a - 1$)

a	g		$\Delta_3, \%$	γ_1	γ_2	γ_3	J
3	1	0,111	33,095	-8,547	0,702	0,887	1,932
3	1,1	0,109	34,384	-8,483	0,702	0,935	1,951
3	1,2	0,108	35,673	-8,419	0,702	0,990	1,965
3	1,3	0,107	37,106	-8,351	0,705	1,047	1,906
3	1,4	0,106	38,539	-8,282	0,705	1,110	1,917
4	1	0,118	20,774	-9,374	0,696	0,525	1,724
4	1,1	0,116	21,777	-9,294	0,696	0,567	1,751
4	1,2	0,114	23,066	-9,209	0,699	0,614	1,710
4	1,3	0,113	24,212	-9,122	0,699	0,667	1,734
4	1,4	0,111	25,645	-9,034	0,699	0,723	1,765
5	1	0,121	14,183	-9,889	0,690	0,332	1,610
5	1,1	0,119	15,186	-9,801	0,693	0,372	1,574
5	1,2	0,118	16,332	-9,708	0,693	0,416	1,615
5	1,3	0,116	17,479	-9,613	0,693	0,462	1,653
5	1,4	0,114	18,768	-9,518	0,693	0,513	1,693

Пример 2. Рассмотрим применение корреляционной функции Кравченко при наличии шума, распределенного по нормальному закону с дисперсией $D=0,2$. В качестве опорного сигнала выбран полином Эрмита 6-го порядка (см. рис. 6 а). Графики действительной и мнимой частей сигнала искаженного помехой с нормальным законом распределения приведены на рис. 17 а. Результат когерентной обработки входного сигнала (см. рис. 17 б). Входные зашумленные сигналы с весовой обработкой и результаты их когерентной фильтрации показаны на рис. 18-21.

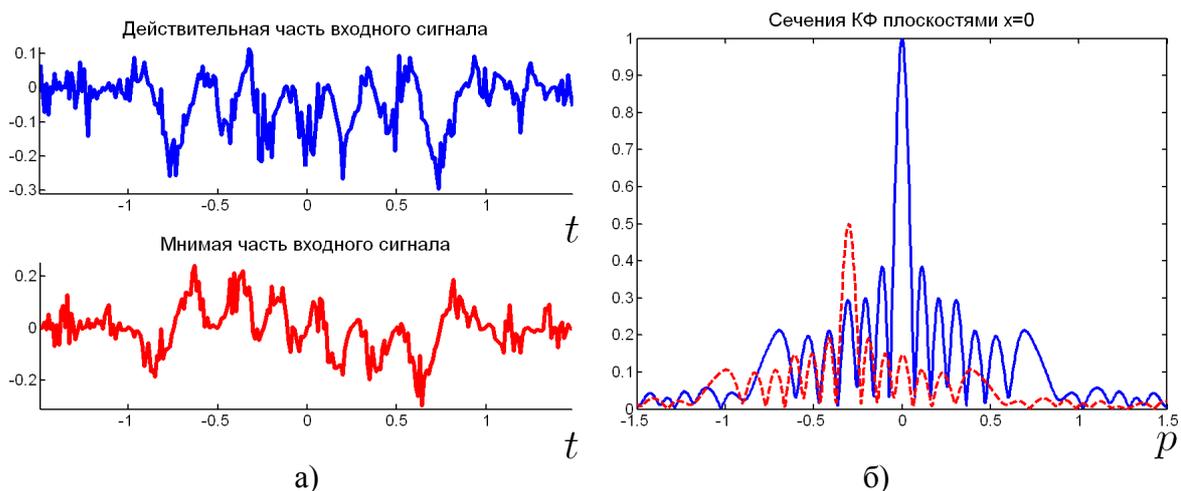


Рис. 17. Действительная (сплошная линия) и мнимая (пунктирная линия) части зашумленного входного сигнала (а), срезы корреляционной функции (б)

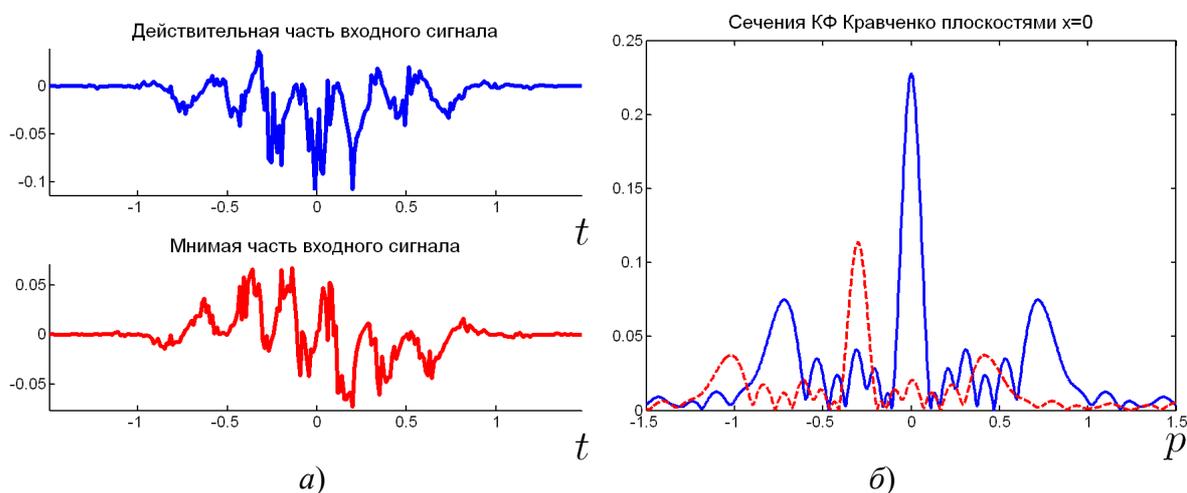


Рис. 18. Действительная и мнимая части входного зашумленного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_1(t)$ ($a = 2, b = 2, g = 0,5$)

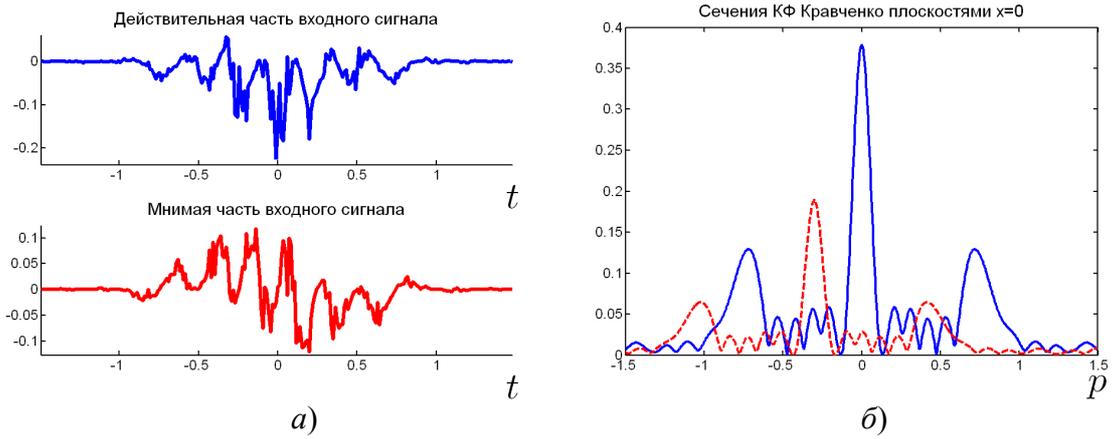


Рис. 19. Действительная и мнимая части входного зашумленного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_2(t)$ ($a = 2, b = 2, \lambda = 2$)

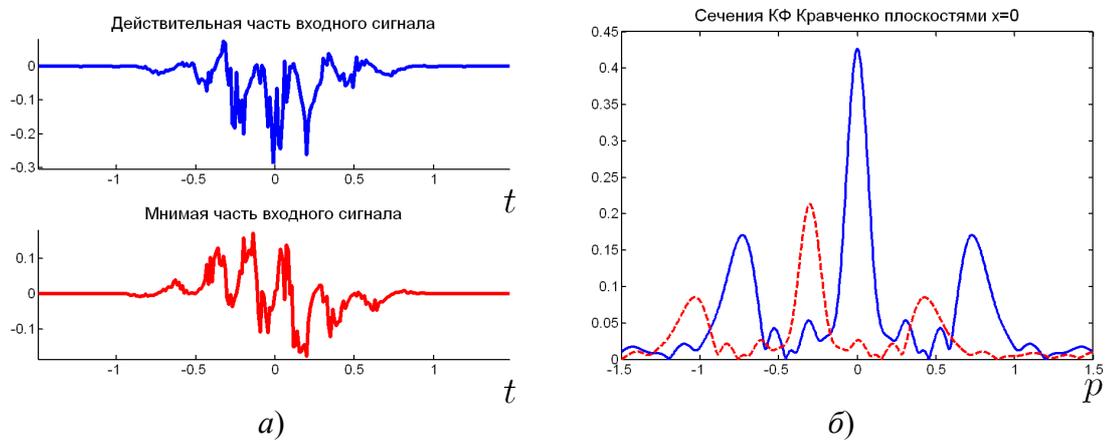


Рис. 20. Действительная и мнимая части входного зашумленного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_3(t)$ ($a = 2, b = 2, \lambda = 0,2$)

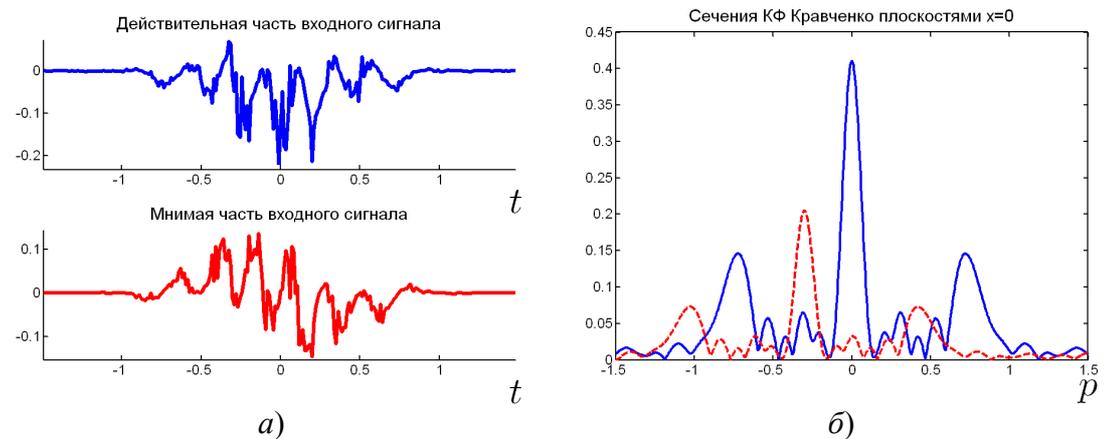


Рис. 21. Действительная и мнимая части входного зашумленного сигнала (а) и срезы корреляционной функции плоскостью $x = 0$ (б) с весовой обработкой для $w_4(t)$ ($a = 2, b = 2, \alpha = 3$)

Выводы

Предложена новая структура корреляционного фильтра с применением комбинаций ВФ на основе вероятностных распределений Кравченко. Разработан алгоритм поиска доплеровского сдвига в условиях зашумления каналов связи с его уточнением на основе вейвлетов. Анализ таблиц и графиков позволяет сделать вывод, что предложенный и обоснованный алгоритм, основанный на применении весовых функций Кравченко и нового класса WA-систем функций, обладает гибкостью, точностью и помехозащищенностью.

Работа выполнена в рамках гранта НШ-5708.2008.9 «Новые методы в некоторых задачах акустооптики, радиофизики и медицины на основе атомарных функций, вейвлетов и фракталов».

Литература

1. Слока В.К. Вопросы обработки радиолокационных сигналов. М.: Сов. Радио, 1970.
2. Волосюк В.К., Кравченко В.Ф. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2008.
3. Кравченко В.Ф., Кравченко О.В., Сафин А.Р. Атомарные функции в теории вероятностей и случайных процессов // Успехи современной радиоэлектроники. 2009. №5. С. 23-38.
4. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям. М.: Радиотехника. 2003.
5. Кравченко В.Ф., Рвачёв В.Л. Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях. М.: Физматлит. 2006.
6. Цифровая обработка сигналов и изображений в радиофизических приложениях / под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит. 2007.
7. Кравченко В.Ф., Лабунько О.С., Лерер А.М., Синявский Г.П. Вычислительные методы в современной радиофизике / под ред. В.Ф. Кравченко. М.: Физматлит. 2009.
8. Kravchenko, V.F., Churikov, D.V. A new class of orthogonal kravchenko WA-system functions $\{\widehat{h}_a(t)\}$ // Telecommunications and Radio Engineering. Vol. 68. No. 8. P. 649-666, 2009.
9. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. Санкт-Петербург: Наука, 2001.

NEW METHODS OF CORRELATION PROCESSING OF RADAR SIGNALS ON BASIS OF ATOMIC FUNCTIONS FAMILY

V.F. Kravchenko, D.V. Churikov

Kotel'nikov Institut of Radio Engineering and Electronics of RAS, Moscow

The combined methods of correlation processing of radar signals (RS) based on the theory of atomic functions (AF) and WA-systems of functions are considered. Algorithms of optimum RS processing are offered. New designs of weight functions (WF) Kravchenko-Laplace-Champernoune and the modified logistical distribution are entered. Quality functional which allows to estimate accuracy and efficiency of RS processing for concrete physical models is constructed. It is shown that the offered approach essentially improves quality of coherent RS analysis.

Авторы:

Кравченко В.Ф. – заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук, профессор, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,
тел.: 8-(495)-629-33-65

Область научных интересов: R-функции, атомарные функции, вейвлеты, электродинамика сверхпроводящих структур, анализ и синтез антенн, прикладные математика и физика, дистанционное зондирование неоднородных сред.
E-mail: kvf@pochta.ru

Чуриков Д.В. – научный сотрудник, ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН,
тел.: 8-(495)-629-33-65, 8-(903)-815-18-97,

Область научных интересов: R-функции, атомарные функции, вейвлеты, цифровая обработка сигналов.
E-mail: mpio_nice@mail.ru