

УДК 621.391 DOI 10.17238/issn2409-0239.2017.1.32

## Анализ параметров функции отклика при оптимальной весовой обработке ЛЧМ импульсного сигнала

С. Б. Медведев, В. И. Шапошников<sup>1</sup>, О. А. Чекмазова

<sup>1</sup>к.т.н.

АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»

e-mail: v.schaposchnikov@yandex.ru, alter-vista@mail.ru

**Аннотация.** Предметом исследования статьи являются свойства оптимальной весовой функции, полученной для принимаемого импульсного ЛЧМ-сигнала с большой базой вместе с множеством переотраженных сигналов по критерию максимум отношения полезный сигнал/шум при ортогонализации весовой функции части принимаемых мешающих сигналов.

Эффективность обработки оценивается по всему множеству возможных помеховых сигналов.

Цель работы — увеличение эффективности работы системы за счет нахождения рекомендованных характеристик алгоритма обработки отраженного ЛЧМ-сигнала, таких как предельная зона максимального подавления, краевые точки.

Анализ полученных данных показал что на качество оконной функции в большей степени влияет показатель  $K$ : для его оптимальных значений нет корреляции потерь от ширины зоны максимального подавления (зона  $M$ ), незначительные ухудшения появляются лишь на краях диапазона. Для большого (нежелательного) показателя  $K$  наблюдается значительная корреляция уровня полезного сигнала от величины зоны  $M$  и от длительности импульса (ухудшается примерно в два раза). Максимальное значение весовой функции уменьшается при увеличении длительности сигнала и появляется линейная зависимость при значении  $K = 1,36$  (нежелательное). Область применения полученных результатов достаточно широка: от оптимизации алгоритмов измерителей дальности и скорости, работающих в условиях помех, до определения амплитудно-фазового распределения в активных фазированных антенных решетках для получения необходимого затухания по боковым лепесткам диаграммы направленности.

**Ключевые слова:** стыковка, многолучевость, несогласованная фильтрация, ЛЧМ, зона максимального подавления

## Analysis of the Response Function Parameters at Optimum Weight Processing for Signals with Linear Frequency Modulation

S. B. Medvedev, V. I. Shaposhnikov<sup>1</sup>, O. A. Chekmazova

<sup>1</sup>candidate of engineering science

Joint-Stock Company “Research Institute of Precision Instruments”

e-mail: v.schaposchnikov@yandex.ru, alter-vista@mail.ru

**Abstract.** The article studies the features of an optimum weight function derived for the received pulse signal with linear frequency modulation with a big signal base and the unknown set of reflected signals by the maximum useful signal-to-noise criterion at orthogonalization of the weight function of a part of the received interfering signals lying in the area of considerable side lobes of the correlation function.

The effectiveness of processing is evaluated according to the whole set of possible interfering signals.

The aim of the work is to increase the operation effectiveness of the system by finding the recommended characteristics of the algorithm for processing the reflected signal with linear frequency modulation, such as the limiting zone of the maximum suppression and boundary points.

The analysis of the obtained data showed that the  $K$  indicator largely influences the window function. For its optimal values, there is no correlation of the losses from the width of the maximum suppression zone ( $M$ -zone). A negligible decline appears only on the borders of the range. For a greater (undesirable)  $K$  indicator, a considerable correlation of the useful signal level from the  $M$  zone value and from the signal duration (it worsens about twice) can be seen. The maximum value of the weight function decreases with the increase in the signal duration, and a linear dependence at the (undesirable) value  $K = 1,36$  occurs. The field of application of the results obtained is quite wide: from optimization of the range and velocity measuring unit algorithms working under interference conditions to definition of amplitude-phase distribution in active phase-arrayed antennas for getting the necessary attenuation on side lobes of the antenna radiation pattern.

**Keywords:** docking, multipath propagation, mismatched filtration, linear frequency modulation, zone of maximum suppression

## Введение

Оконные функции представляют исключительную важность в спектральном анализе сигналов, они характеризуются своей формой и амплитудно-частотной характеристикой. Высокий уровень амплитуды (называемый главным лепестком) характеризует полосу пропускания, низкий уровень амплитуды (называемый боковыми лепестками) характеризует полосу подавления. Между главным лепестком и боковыми лепестками существует переходная область. Чем она уже, тем лучше подавляются ненужные частоты сигнала. Целью данной работы было выявление предельно допустимой зоны максимального подавления (зона  $M$ ), изучение шумоподавления в краевых точках исследуемого диапазона и анализ перечисленных выше параметров в зависимости от выбранного показателя частоты квантования к частоте девиации  $K$ . Все полученные значения приводятся в сравнении со случаем согласованной фильтрации.

## Свойства сигнала и компьютерная модель

При исследовании использовался сигнал с линейной частотной модуляцией, он является перспективным, поскольку обладает простотой реализации и возможностью существенного сжатия сигнала при приеме с увеличением его амплитуды над уровнем помех.

Более ранние исследования [1] позволили определить рекомендуемые длительность импульса  $\tau$ , частоту девиации  $F_{\text{дев}}$ , частоту квантования  $F_{\text{кв}}$ , отношение  $F_{\text{кв}}/F_{\text{дев}} = K$ , равное 1,07–1,2.

Принцип работы компьютерной модели дан в [2], ниже приводится сжатое описание функционирования алгоритма поиска оптимальных параметров фильтра ЛЧМ-сигнала.

Модель излучаемого ЛЧМ-сигнала:

$$S(t) = a \cos \left( \omega_0 t + \frac{\pi F_{\text{дев}} t^2}{\tau_{\text{имп}}} \right). \quad (1)$$

Эквивалентное комплексное представление:

$$\dot{S}(t) = a \exp \frac{j\pi F_{\text{дев}} t^2}{\tau_{\text{имп}}}. \quad (2)$$

С учетом использования цифровой обработки

$$\bar{S}(i) = (z_{01}, z_{02}, \dots, z_{0n}),$$

где  $i = 1, 2 \dots n$ ,  $\bar{S}(i)$  — вектор в комплексном пространстве.

Модель отраженного сигнала:

$$\bar{S}_{ij} = [(\alpha_{i1}, \varphi_{i1}), (\alpha_{i2}, \varphi_{i2}) \dots (\alpha_{in}, \varphi_{in})]. \quad (3)$$

$\bar{S}_{ij}$  — нормированный, центрированный излучаемый сигнал, где  $\alpha_{ij}$  — неизвестная амплитуда,  $\varphi_{il}$  — неизвестная начальная фаза сигнала.

В этом случае задача синтеза может быть решена как задача разрешения сигнала  $\bar{S}_k$ , принимаемого в совокупности с  $m$  другими сигналами. Задача состоит в построении оптимального фильтра (опорной функции) при использовании критерия оптимальности — получение максимума отклика на анализируемый сигнал при подавлении мешающих сигналов до некоторого уровня  $\varepsilon$  (или до нуля).

Принимаемый сигнал:

$$y_k(t_j) = \alpha_k \bar{S}_{kj} + \sum_{i=1; i \neq k}^m \alpha_i \bar{S}_{ij} + \bar{u}(t_j), \quad (4)$$

где  $j = 1, 2, \dots, 2n$ ,  $m = 2n - 1$ .

В выражении (4) первое слагаемое можно считать полезным сигналом, второе — помехой (мешающие сигналы), третье — шумом.

Отклик фильтра:

$$U(x/y) = (\alpha_k \bar{S}_{kj}, \bar{P}_{0j}) + \left( \sum_{i=1; i \neq k}^m \alpha_i \bar{S}_{ij}, \bar{P}_{0j} \right) + (\bar{u}(t_j) \cdot \bar{P}_{0j}). \quad (5)$$

## Описание графических зависимостей

Были проведены эксперименты, моделирующие весовые функции опорного вектора с различной комбинацией исходных параметров. Исследования проводились для двух пар параметров: частота квантования/частота девиации с различным

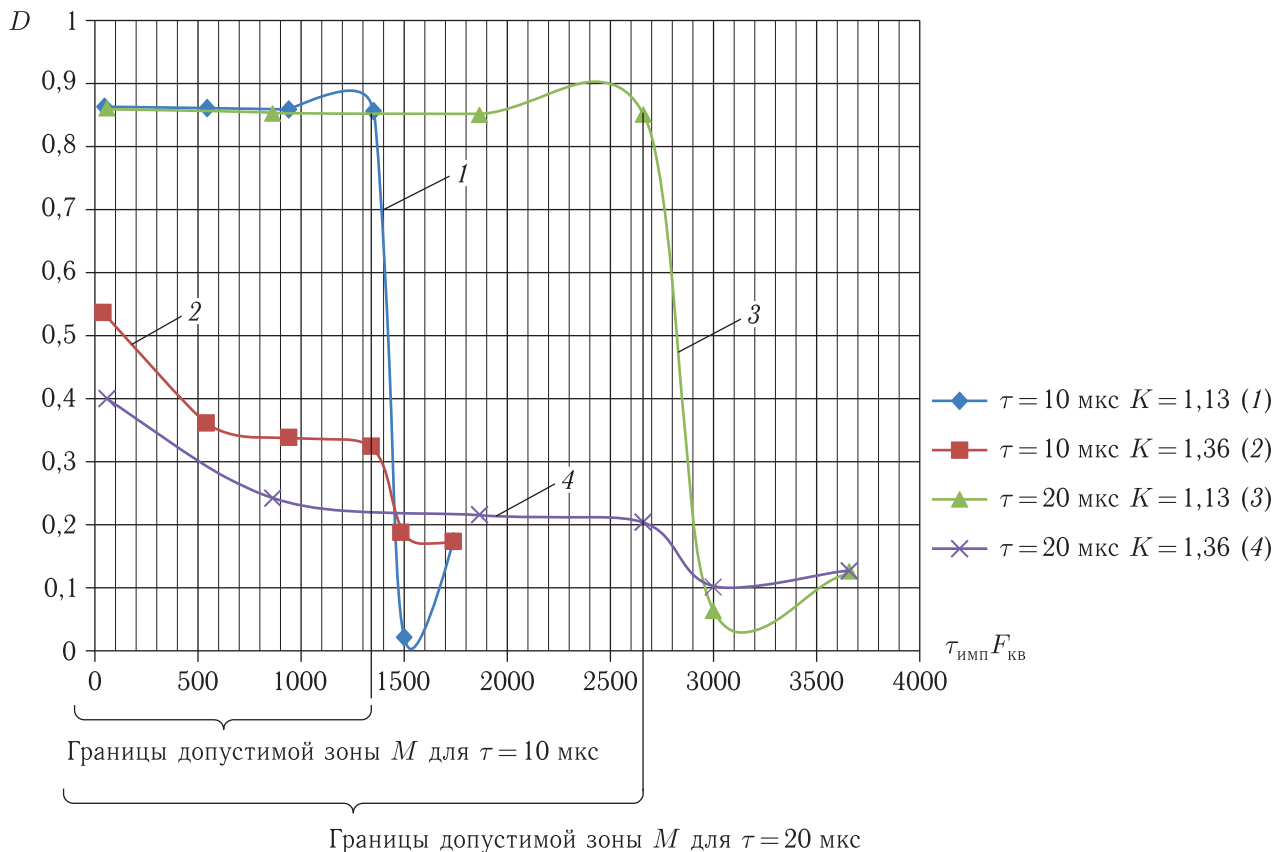


Рис. 1. Зависимость уровня полезного сигнала от ширины зоны максимального подавления для математического моделирования

показателем  $K$ :  $K = 1,13$  ( $F_{\text{кв}} = 400$  МГц,  $F_{\text{дев}} = 355$  МГц) и  $K = 1,36$  ( $F_{\text{кв}} = 400$  МГц,  $F_{\text{дев}} = 295$  МГц). Исследование показателя  $K$  было проведено в статье [1].

Эти параметры моделировались для сигналов разной длительности  $\tau$ : 10 мкс и 20 мкс соответственно. Регистрировался уровень полезного сигнала ( $D$ ), форма весовой функции, ее максимальное значение. Также регистрировалась форма функции отклика в пределах зоны  $M$  и на краях изучаемого диапазона.

Кроме того, исследовалась зависимость уровня полезного сигнала от ширины зоны максимального подавления.

Результаты математического моделирования приведены на рис. 1.

Для кривых 1 и 2 общая ширина исследуемого диапазона равняется 4000 ( $\tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}}$ ) ( $\tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}} = \text{мкс} \cdot \text{МГц}$  — произведение этих величин дает безразмерную величину), для кривых 3 и 4 —

8000 ( $\tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}}$ ), при этом графические зависимости строятся для интервала, несколько превышающего границы допустимой зоны  $M$ .

Можно сделать вывод, что ширина допустимой зоны  $M$  линейно зависит от произведения  $\tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}}$ . Существенное влияние на уровень и нелинейность кривой оказывает показатель  $K$ . При оптимальном значении  $K$  (в диапазоне 1,07–1,2) уровень полезного сигнала практически не изменяется по всей зоне  $M$ , значительное ухудшение принимаемого сигнала происходит при ширине зоны  $M < \frac{1}{3} \tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}}$ .

При неоптимальном показателе  $K$  ( $K = 1,36$ ) увеличивается нелинейность зависимости уровня полезного сигнала, возрастает величина потерь и отсутствует устойчивый участок.

На рис. 1 кривые уровня полезного сигнала 1 и 3 демонстрируют независимость потерь от расширения зоны  $M$  в допустимых пределах ( $K = 1,13$ ), кривые 2 и 4 имеют большую зависимость

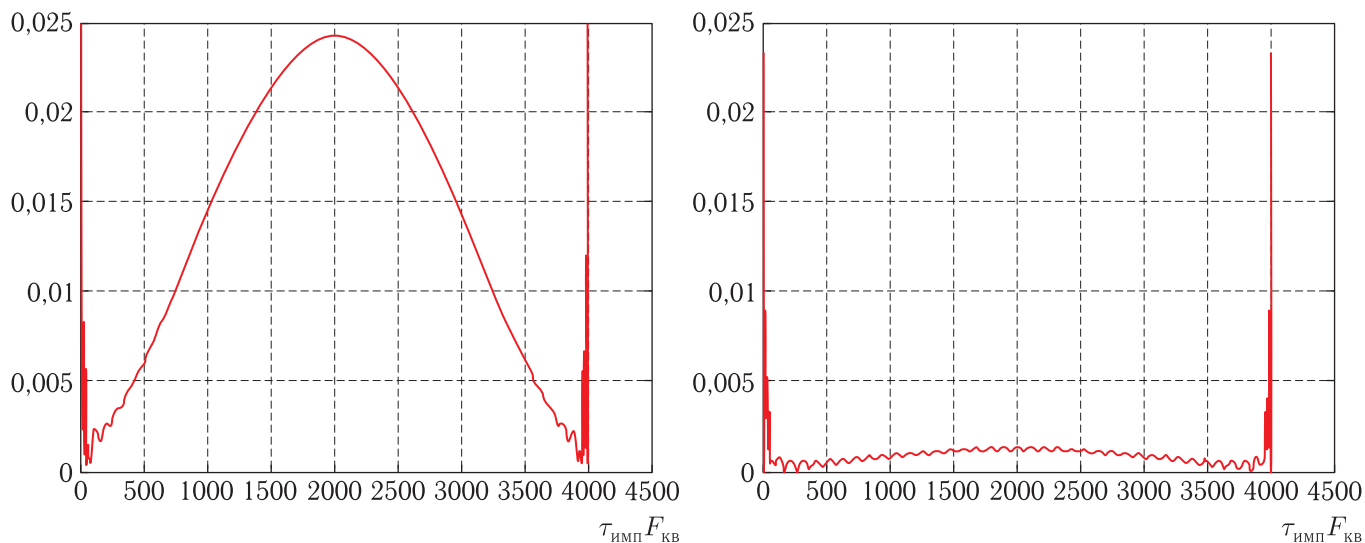


Рис. 2. Сравнение весовых функций для оптимального  $K = 1,13$  и неоптимального  $K = 1,36$

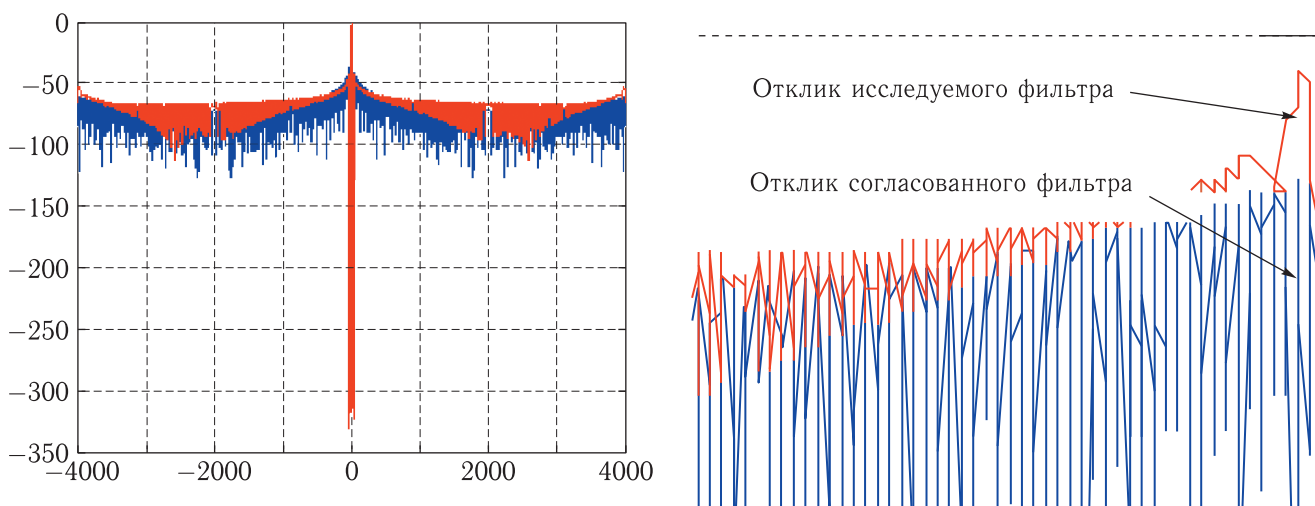


Рис. 3. Уровень подавления боковых лепестков при ширине зоны  $M = 50$

от ширины зоны  $M$ , при этом уровень полезного сигнала хуже примерно в 2 раза.

Весовая функция для  $K = 1,13$  имеет гладкую форму с ярко выраженным максимумом, для  $K = 1,36$  весовая функция не отвечает предъявляемым к ней требованиям, становится равномерно широкой, пологой, максимума не имеет — это говорит о том, что ненужные частоты не подавляются, это приведет к значительному ухудшению качества. На рис. 2 приведено сравнение весовых функций.

Интересны также подавляющие свойства за пределами зоны  $M$ . Сравнение результатов моделирования показывает, что с расширением зоны  $M$

на краях наблюдаемого диапазона уровень подавления несколько ухудшается по сравнению с согласованной фильтрацией. На рис. 3 изображен краевой эффект при узкой зоне  $M = 50$ , а на рис. 4 — при максимально допустимой зоне  $M = 1350$ .

Приведенные выше графики показывают характер математических зависимостей при нахождении сигнала симметрично относительно нуля на временной оси. В реальных условиях сигнал существует на интервале времени  $t > 0$ , т. е. несимметричен относительно нуля; графики соответствующих зависимостей приведены ниже. Такое моделирование можно назвать физическим.

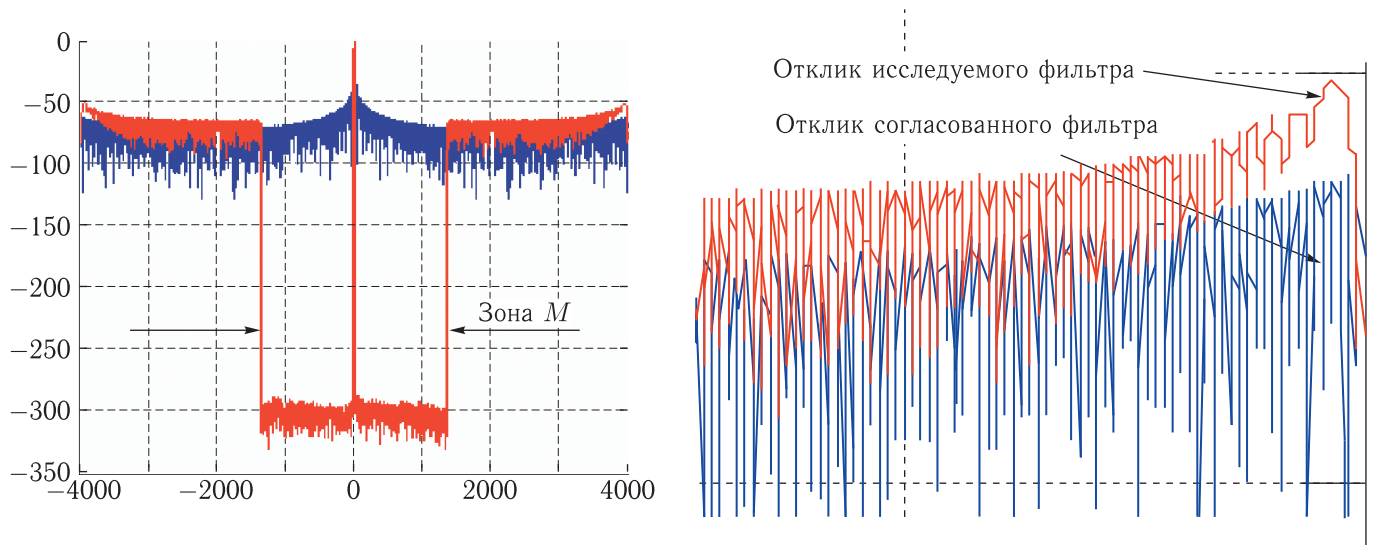


Рис. 4. Уровень подавления боковых лепестков при ширине зоны  $M = 1350$

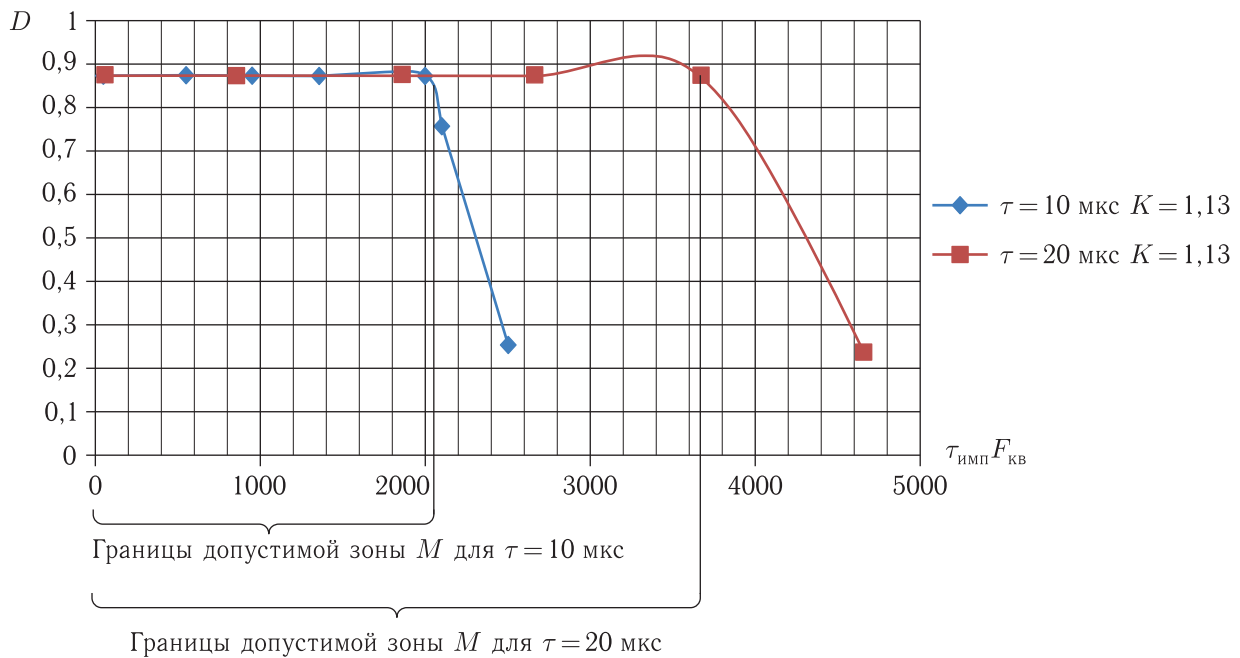


Рис. 5. Зависимость уровня полезного сигнала от ширины зоны максимального подавления для случая физического моделирования

Физическое моделирование (одностороннее) схоже с математическим по форме получившихся аналитических зависимостей, но ширина рекомендуемой зоны  $M$  отличается. Для этого случая оптимальная ширина зоны  $M$  находится в пределах  $M < \frac{1}{2} \tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}}$ .

На рис. 5 приведены кривые для длительности сигнала  $\tau = 10 \text{ мкс}$  и двух показате-

лей  $K$ . Общая ширина исследуемого диапазона составляет  $4000 (\tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}})$  (ширина  $M = 2000 (\tau_{\text{имп}} F_{\text{кв}})$ ).

Весовая функция для  $K = 1,13$  имеет менее гладкую форму и более плоскую область максимума в сравнении с математическим моделированием (рис. 6). При этом область на краях исследуемого диапазона обладает лучшими характеристиками

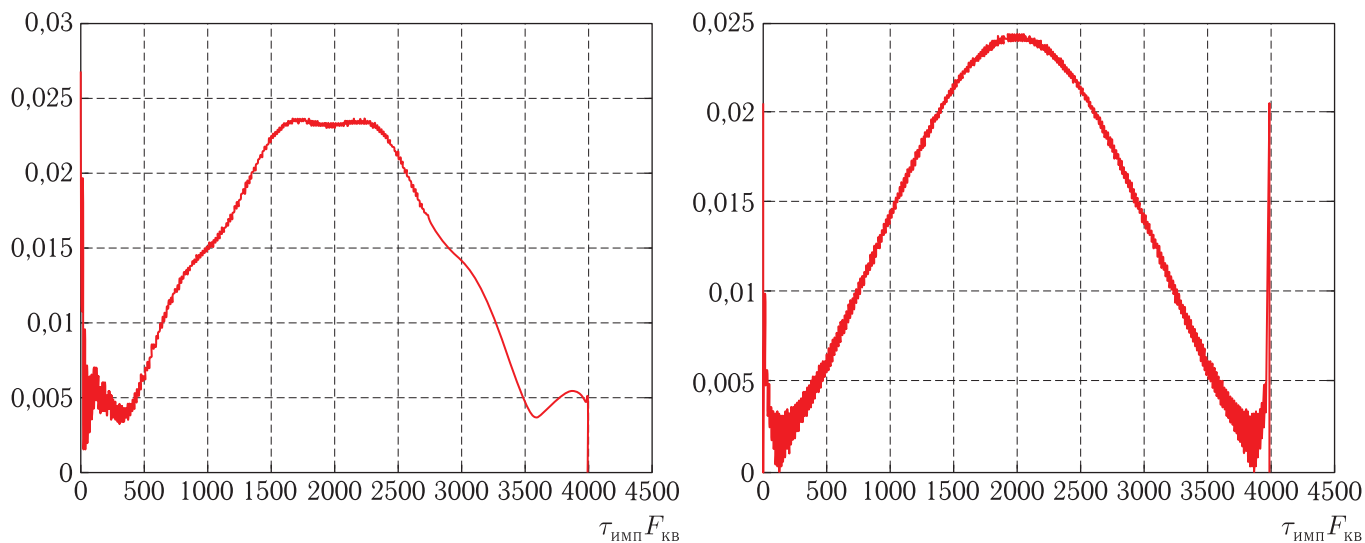


Рис. 6. Сравнение форм весовых функций для физического (слева) и математического (справа) моделирования

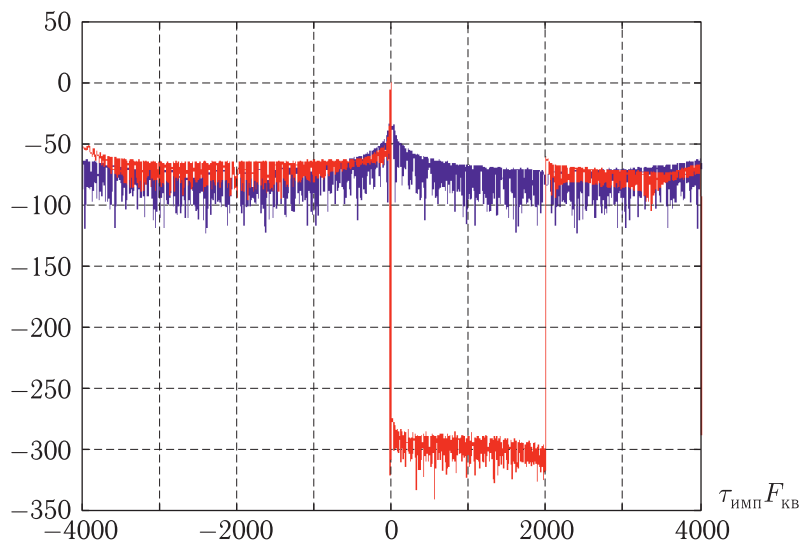


Рис. 7. Сравнение физического моделирования со случаем согласованной фильтрации

в сравнении со случаем согласованной фильтрации (рис. 7).

Уровень боковых лепестков эквивалентен задержке в полосе подавления. Чем ниже уровень боковых лепестков, тем шире полоса пропускания, тем более полого и неидеально спадает частотная характеристика фильтра.

Чем ниже уровень боковых лепестков, тем шире полоса пропускания и тем больше переходная характеристика отличается от идеальной.

Боковые лепестки (уровень главного лепестка, скорость спада) влияют на:

- просачивание спектральных составляющих,

- обнаруживаемость двух близких тонов,
- потери преобразования.

На рис. 8 изображена зависимость пикового значения весовой функции ( $B$ ) от ширины зоны максимального подавления. Из графика видно, что максимально хорошие результаты достигаются при рекомендованных значениях показателя  $K$ , величина пика постоянна при допустимой ширине зоны  $M$ ; когда расширение зоны  $M$  превышает этот предел, то наблюдается резкий спад пикового значения и, соответственно, ухудшение полосы пропускания.

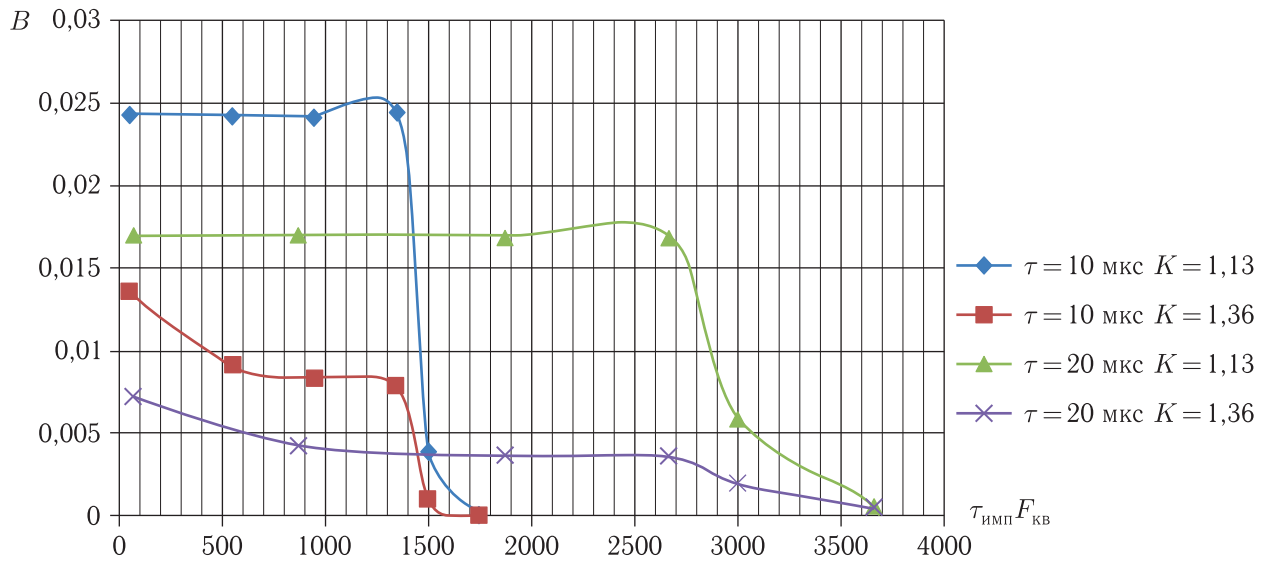


Рис. 8. Зависимость максимального значения весовой функции от ширины зоны максимального подавления для математического моделирования

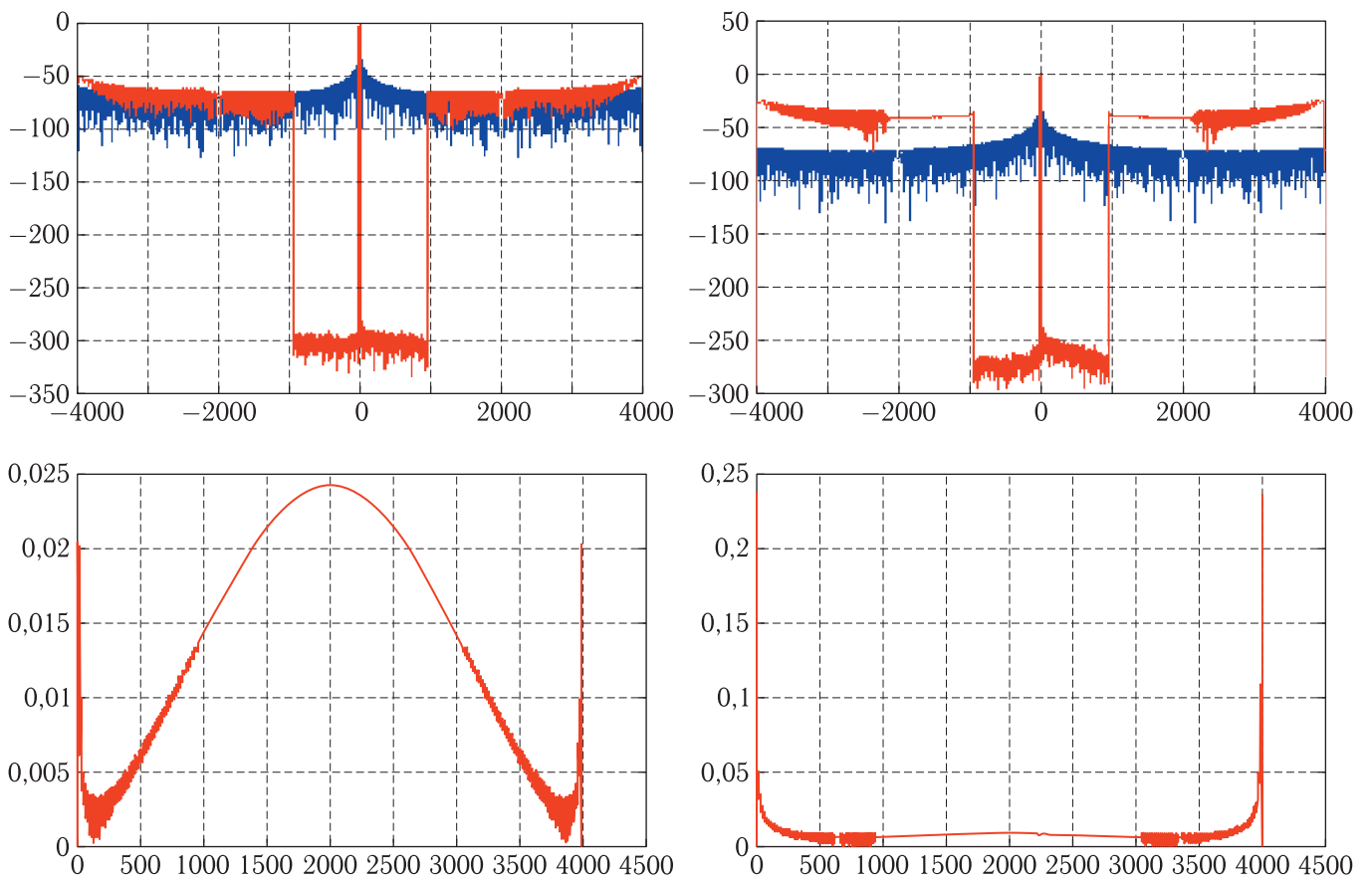


Рис. 9. Сравнение полос пропускания и подавления для  $K = 1,13$  (слева) и  $K = 1,36$  (справа)



Рис. 9 демонстрирует различия в уровне подавления при различных показателях  $K$  (частота квантования и длительность импульса одинаковы). При  $K = 1,13$  величина подавления в зоне  $M$  составляет  $-300$  дБ, что лучше согласованной фильтрации в 6 раз, за пределами зоны  $M$  результаты близки к согласованной фильтрации. При  $K = 1,36$  величина подавления в зоне  $M$  составляет  $-270$  дБ, за пределами зоны  $M$  результаты хуже, чем при согласованной фильтрации. Пики весовых функций составляют 0,024 и 0,008, можно сделать вывод, что при изменении  $K$  пики отличаются в три раза в пользу минимального значения  $K$ , это говорит о том, что полоса пропускания лучше в три раза для показателя  $K = 1,13$ .

Полоса подавления (боковые лепестки) для  $K = 1,36$  примерно совпадают со значениями полосы пропускания, следовательно, для фильтрации большие значения показателя  $K$  не подходят.

Обобщив результаты испытаний, можно сделать вывод что на качество подавления в большей степени влияет показатель  $K$ : для его оптимальных значений нет корреляции потерь от ширины зоны  $M$ , незначительные ухудшения появляются лишь на краях диапазона. Для большого (нежелательного) показателя  $K$  наблюдается значительная корреляция уровня полезного сигнала от величины

зоны  $M$  и от длительности импульса (ухудшается примерно в два раза). Максимальное значение весовой функции уменьшается при увеличении длительности сигнала и линейно появляется линейная зависимость при значении  $K = 1,36$  (нежелательное).

## Список литературы

1. *Медведев С.Б., Шапошников В.И., Чекмазова О.А.* Результаты моделирования и оценка характеристик отраженных от протяженных объектов сигналов с линейной частотной модуляцией. Доклад на VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», Москва, АО «Российские космические системы», 2015.
2. *Шишанов А.В., Шапошников В.И.* Повышение информационной эффективности и априорная оценка качества работы РСА. Доклад на VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», Москва, АО «Российские космические системы», 2013.
3. *Воеводин В.В.* Вычислительные основы линейной алгебры. М.: Наука, 1977.
4. *Кук Ч., Бернфельд* Радиолокационные сигналы. М.: Сов. радио, 1971. 214 с.