

УДК 621.391

Результаты моделирования и оценка характеристик отраженных от протяженных объектов сигналов с линейной частотной модуляцией

С. Б. Медведев, В. И. Шапошников¹, О. А. Чекмазова

¹к. т. н., АО «Научно-исследовательский институт точных приборов»

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

Аннотация. Предметом исследования статьи являются алгоритмы весовой обработки импульсных сигналов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) в радиотехнической системе измерения параметров относительного движения, используемой для стыковки космических аппаратов.

Цель работы — увеличение эффективности работы системы за счет подавления мешающих сигналов, отраженных от элементов крупногабаритной конструкции, например международной космической станции, которые приходят в одном временном интервале вместе с полезным сигналом, несущим информацию о параметрах относительного движения, что может недопустимо снизить точность измерения этих параметров. Задача обработки принимаемого сигнала сводится к нахождению оптимальной весовой функции, найденной по критерию минимума потерь в отклике по полезному сигналу и максимуму подавления всех мешающих сигналов. Для разработанного оптимального алгоритма проведен анализ зависимости величины «потерь» из-за рассогласования весовой функции, связанной с цифровой обработкой сигнала, от длительности импульса, частоты девиации, частоты квантования и коэффициента K (отношение частоты девиации к частоте квантования). Результаты представлены в сравнении с согласованной обработкой.

Ключевые слова: стыковка, линейная частотная модуляция, многолучевость, несогласованная фильтрация, частота девиации, частота квантования

The Results of the Modeling and Estimate of the Characteristics of the Signals with Linear Frequency Modulation Reflected from the Spread Objects

S. B. Medvedev, V. I. Shaposhnikov¹, O. A. Chekmazova

¹candidate of engineering science, Joint-Stock Company “Research Institute of Precision Instruments”

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

Abstract. The article contains the study of the algorithms of the weight impulse-type signal processing with linear frequency modulation in the radio engineering measurement system of parameters relative to the movement used for space vehicles docking. The aim of work is to increase the system working capacity due to eliminating the spurious signals reflected from the large-sized construction elements, for example from the International Space Station. Such spurious signals are received in the same time interval together with the useful signal that contains the data on the relative movement parameters. This can reduce the measurement accuracy of these parameters. In order to eliminate this effect, there was selected an broadband impulse signal with linear frequency modulation and digital processing of the received signal. Deterioration of the measurement accuracy caused by the sidelobes of the correlation function leads to the necessity to examine different ways of their reducing with the help of so called “mismatched reception” which has a distinctive feature of losses caused by the discrepancy. This work contains the research on measuring these losses depending upon the relation $F_{KV}/F_{DEV} = K$. Moreover, the best value of K when using this filter was found.

Keywords: space vehicles docking, linear frequency modulation, multipath effect, mismatched filtering, deviation frequency, sampling frequency

Введение

В задачах определения положения крупногабаритных космических объектов (КО) на вход фильтра тракта обработки поступает смесь полезного сигнала, сумма переотраженных сигналов и шума приемника. В результате в точке приема наблюдается мешающий сигнал, состоящий из множества сигналов, пришедших по разным траекториям за счет многолучевого распространения радиоволн, и существенно снижающий показатели системы взаимных измерений поиска сближения и стыковки (СВИ ПСС) по точности измерения параметров траектории сближения КА и КО.

При разработке СВИ ПСС появляется задача минимизации ошибок измерения из-за наличия боковых лепестков (БЛ) функции автокорреляции излучаемого сигнала. В известной литературе работы по снижению БЛ отклика на временной оси ведутся в нескольких направлениях:

1. Применение методов весовой обработки [4, 5], при использовании которых главный лепесток отклика расширяется, а его значение в максимуме уменьшается.

2. Модификация сигналов с ЛЧМ, предусматривающая введение относительно небольшой нелинейности [1], что позволяет достичь эффектов, подобных весовой обработке.

3. Осуществление несогласованной обработки, основанной на использовании специально определенной опорной функции.

В [3] содержится вывод о том, что весовая обработка в приемнике является более эффективным методом, чем весовая обработка в передатчике, поскольку управление огибающей на выходе мощных передатчиков существенно затруднено.

В случае использования несогласованной фильтрации возникает проблема поиска оптимальных параметров фильтра. Такая задача встречается:

- в вопросах оценки параметров сигналов, принимаемых в условиях белого шума со связанными переотраженными помехами, многолучевостью;
- при наблюдении большого числа некооперируемых объектов;
- при проектировании РЛС с синтезированной апертурой;

- при формировании частотно-амплитудного распределения по раскрытию активных фазированных антенных решеток (АФАР) с зонами повышенного подавления переотраженных сигналов.

Исследуемой характеристикой фильтра является частота квантования $F_{\text{кв}}$, позволяющая получить минимальные потери из-за рассогласования для различных значений частоты девиации $F_{\text{дев}}$ и длительности импульса τ . Отношение частоты квантования к частоте девиации принимается за коэффициент $K = F_{\text{кв}}/F_{\text{дев}}$.

Принцип выделения сигналов, заложенный в предлагаемом методе, основан на использовании модели принятого сигнала в виде матрицы, в которой сигналы представлены как числовые векторы в комплексном пространстве, и нестатистических методов обработки путем оценки функций взаимной корреляции принятых пространственно-разнесенных сигналов. Для поиска оптимального решения поставленных задач проводились компьютерное моделирование и серия экспериментов в среде *MatLab*.

Целью данной работы является, учитывая особенности требований к работе системы стыковки КА, определение оптимальных параметров сигнала с ЛЧМ путем компьютерного моделирования.

Свойства ЛЧМ-сигнала и описание компьютерной модели

При исследовании использовался сигнал с линейной частотной модуляцией. При выборе сигнала исходили из того, что этот сигнал применяется в большинстве современных систем, поскольку обладает рядом полезных свойств, включая простоту реализации и возможность существенного сжатия сигнала при приеме с увеличением его амплитуды над уровнем помех.

Определение с помощью моделирования наилучших параметров ЛЧМ-сигнала таких, как длительность импульса τ , частота девиации $F_{\text{дев}}$, частота квантования $F_{\text{кв}}$, отношение $F_{\text{кв}}/F_{\text{дев}} = K$, позволяет получать необходимые параметры в отклике «рассогласованного» фильтра, а именно:

- ширину основного лепестка (расстояние между 0 и пересечением основного лепестка временной оси — крайней точкой);

- интегральный уровень боковых лепестков на выходе фильтра сжатия;
- потери «рассогласования»;
- максимальный размер зоны наибольшего подавления;
- минимальный уровень боковых лепестков вне зоны наибольшего подавления фильтра сжатия.

Подробное описание работы компьютерной модели дано в [5]. Для понимания работы системы ниже приводится сжатое описание функционирования алгоритма поиска оптимальных параметров фильтра ЛЧМ-сигнала.

Модель излучаемого ЛЧМ-сигнала — $S(t) = a \cos \left(\omega_0 t + \frac{\pi F_{\text{ДЕВ}} t^2}{\tau_{\text{ИМП}}} \right)$.

Эквивалентное комплексное представление имеет вид $\dot{S}(t) = a \exp \frac{j\pi F_{\text{ДЕВ}} t^2}{\tau_{\text{ИМП}}}$.

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 $\bar{S}_{ij} = [(\alpha_{i1}, \varphi_{i1}), (\alpha_{i2}, \varphi_{i2}) \dots (\alpha_{in}, \varphi_{in})]$ — нормированный, центрированный излучаемый сигнал, где α_{ij} — неизвестная амплитуда, φ_{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: построить оптимальный фильтр (опорную функцию), используя критерий оптимальности — получение максимума отклика на анализируемый сигнал при подавлении мешающих сигналов до некоторого уровня ε (или нуля).

Принимаемый сигнал $y_k(t_j) = \alpha_k \bar{S}_{kj} + \sum_{i=1; i \neq k}^m \alpha_i \bar{S}_{ij} + \bar{u}(t_j)$, где $j = 1, 2, \dots, 2n$, $m = 2n - 1$.

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

Алгоритм обработки.

Ищется оптимальный опорный вектор $\bar{P}_{0j} = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ такой, что $\bar{S}_{kj}, \bar{P}_{0j} = \max$ при условии $\left(\sum_{i=1; i \neq k}^m \alpha_i \bar{S}_{ij}, \bar{P}_{0j} \right) \begin{cases} < \varepsilon \\ \text{или} \\ = 0. \end{cases}$

Если считать, что рассматриваемое множество сигналов имеет интервал корреляции $\sim \frac{1}{\Delta F}$ и $f_{\text{КВ}} > 2\Delta F$ (ΔF — полоса сигнала), то рассматриваемая матрица (S_{ij}) будет иметь размерность $m \times n$, где $m < n$, опорный вектор \bar{P}_{0j} в этом случае имеет вид

$$\bar{P}_{0j} = \left\{ E - (S_{ij})_{-k}^T [(S_{ij})_{-k} (S_{ij})_{-k}^T]^{-1} \cdot (S_{ij})_{-k} \right\} \times \bar{S}_{kj}^T, \quad (1)$$

где $(S_{ij})_{-k}$ — матрица (S_{ij}) без k -й строки.

Отклик фильтра, построенного с использованием (1), может быть представлен в виде

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

Для получения аналитической базы исследования был проведен ряд экспериментов с различными значениями перечисленных параметров ЛЧМ-сигнала. При этом программа эксперимента строилась таким образом, что на каждом шаге варьировался только один параметр, а остальные сохранялись постоянными. Это было сделано для того, чтобы выявить, какой из исследуемых параметров в наибольшей мере определяет результат: контролировались значения потерь и вид функции отклика. По каждому эксперименту были построены соответствующие аналитические графики.

Результаты моделирования

Модель описывает принятый сигнал в виде матрицы, строки которой являются отраженными сигналами от конструкции космического аппарата, определяемой выбранным уровнем корреляции между соседними строками-сигналами этой матрицы. Учитывая цифровой метод обработки сигналов и наличие квадратурных смесителей на входе приемника, сигналы каждой строки этой матрицы могут быть представлены как числовые векторы в комплексном пространстве. Задачей моделирования является определение технического параметра K , в зависимости от $F_{\text{ДЕВ}}$, $F_{\text{КВ}}$ и $\tau_{\text{ИМП}}$ позволяющего получить минимальный уровень потерь рассогласования.

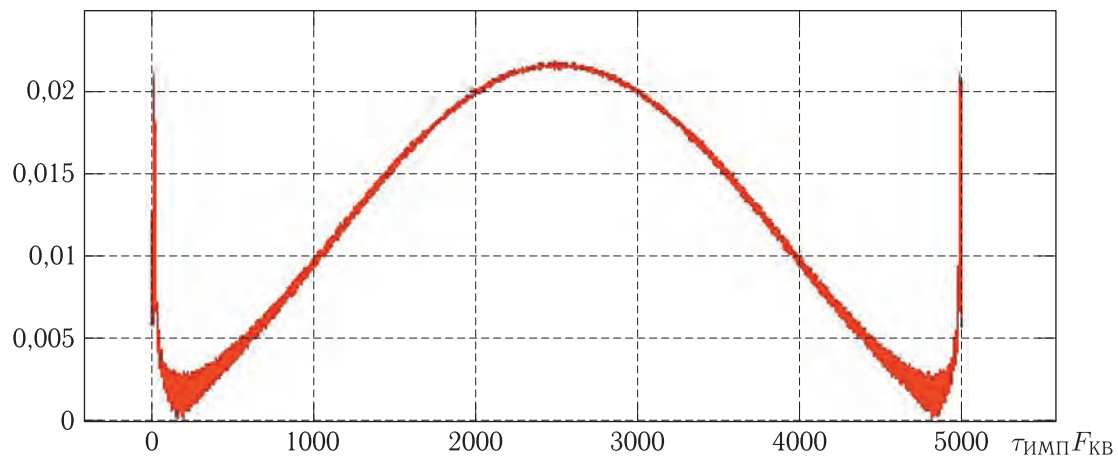


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика опорного вектора

Для получения характера зависимостей и выявления параметров, влияющих в наибольшей степени, была проведена серия экспериментов. При этом варьируемые параметры проходили заранее выбранную «сетку» анализируемых значений, построенную для частоты девиации, частоты квантования и длительности импульса. Данные варьировались в пределах:

- $F_{\text{КВ}} = 300\text{--}600$ МГц;
- $F_{\text{ДЕВ}} = 205\text{--}560$ МГц (что соответствует значениям показателя $K = 1,07\text{--}1,46$);
- $\tau = 10\text{--}40$ мкс.

Далее приведены результаты моделирования для модели сигнала с частотой квантования $F_{\text{КВ}} = 500$ МГц, частотой девиации $F_{\text{ДЕВ}} = 442$ МГц ($K = 1,13$) и длительностью импульса $\tau = 10$ мкс.

Амплитудно-частотная характеристика (рис. 1) опорного вектора представляет собой распределение с максимумом в области нулевой частоты, спадающее к краям, и стремится к максимальному значению в области краевых точек (наибольших частот в спектре).

Отклик фильтра, приведенный на рис. 2, изображен в сравнении со случаем согласованной фильтрации. Из графика видно, что при использовании несогласованной фильтрации возможно получить хорошую область устойчивой зоны максимального подавления, порядка -300 дБ.

В основе алгоритма решения лежит математический аппарат [2], используемый при решении большой (несколько тысяч) системы линейных

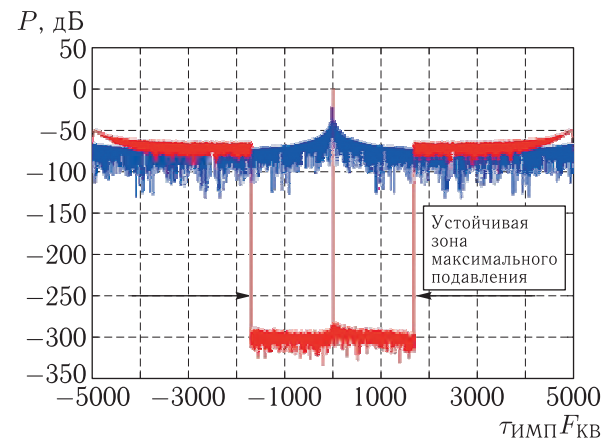


Рис. 2. Отклики согласованного (синий цвет) и исследуемого (красный цвет) фильтров

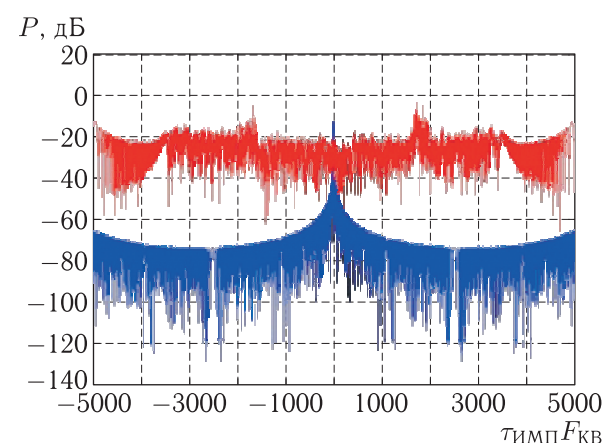


Рис. 3. Отклики согласованного (синий цвет) и исследуемого (красный цвет) фильтров в условиях нарушения алгоритма решения уравнений

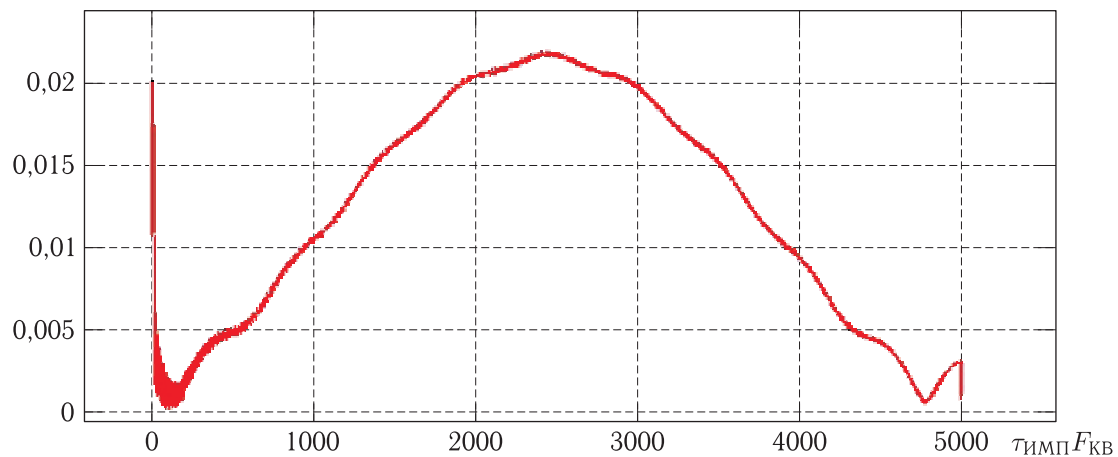


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика опорного вектора (физическое моделирование)

уравнений, при этом если количество уравнений в системе становится больше определенного порога, то система становится неустойчивой и подавление пропадает. На рис. 3 красным цветом изображен отклик искомого фильтра при количестве уравнений в решаемой системе, превышающем треть часть от величины $1/3\tau_{\text{ИМП}} F_{\text{КВ}}$.

Приведенные 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.

Следует отметить, что для физического моделирования условие решаемости системы уравнений иное: количество уравнений в системе не должно быть больше половины величины $\tau_{\text{ИМП}} F_{\text{КВ}}$. На рис. 5 изображен отклик фильтра, а на рис. 6 приведен масштабированный участок зоны для наибольшего подавления.

При каждом эксперименте регистрировался уровень полезного сигнала, уровень потерь.

Анализ полученных данных

Для получения аналитических данных была проведена серия экспериментов для значений частот квантования, лежащих в диапазоне от 300 МГц до 600 МГц и соответствующих им частот

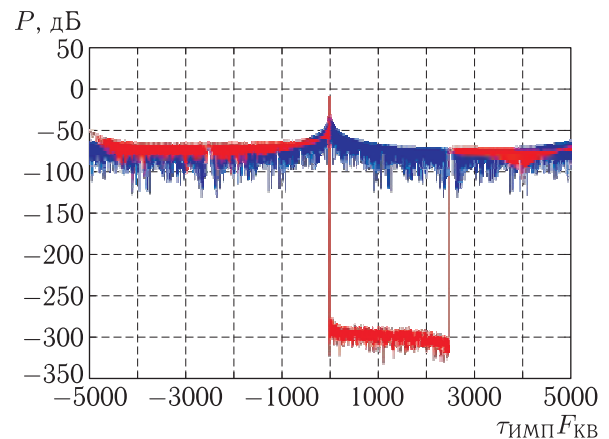


Рис. 5. Отклики согласованного (синий цвет) и исследуемого (красный цвет) фильтров для случая физического моделирования

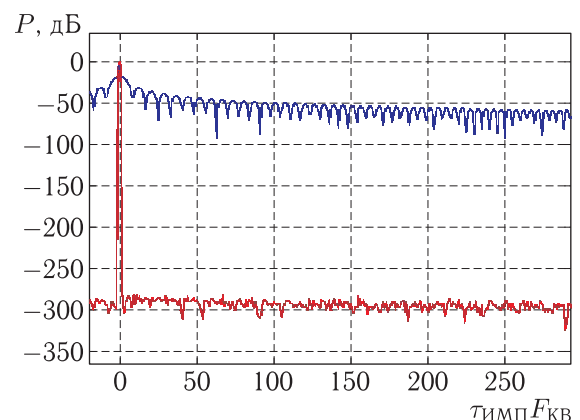
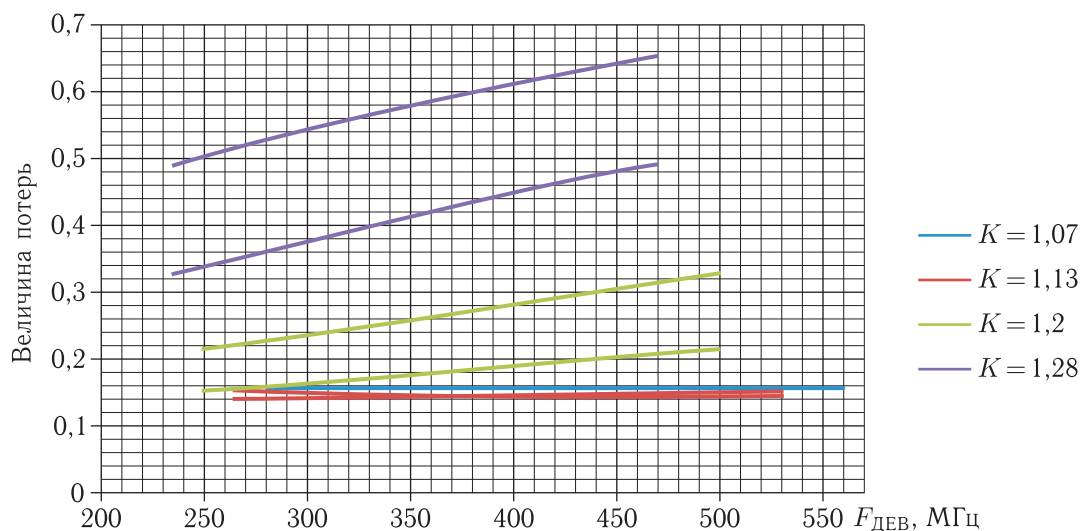
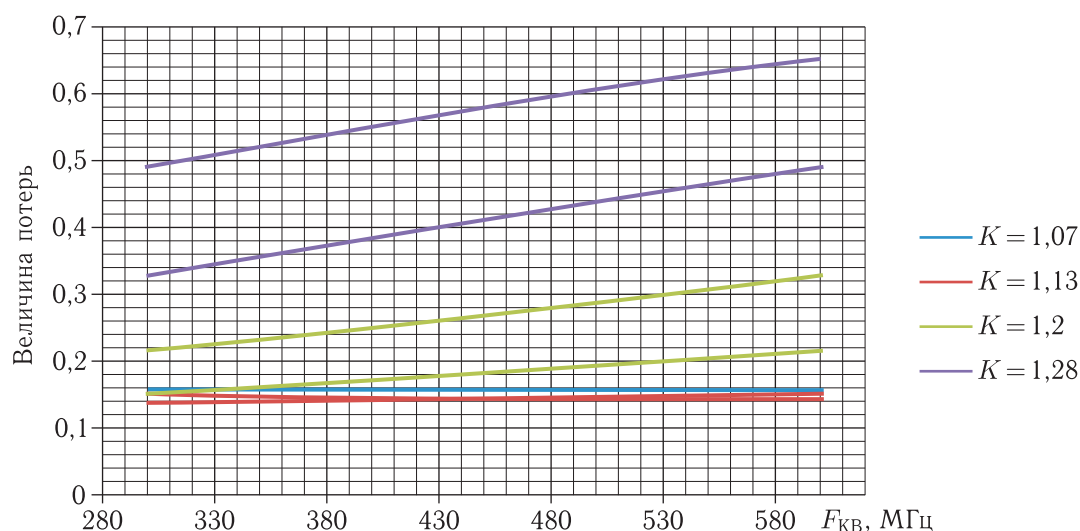


Рис. 6. Отклики согласованного (синий цвет) и исследуемого (красный цвет) фильтров при физическом моделировании

Рис. 7. Зависимость уровня потерь от частоты девиации для различных K (математическое моделирование)Рис. 8. Зависимость уровня потерь от частоты квантования для различных K (математическое моделирование)

девиации от 205 МГц до 560 МГц, длительность импульса τ варьировалась от 10 мкс до 30 мкс.

Все значения заносились в сводную таблицу, анализ которой нашел графическое представление. Полученные распределения позволяют выявить частотную зависимость результатов, определить зоны с максимальным уровнем сигнала и соответствующие им значения параметров ЛЧМ-сигнала.

Для наглядной демонстрации результатов эксперимента показаны сравнительные графики, построенные для математического и физического моделирования.

Результаты математического моделирования

На графиках зависимостей потерь (в долях, ось ординат) от частоты девиации (ось абсцисс) (рис. 7) и частоты квантования (рис. 8) наблюдается спад амплитуды сигнала при увеличении значения показателя K . Для малых значений показателя K частотной зависимости не наблюдается, в то время как при $K > 1,2$ с увеличением частоты уровень полезного сигнала падает. Также наблюдается незначительная потеря сигнала при увеличении длительности τ .

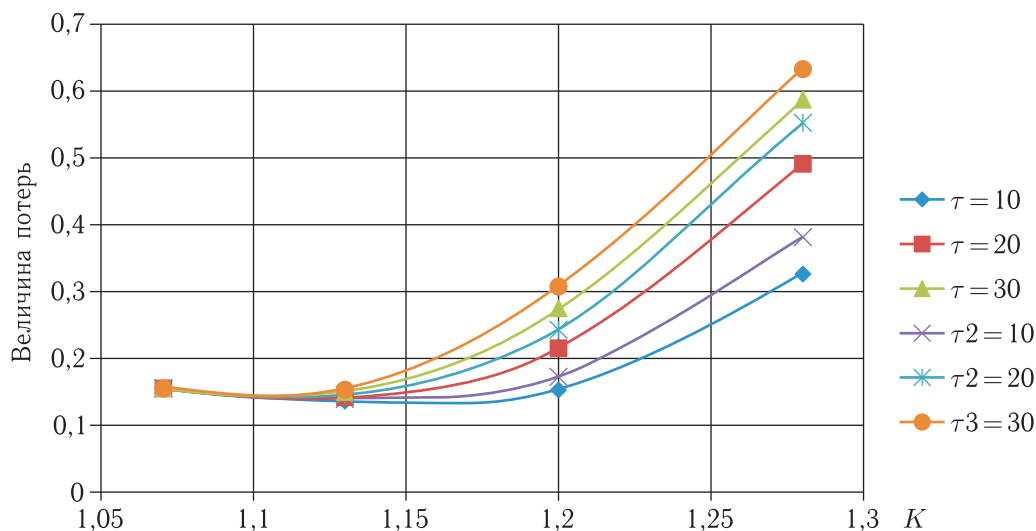


Рис. 9. Зависимости для частоты квантования 300 МГц (τ) и 400 МГц (τ_2)

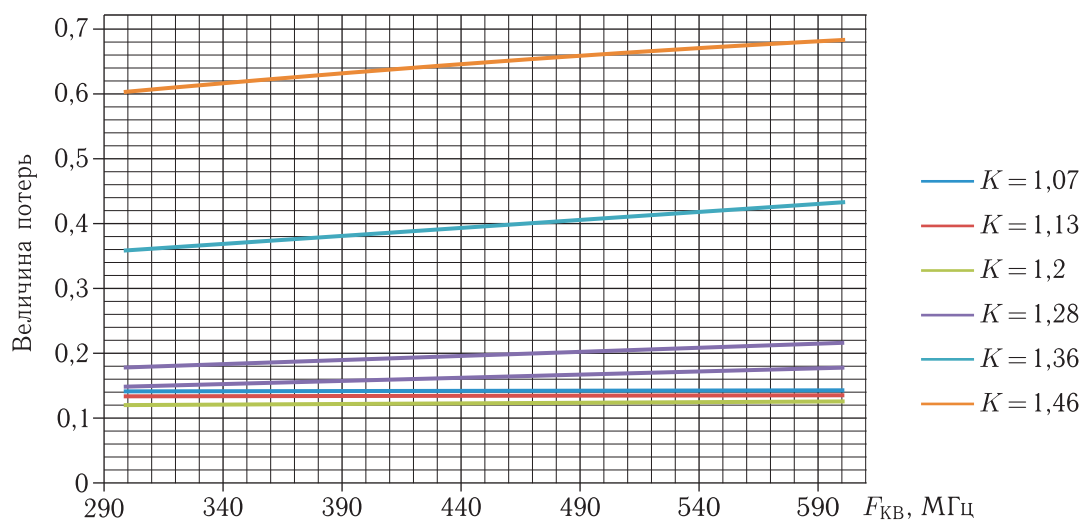


Рис. 10. Зависимость потерь от частоты квантования для различных K при физическом моделировании

Рис. 9 демонстрирует зависимость величины потерь от показателя K . В случае математического моделирования участок 1,07–1,15 является наиболее гладким, следовательно, рекомендованным, далее виден заметный спад характеристик, следовательно, потеря полезного сигнала.

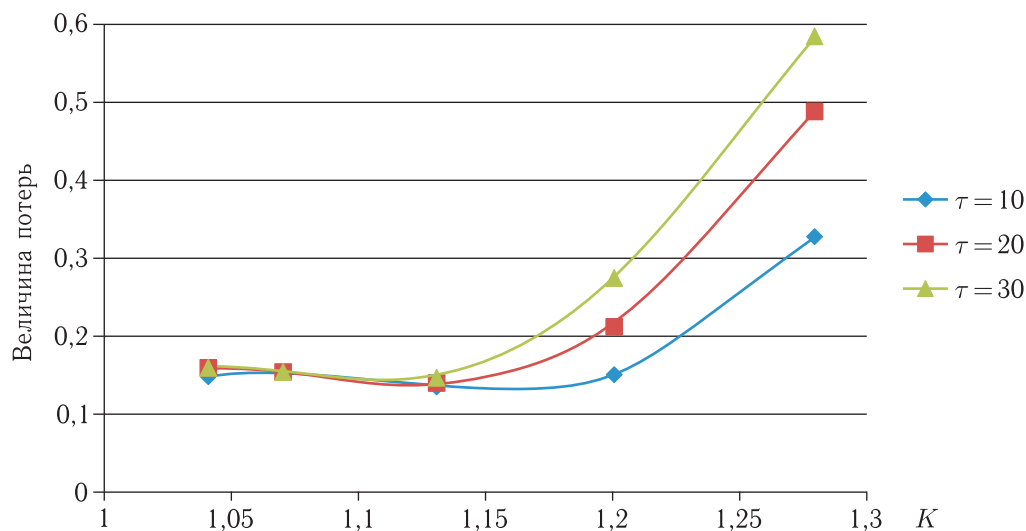
Аналитические зависимости для физического распределения

Физическое моделирование позволяет получить аналогичный эффект, единственное различие

заключается в том, что область частотно-независимых результатов находится при показателе $K \leq 1,2$.

Результаты для физического моделирования приведены на рис. 10, 11.

Анализ полученных графиков показал, что при малом коэффициенте K (1,07–1,2) величина потерь практически не зависит от частоты квантования и составляет примерно 0,12–0,14%, в то время как при увеличении K ($K > 1,2$) потери полезного сигнала увеличиваются на 20% с каждым увеличением K на 0,1. Как видно из приведенных графиков, при значении $K = 1,36$ величина потерь увеличилась приблизительно в 3 раза по сравнению

Рис. 11. График зависимости потерь от отношения $K = F_{\text{кв}}/f_{\text{дев}}$

со значениями, получаемыми при малых коэффициентах. При $K=1,46$ уровень потерь возрос в пять раз. Таким образом, можно сделать вывод, что наиболее выгодными, с точки зрения получения полезной информации из принятого сигнала, является показатель отношения частоты квантования к частоте девиации, равный 1,07–1,2. При этом показателе зависимости потерь от частоты квантования в рекомендуемом диапазоне практически не наблюдается.

Таким образом, можно сделать вывод, что существенным фактором, оказывающим влияние на результаты, является показатель $K = F_{\text{кв}}/F_{\text{дев}}$ (отношение частоты квантования к частоте девиации), оптимальные значения которого лежат в диапазоне 1,07–1,2. Эти результаты можно относить только к обработке множества ЛЧМ импульсных сигналов. Полученные результаты в известной нам зарубежной и отечественной литературе не встречались.

Список литературы

1. Воеводин В. В. Вычислительные основы линейной алгебры. М.: Наука, 1977.
2. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. М.: Сов. радио, 1971. 214 с.
3. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
4. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Сколкина. Том 3. Радиолокационные устройства и системы. Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1978.
5. 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». М.: ОАО «Российские космические системы», 2013.