

УДК 621.391, 621.396

И. Б. Чернова, В. А. Пахотин, В. А. Бессонов

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ РАДИОИМПУЛЬСА НА ФОНЕ ПОМЕХ

Представлены результаты модельных исследований возможностей фильтрации радиоимпульса на фоне сосредоточенной по частоте помехи методом максимального правдоподобия. Основой являются положения теории оптимального приема и представления линейного пространства сигналов. Показана однозначность решения задачи фильтрации как в области ортогональности сигнала и помехи, так и в области их неортогональности. Представлена оценка динамического диапазона фильтрации.

Presents the results of model studies of the possibilities of a filtration of pulse centered on the background frequency interference maximum likelihood method. Basis are the principles of the theory of optimal reception and submission of the linear space of signals. Shows odnosno-ness of the solution of the filtering problem in the field of orthogonality of signal and noise, and their reorthogonalize . Submitted to evaluation of the dynamic range of the filter.

Ключевые слова: фильтрация, оптимальный прием, метод максимального правдоподобия, линейное пространство сигналов.

Key words: filtering, optimal reception, the method of maximum likelihood, linear space of signals.

Фильтрация сигналов на фоне помех является актуальной областью исследований. Об этом свидетельствует большое количество статей в периодической печати [1–3]. Количество помех радиоприему посто-



янно растет в связи с ростом работающих радиостанций и постепенным переходом к широкополосным и сверхширокополосным сигналам. Теория и практика фильтрации сигналов на фоне помех связаны с анализом сигналов и помех в частотной области. В настоящее время хорошо известны согласованные по частотам фильтры — оптимальные фильтры. Переход к цифровым фильтрам позволил существенно увеличить эффективность фильтрации сигналов. В данной работе предлагается новый подход к решению задачи фильтрации. Он основан на положениях теории оптимального приема и представлениях линейного пространства сигналов. В результате возникают фильтры нового типа, которые могут отфильтровывать помеху, частично совпадающую со спектром сигнала. Теория данного вопроса представлена в [4]. Здесь даны результаты модельных исследований возможностей фильтрации новыми фильтрами.

В модельных расчетах принято следующее. Амплитуда сигнала и помехи равны $U_c = 2$, $U_n = 1,5$, начальные фазы $\varphi_c = 30^\circ$, $\varphi_n = 80^\circ$, частоты $f_c = 450$ кГц, $f_n = 455$ кГц. Обработка ведется на интервале длительности радиоимпульса $T = 0,35$ мс с дискретностью отсчетов $\Delta t = 0,2$ мкс. Интервал корреляции принят равным $\tau_k = \Delta t$.

На рисунке 1 показаны принятое сообщение с отношением сигнал/шум = 10 дБ (слева), поверхность функционала правдоподобия

$$\Delta l(\omega'_c, \omega'_n) = \frac{1}{\Delta l(\omega'_c, \omega'_n)} \tag{1}$$

(в центре), спектр принятого сообщения (справа). Различие частот сигнала и помехи в 5 кГц достаточно для выполнения условия Рэлея. Поверхность обратного функционала правдоподобия имеет лишь один максимум, что подтверждает однозначность решения. В области Рэлеевского разрешения спектральные линии сигнала и помехи разделены.

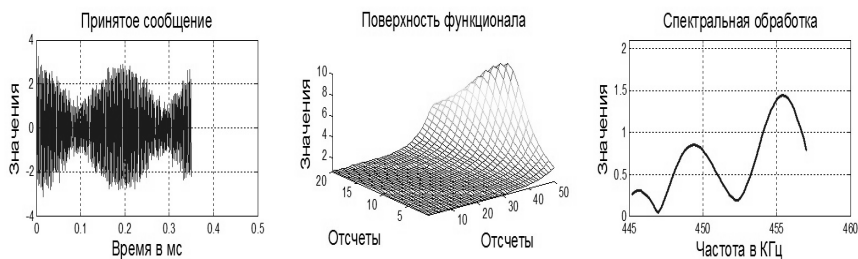


Рис. 1. Принятое сообщение (слева), поверхность функционала правдоподобия (1) — в центре, спектр принятого сообщения (справа). Отношение сигнал/шум = 10 дБ. Сигнал и помеха в области ортогональности

На рисунке 2 показан случай сильной неортогональности сигнала и помехи. Разность частот составляет 1 кГц. Принятое сообщение содержит лишь менее четверти периода биений (слева на рисунке). Поверхность функционала правдоподобия характеризуется достаточным максимумом для оценки всех параметров сигнала и помехи (в центре). Спектр принятого сообщения содержит лишь одну совместную линию, подтверждая высокую корреляцию между сигналом и помехой.

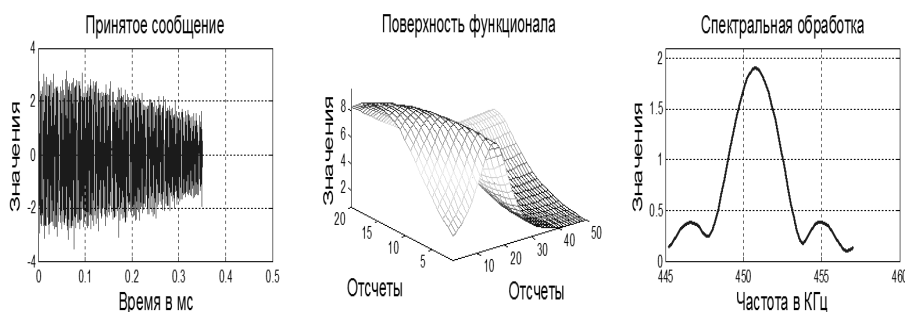


Рис. 2. Принятое сообщение (слева), поверхность функционала правдоподобия (в центре), спектр принятого сообщения (справа).

Отношение сигнал/шум = 10 дБ.

Сигнал и помеха в области неортогональности

На рисунке 3 дана статистика амплитуд сигнала и помехи (слева), статистика частот сигнала и помехи (в центре) и изменения коэффициента корреляции между сигналом и помехой (справа). В данном случае частота помехи изменялась от значения $f_n = 430,3$ кГц до значения $f_n = 455,3$ кГц. В результате создавались условия сильной неортогональности между сигналом и помехой (критерий Релея не выполняется) и условия слабой неортогональности (критерий Релея выполняется). Статистика частот (центральный рисунок) показывает возможность отдельных оценок вплоть до разности частот $\Delta f \approx 0,3$ кГц. Поэтому предельная возможность разрешения сигнала и помехи увеличивается ~ 5 раз по сравнению с Релеевским разрешением ($\Delta f \approx 1,5$ кГц). Статистика амплитуд (ряд 3 слева) подтверждает возможность их оценок при разности частот между сигналом и помехой $\Delta f \approx 0,3$ кГц. Модуль коэффициента корреляции (справа) между сигналом и помехой определяет возможную область решения задачи фильтрации радиоимпульса на фоне помехи. Эта область определяется единственным параметром – модулем коэффициента корреляции между сигналом и помехой. Предельное значение модуля коэффициента корреляции достигает значения $|\hat{R}| = 0,9$. При этом дисперсия (Рао-Крамера) как амплитуд, так и частот увеличивается на 7 дБ по сравнению со случаем, когда $|\hat{R}| = 0$.

Рисунок 4 иллюстрирует возможности динамического диапазона при фильтрации сигнала. На рисунке показана статистика оценочных амплитуд сигнала и помехи (слева) и статистика оценочных частот (в центре) при изменении частоты помехи. Амплитуда сигнала в этом случае равна 0,2. Амплитуда помехи равна 1,5. Рисунок иллюстрирует возможность полного исключения помехи даже при семикратном превышении амплитуды помехи по сравнению с амплитудой сигнала.



В принципе ограничения динамического диапазона снизу возникает лишь за счет уровня шума. Это существенное отличие данной технологии фильтрации от технологии режекторных фильтров.

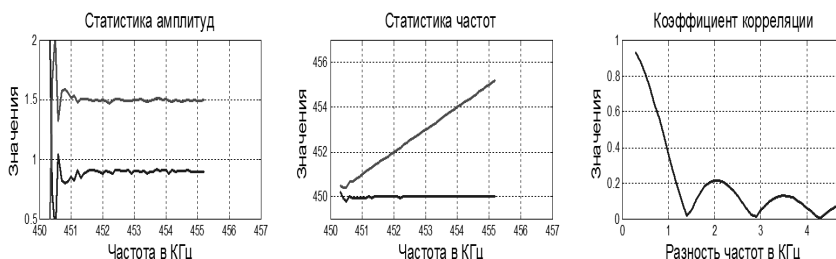


Рис. 3. Статистика оценок амплитуд сигнала и помехи (слева), статистика частот сигнала и помехи (в центре). Коэффициент корреляции между сигналом и помехой (справа) в зависимости от частоты помехи. Отношение сигнал/шум = 10 дБ

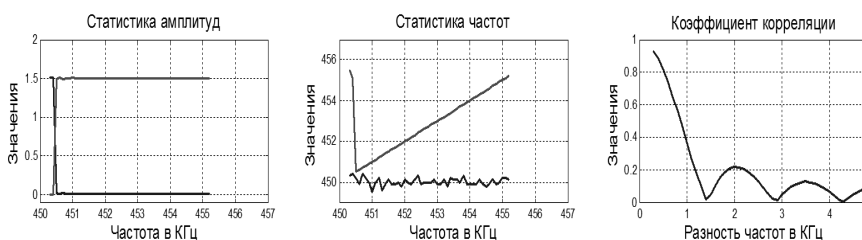


Рис. 4. Статистика оценок амплитуд и частот помехи и сигнала при отношении амплитуды помехи к амплитуде сигнала 1,5/0,01. Отношение сигнал/шум = 30 дБ

В настоящей работе представлена новая технология решения задачи фильтрации радиоимпульса на фоне сосредоточенной по частоте помехи. Основой стали положения теории оптимального приема и положения линейного пространства сигналов. Они позволяют с позиции векторного представления сигнала и помехи оценить возможности исключения помехи из принятого сообщения. При этом изменения модуля коэффициента корреляции между сигналом и помехой в пределах $0 \div 0,9$ полностью определяет рабочую область решения задачи. Динамический диапазон новой технологии фильтрации ограничен снизу уровнем шума. Представленная технология решения задачи фильтрации сигнала (радиоимпульса) на фоне сосредоточенной по частоте помехи расширяет возможности фильтрации и может быть распространена на другие виды помех (например, импульсных).

Список литературы

1. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 1988.
2. Цифровые фильтры в электросвязи и радиотехнике. М., 1982.
3. Оптимальный прием сигналов на фоне помех и шумов. М., 2011.



4. Пахотин В. А., Чернова И. Б., Власова К. В. Фильтрация сигнала на фоне помех методом максимального правдоподобия // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2015. Вып. 8. (В печати).

Об авторах

Инна Борисовна Чернова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: ICHernova@kantiana.ru

Валерий Анатольевич Пахотин – д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Владимир Александрович Бессонов – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.
E-mail: VBessonov@kantiana.ru

About the authors

Inna Chernova – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: ICHernova@kantiana.ru

Prof. Valery A. Pakhotin – I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: VPakhotin@kantiana.ru

Vladimir Bessonov – PhD, Ass. Prof., I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.
E-mail: VBessonov@kantiana.ru