УДК 629.7.036

ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ КА С ЭРД

© 2019 г. Н. А. Важенин[1, *], А. П. Плохих[1], Г. А. Попов[1]

[1]*Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (НИИ ПМЭ МАИ), Москва, Россия*

**e-mail: riame@sokol.ru*

Поступила в редакцию 09.04.2019 г.
После доработки 12.04.2019 г.
Принята к публикации 16.04.2019 г.

Рассматривается применение современных методов обработки сигналов для повышения помехоустойчивости радиотехнических систем КА с ЭРД. Обсуждается принцип борьбы с помехами СПД, основанный на адаптивном выделении характерных составляющих процесса излучения во временной области, их вырезании и двухэтапной интерполяции комплексной огибающей принимаемого сигнала. Рассматривается алгоритм функционирования разработанного квадратурного компенсатора импульсных помех в составе канала цифровой радиолинии связи Земля–КА с модуляцией ФМн-2 (FBPSK). Для анализа эффективности разработанного алгоритма используется метод имитационного моделирования с реализацией математической модели канала радиосвязи в среде MATLAB/Simulink. Результаты получены как для идеальной фазовой и символьной синхронизации, так и для случая работы систем фазовой и символьной синхронизации (алгоритм Гарднера). Показано, что энергетический выигрыш от использования предложенного алгоритма квадратурного компенсатора импульсных помех в условиях воздействия теплового шума и радиоизлучения СПД может достигать 3 дБ при ОСИП 10 дБ и 7 дБ при ОСИП 5 дБ.

Ключевые слова: стационарные плазменные двигатели, электромагнитное излучение, имитационное моделирование. компенсаторы помех

DOI: 10.1134/S0002331019030130

Современные космические аппараты (КА) широко используют электрические ракетные двигатели (ЭРД) как для управления ориентацией и коррекции орбиты КА, так и в качестве маршевых двигателей. Проведенные исследования показывают, что ЭРД, в частности, стационарные плазменные двигатели (СПД), кроме теплового шумового излучения, могут формировать радиоизлучение в виде случайной импульсной последовательности (СИП) шумоподобных сигналов [1]. В связи с этим представляются важными разработка и анализ методов компенсации деструктивного воздействия случайных импульсных помех, создаваемых ЭРД, на бортовые радиотехнические системы КА. В особенности это важно для систем связи, работающих на пределе энергетических возможностей, например, для систем дальней космической связи. Проведенные анализ и моделирование показывают, что влияние импульсных помех, формируемых СПД, может приводить к существенному ухудшению показателей качества передачи информации [3]. Известно большое количество методов борьбы с импульсными помехами (ИП): амплитудная селекция с ограничением снизу и сверху, амплитудная селекция по уровню, амплитудно-частотная селекция или “широкая по-

лоса–ограничитель–узкая полоса” (ШОУ), “широкая полоса–ограничитель–режектор” (ШОР), “широкая полоса–прерыватель–узкая полоса” (ШПУ), ШПУ+ШОР и т.д. [4]. В основном все они сводятся к использованию различного вида амплитудных ограничителей, установленных перед согласованным фильтром. Наиболее известным алгоритмом является алгоритм ШОУ, в котором принимаемый сигнал после фильтрации в широкой полосе приемника подвергается амплитудному ограничению, а затем фильтрации в полосе, согласованной со спектром информационного сигнала (т.е. в согласованном фильтре). Данный алгоритм борьбы с импульсными помехами показал достаточно высокую эффективность и широко используется на практике в случае, когда ширина спектра помехи много больше ширины спектра информационного сигнала. Достоинством этого алгоритма является также относительная простота технической реализации. Ниже в качестве эталона будет рассматриваться вариант реализации алгоритма ШОУ в виде квадратурного ограничителя импульсных помех (КОИП) [5].

В настоящее время развитие технических средств обработки сигналов позволяет реализовать более сложные алгоритмы компенсации влияния импульсных помех: например, такой, как квадратурный компенсатор импульсных помех (ККИП), описанный в [6], [7], [8]. Далее на основе методов имитационного моделирования [9] проводится сопоставительный анализ эффективности алгоритмов КОИП и ККИП и рассматриваются вопросы оптимизации выбора их параметров.

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КВАДРАТУРНОГО КОМПЕНСАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

ККИП осуществляет выделение и подавление импульсов СИП. Общая упрощенная блок-схема ККИП, поясняющая принцип его работы, приведена на рис. 1. Более подробно алгоритм работы ККИП изложен в [5], [6], [7], [8].

После переноса принимаемой смеси полезного сигнала, шумовой и импульсной помех на нулевую частоту в квадратурном смесителе и ее оцифровки в квадратурном аналого-цифровом преобразователе (АЦП) на входе ККИП имеется оцифрованная комплексная огибающая принимаемого сигнала, которая обычно представляется в виде отсчетов синфазной и квадратурной компонент сигнала на нулевой частоте.

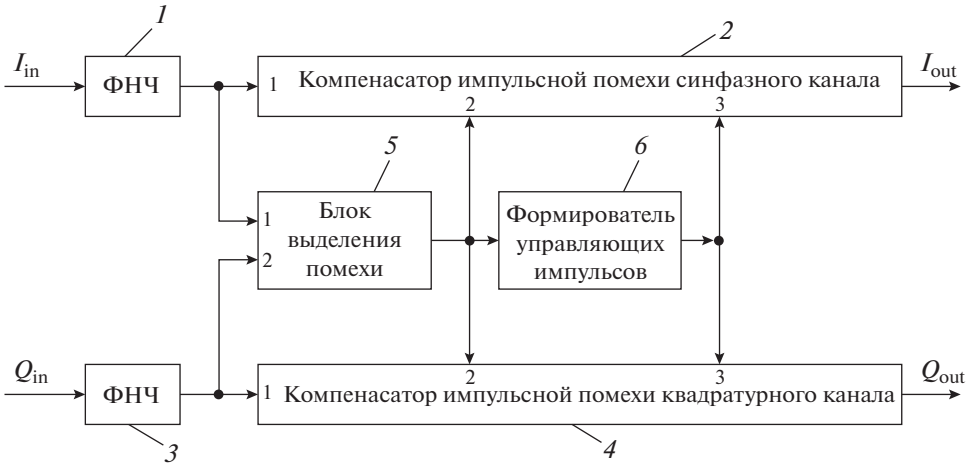

Рис. 1. Блок-схема ККИП.

Данный сигнал поступает на два квадратурных канала, в каждом из которых осуществляется предварительная фильтрация (блоки 1 и 2), выделение импульсов помехи, превышающих некоторый заданный уровень обнаружения, и формирование управляющих импульсов (блок 5) (рис. 1). Затем управляющие импульсы синфазного и квадратурного каналов объединяются по заданному критерию, например, “ИЛИ” (блоки 5 и 6), и используются для управления стробированием СИП. Возможна реализация одноэтапного и двухэтапного подавления импульсной помехи. В первом случае сформированные управляющие импульсы непосредственно используются для устранения импульса помехи. Во втором случае для дополнительного подавления “хвостов” импульса помехи путем расширения зоны стробирования осуществляется дополнительное преобразование управляющих импульсов.

Подавление (компенсация импульсов) помехи осуществляется путем определения области воздействия каждого импульса помехи и интерполяции принимаемого сигнала на данном интервале. Данный алгоритм учитывает наличие корреляционной связи импульсов помехи в квадратурных каналах и рассчитан на подавление импульсных помех с параметром $\mu = \frac{T_s}{\overline{\tau}_p} > 1$, где T_s – длительность канального импульса передаваемого сигнала, $\overline{\tau}_p$ – средняя длительность импульса помехи.

Примеры эпюр сигналов в ККИП приведены на рис. 2. На верхнем графике (А1) представлена огибающая входной смести сигнала, аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) и импульсной помехи. На среднем графике (А2) изображены сформированные в соответствии с предложенным алгоритмом управляющие импульсы ККИП. Каждый управляющий импульс соответствует импульсу помехи. На нижнем графике (А3) изображен выходной сигнал ККИП, очищенный от импульсной помехи.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КВАДРАТУРНОГО КОМПЕНСАТОРА ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

С учетом нелинейного характера алгоритмов компенсации импульсных помех использование аналитических методов для исследования их характеристик связано со значительными математическими трудностями. Поэтому в качестве инструментария анализа эффективности данных алгоритмов выбран метод имитационного моделирования [9]. Математические модели радиосистемы связи были реализованы в среде MATLAB/Simulink. В данную модель введены блоки компенсации влияния импульсных помех КОИП и ККИП.

В качестве примера рассмотрим канал цифровой радиосвязи Земля-КА, аналогичный описанному в [2]. Предполагается, что используется модуляция в виде фильтрованной ФМн-2 (FBPSK) с фильтрами типа “приподнятого косинуса”, которая широко применяется во многих системах космической связи для обеспечения максимальной дальности действия.

В блоке КОИП реализован известный алгоритм ШОУ [4]: на выходе линейной части приемника каждая квадратурная компонента принимаемого сигнала подвергается ограничению с заданным пороговым уровнем и согласованной фильтрации.

По результатам моделирования были получены зависимости вероятности битовой ошибки (BER) на выходе демодулятора от отношения сигнал-шум (ОСШ) $h_{sn}^2 = \frac{E_s}{N_0}$ и отношения сигнал-импульсная помеха (ОСИП) $h_{sp}^2 = \frac{E_s}{\overline{E}_p}$, где E_s – энергия канального символа, $\overline{E}_p$ – средняя энергия импульса помехи. Учитывая, что при изменении средней скважности СИП Q меняется средняя частота воздействия помехи на сигнал,

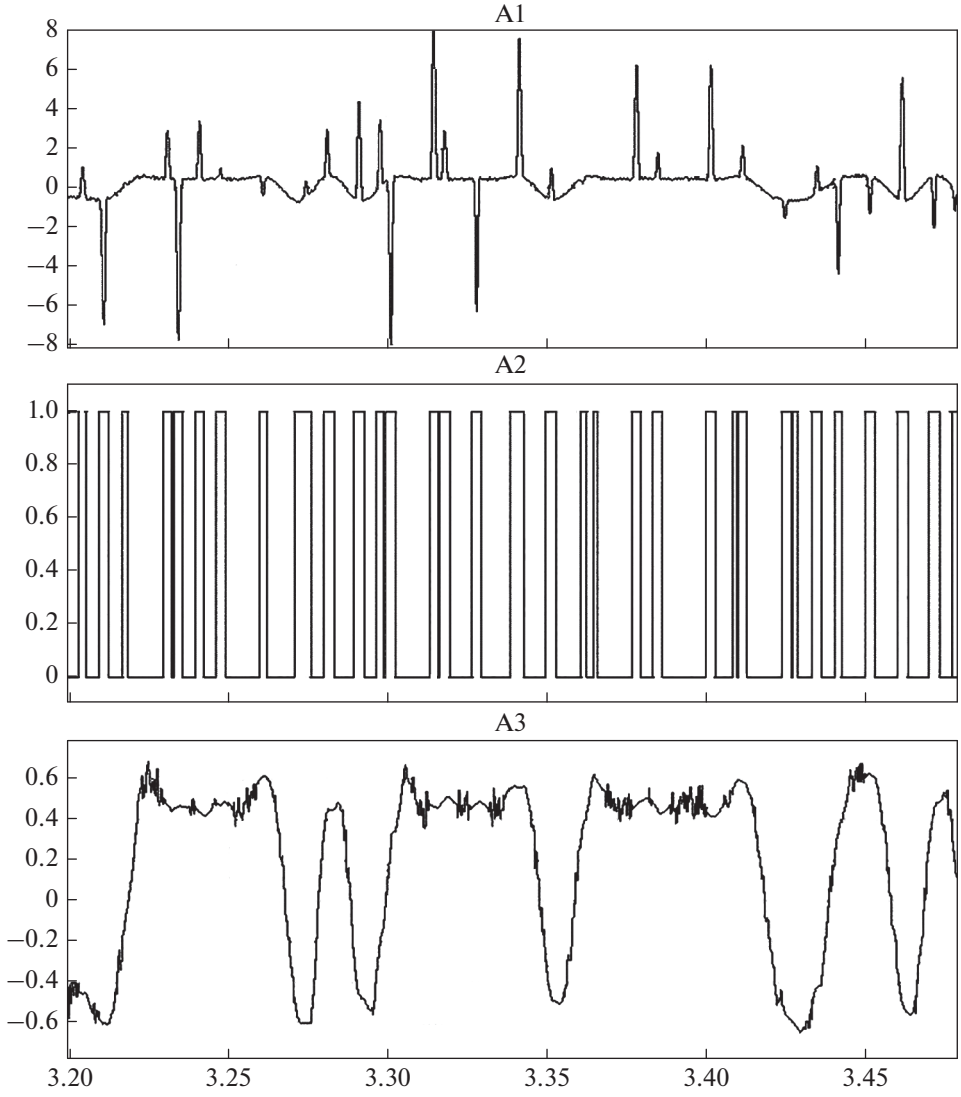

Рис. 2. Эпюры сигналов в ККИП.

хотя значение ОСИП остается постоянным, далее для получения более общих результатов будет использоваться ОСИП, нормированное к Q.

Результаты были получены как для идеальной фазовой и символьной синхронизации, так и для случая работы систем фазовой и символьной синхронизации (алгоритм Гарднера), имеющих постоянную времени $100T_s$, далее – “реальная” синхронизация. Как показал анализ, энергетический выигрыш от применения ККИП может достигать 3 дБ при ОСИП 10 дБ, 7 дБ при ОСИП 5 дБ и более 12 дБ при ОСИП 0 дБ. Так при высоком уровне импульсных помех ($h_{sp}^2 < 10$ дБ) ККИП обеспечивает существенный энергетический выигрыш по сравнению с КОИП, который составляет от 1.5 дБ при ОСИП 10 дБ (BER = 8×10^{-4}) до 5 дБ при ОСИП 0 дБ (BER = 1.5×10^{-2}).

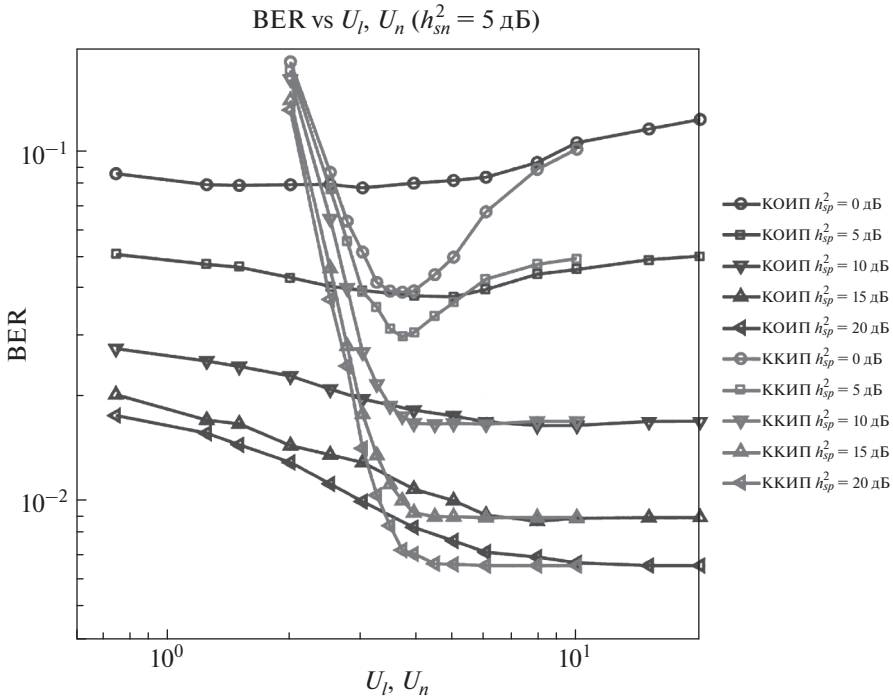

Рис. 3. Зависимость BER от пороговых уровней для ОСШ 5 дБ (идеальная синхронизация).

При сравнении ККИП и КОИП необходимо учитывать, что в каждом из них имеется пороговое устройство, которое характеризуется некоторым своим заданным пороговым уровнем. В случае КОИП этот уровень будем описывать нормированным уровнем ограничения сигнала U_l, а в случае ККИП – нормированным уровнем обнаружения ИП U_n. Абсолютные значения порогов могут быть определены как $U_{p\,Abs} = 1 + K_k U_p \sigma_n$, где σ_n – СКО АБГШ, K_k – поправочный коэффициент, U_p – нормированный уровень ограничения или обнаружения ИП.

Для того, чтобы корректно сравнивать эффективность рассматриваемых компенсаторов, сравнение необходимо проводить для оптимальных значений этих порогов, обеспечивающих максимальную эффективность каждого вида компенсаторов.

На рисунках 3–6 приведены зависимости, которые позволяют отразить это в более наглядной форме. Данные графики описывают зависимость вероятности битовой ошибки от нормированных порога ограничения U_l и порога обнаружения U_n.

Для удобства отображения используется одна ось абсцисс для этих порогов.

Графики на рис. 3 и 4 построены для отношения сигнал-шум 5 дБ. Первый график соответствует идеальной синхронизации, второй – учитывает работу систем фазовой и символьной синхронизации. Видно, что неидеальность синхронизации оказывает влияние на характеристики помехоустойчивости для каждого компенсатора. При ОСИП 0 и 5 дБ ККИП при оптимальном значении порога обеспечивает выигрыш соответственно в 2.4 и 1.4 раза по вероятности битовой ошибки по сравнению с КОИП для реальной синхронизации. При больших отношениях сигнал-помеха и оптимальных значениях порогов ККИП и КОИП обеспечивают примерно одинаковую помехоустойчивость. На рисунках 5 и 6 приведены аналогичные зависимости для отношения сигнал–шум 10 дБ. В этом случае наблюдается меньшая зависимость вероятности

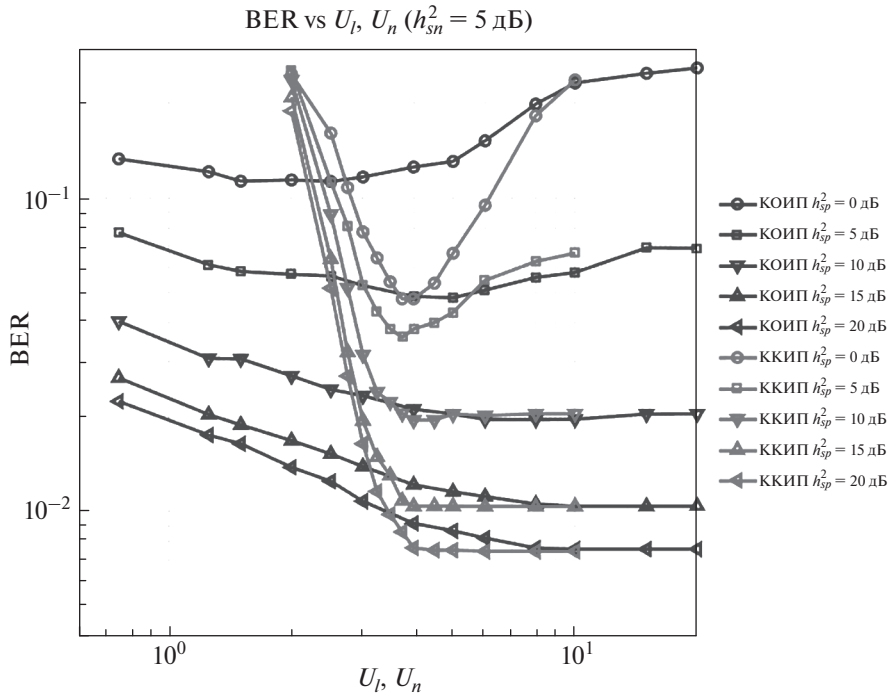

Рис. 4. Зависимость BER от пороговых уровней для ОСШ 10 дБ (реальная синхронизация).

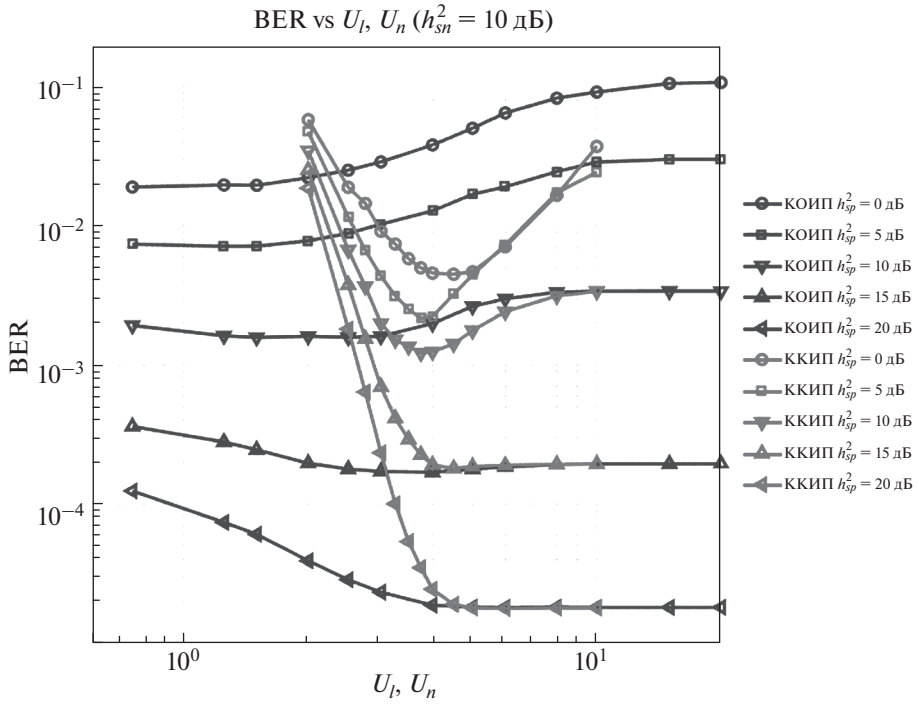

Рис. 5. Зависимость BER от пороговых уровней для ОСШ 10 дБ (идеальная синхронизация).

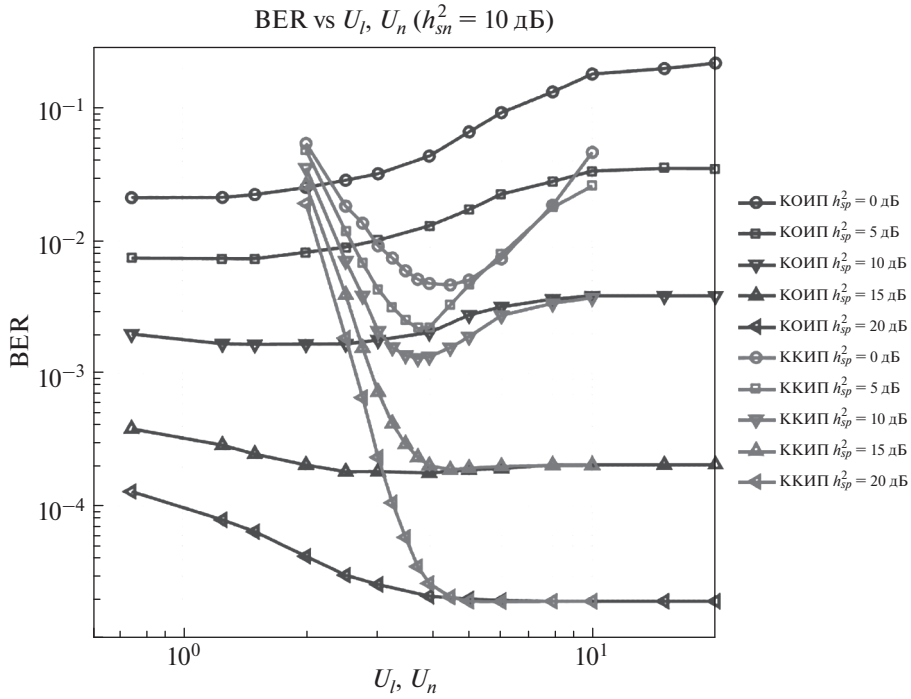

Рис. 6. Зависимость BER от пороговых уровней для ОСШ 10 дБ (реальная синхронизация).

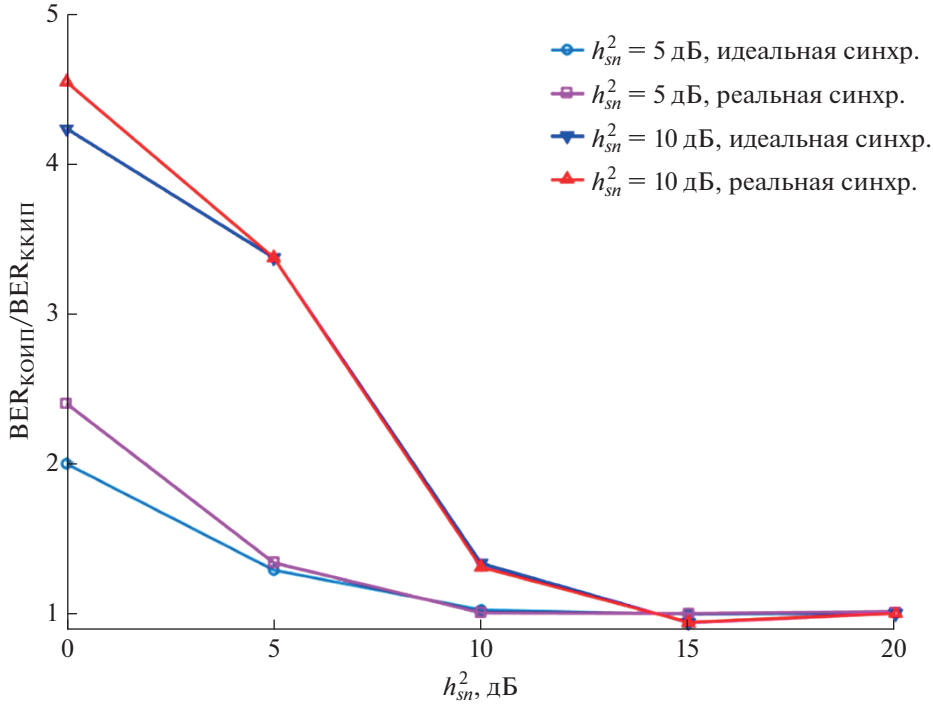

Рис. 7. Зависимость отношения $BER_{КОИП}$ к $BER_{ККИП}$ от ОСИП.

ошибки от функционирования систем синхронизации. Выигрыш по вероятности ошибки ККИП при оптимальных значениях порогов и отношении сигнал-помеха 0 и 5 дБ по сравнению с КОИП составляет 4.5 и 3.5 раза соответственно.

Зависимость отношения $BER_{КОИП}$ к $BER_{ККИП}$ для всех рассмотренных ОСИП представлена на рис. 7, где для каждого из рассмотренных ОСШ 5 дБ и 10 дБ построены зависимости $BER_{КОИП}/BER_{ККИП}$ для идеальной и реальной синхронизации. Видно, что ККИП начинает давать выигрыш по сравнению с КОИП, начиная с ОСИП 10 дБ для ОСШ 10 дБ и с ОСИП 5 дБ для ОСШ 5 дБ. Необходимо отметить, что для выбора оптимального значения порогов в ККИП и КОИП необходимо знать текущее значение ОСШ.

Таким образом, для компенсации воздействия рассматриваемых типов импульсных помех целесообразно использовать ККИП в сочетании с каналом измерения текущего ОСШ для выбора оптимального значения порога обнаружения.

ВЫВОДЫ

На основе проведенных исследований могут быть сделаны следующие основные выводы:

1. Энергетический выигрыш от использования предложенного алгоритма ККИП в условиях воздействия АБГШ и радиоизлучения СПД может достигать 3 дБ при ОСИП 10 дБ ($BER = 2 \times 10^{-3}$) и 7 дБ при ОСИП 5 дБ ($BER = 3 \times 10^{-2}$).

2. Сравнение ККИП с КОИП (ШОУ) показывает, что при комбинированном воздействии АБГШ и СИП для $\mu > 1$ ККИП позволяет получить выигрыш по вероятности ошибочного приема символа фильтрованной ФМн-2 по сравнению с алгоритмом КОИП (ШОУ).

Так, при ОСШ 5 дБ и ОСИП 0 и 5 дБ ККИП при оптимальном значении порога обеспечивает выигрыш соответственно в 2.4 и 1.4 раза по вероятности битовой ошибки по сравнению с КОИП. А при ОСШ 10 дБ и ОСИП 0 и 5 дБ выигрыш по вероятности битовой ошибки ККИП по сравнению с КОИП составляет 4.5 и 3.3 раза соответственно.

3. При высоком уровне импульсных помех (ОСИП от 10 дБ и ниже) ККИП обеспечивает энергетический выигрыш по сравнению с КОИП от 1.5 дБ при ОСИП 10 дБ ($BER = 8 \times 10^{-4}$) до 5 дБ при ОСИП 0 дБ ($BER = 1.5 \times 10^{-2}$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Важенин Н.А., Обухов В.А., Плохих А.П., Попов Г.А.* Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 432 с. ISBN 978-5-9221-1410-3.
2. *Урличич Ю.М., Гусев Л.И., Леонов М.С., Селиванов А.С., Круглов А.В., Молотов Е.П.* Радиотехнические комплексы для управления дальними космическими аппаратами и для научных исследований / Под ред. Молотова Е.П. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 232 с.
3. *Важенин Н.А.* Влияние собственного электромагнитного излучения ЭРД на помехоустойчивость радиосистем космической связи. // Сб. тезисов ВНТК “Системы связи и радионавигации”. Красноярск: ОАО “НПП "Радиосвязь”, 2014. С. 38–40.
4. *Максимов М.В., Бобиев М.П., Кривицкий Б.Х., Горгонов Г.И., Степанов Б.М., Шустов Л.Н., Ильин В.А.* Защита от радиопомех. Под ред. Максимова М.В. М.: “Сов. радио”, 1976. 496 с.
5. *Важенин Н.А.* Анализ помехоустойчивости квадратурного компенсатора импульсных помех // Вестник Московского авиационного ин-та. М.: Изд.-во МАИ, 2014. Т. 21. № 1. С. 116–123.
6. *Важенин Н.А., Волковский А.С., Келин Т.Г.* Квадратурный компенсатор импульсных помех. RU 2491570: Патент РФ на изобретение. Россия. 07.02.2013 г.
7. *Vashenin N.A., Volkovskiy A.S., Kelin T.G.* Quadrature Impulse Noise Remover. US Patent № 9,191,048 B2. USA. 17.11.2015 г. Prior Publication Data 2012.12.13.
8. *Vashenin N.A., Volkovskiy A.S., Kelin T.G.* Quadrature Impulse Noise Remover. EU Patent № 2,792,077 B2. EU, 07.05.2017. Date of filing 13.12.2012.
9. *Важенин Н.А., Волковский А.С., Плохих А.П.* Имитационное моделирование в задачах оценки помехоустойчивости систем дальней космической связи с КА, оборудованными маршевыми ЭРД // 7-я Международная конференция “Авиация и космонавтика-2008”. Москва, 20–23 октября, 2008. С. 34.

Interference Immunity Improvement for Radiotechnical Systems of SC with EP

N. A. Vazhenin[a], *, A. P. Plokhikh[a], and G. A. Popov[a]

[a] *Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of the Moscow Aviation Institute (RIAME MAI), Moscow, Russia*

**e-mail: riame@sokol.ru*

The application of modern methods for signal processing with the aim to increase interference immunity of raditechnical systems of SC with electric propulsion (EP) is considered. The principle of protection against SPT interference is discussed that is based on the adaptive extraction of characteristic components of the emission process within the temporal domain, their cutting out, and two-stage interpolation of the received signal complex envelope. We consider the algorithm of operation of the developed quadrature canceler of pulse interference that is a part of the channel of digital radio link "Earth-SC" with FBPSK. To analyze efficiency of the developed algorithm, we use the simulation modeling method with the representation of mathematical model for radio communication channel in the MATLAB/Simulink environment. Results are obtained both for the perfect phase and symbol locking, and for the case of operation of the phase and symbol locking systems (Gardner algorithm). It is shown that the power gain as a result of the proposed algorithm of quadrature canceler of pulse interference use under the exposure to the thermal noise and radio-frequency emission from the stationary plasma thruster can be as high as 3 dB with the signal-to-extracted component ratio (SECR) of 10 dB and 7 dB with SECR of 5 dB.

Keywords: stationary plasma thruster, electromagnetic emission, simulation modeling, interference canceler