

Повышение помехоустойчивости систем дальней космической связи при воздействии помех от стационарных плазменных двигателей

Проводится анализ применимости и количественной оценки потенциальной эффективности использования алгоритмов слепого разделения сигналов для борьбы с помехами, создаваемыми стационарными плазменными двигателями. С использованием разработанной имитационной модели канала передачи командно-программной информации радиосистемы дальней космической связи с модуляционно-кодовой схемой на основе сигнала гауссовой модуляции минимального сдвига и кода Рида – Соломона (255,223) получены графики зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал – шум для различных значений отношения помеха – сигнал и величин средней скважности импульсной помехи. Полученные результаты позволяют проводить количественную оценку потенциальной эффективности использования алгоритма слепого разделения сигналов SOBI в каналах с сигналом гауссовой модуляции минимального сдвига при воздействии излучения от стационарных плазменных двигателей и тепловых шумов приемного тракта.

П.С. ТЯПКИН,
аспирант,

Н.А. ВАЖЕНИН,

д-р техн. наук,

А.П. ПЛОХИХ,

д-р техн. наук

(МАИ, Москва)

plokhikh2001@mail.ru

Дальняя космическая связь, стационарный плазменный двигатель, сигнал гауссовой модуляции минимального сдвига, слепое разделение сигналов, канал с аддитивным белым гауссовым шумом, имитационное моделирование, анализ независимых компонент, повышение помехоустойчивости

При приеме сигналов от земных станций дальней космической связи на борту космических аппаратов, оснащенных маршевыми стационарными плазменными двигателями, необходимо учитывать влияние импульсной шумоподобной помехи, вызванной собственным электромагнитным излучением этих двигателей. Данное излучение занимает полосу частот в диапазоне от сотен герц до десятков гигагерц и может ухудшать качество приема сигналов от земных станций. В связи с этим актуальна задача разработки и исследования эффективности новых методов борьбы с помехами данного класса, базирующихся на учете статистических характеристик передаваемых сигналов и помех.

В настоящее время стационарные плазменные двигатели все чаще используются в качестве маршевых двигателей. Так, 13 октября 2023 г. состоялся седьмой запуск космического аппарата «Psyche», где установлены четыре стационарных плазменных двигателя типа СПД-140 производства ОКБ «Факел» (Калининград) [1]. Параметры современных электрических ракетных двигателей приведены в работе [2].

Отмечалось [3, 4], что работа стационарного плазменного двигателя может сопровождаться возникновением различных типов плазменно-пучковых неустойчивостей, которые могут проявляться как в зоне ионизации, так в пристеночных областях ускорительного канала и внешней неравновесной области плазмы, связанной с нейтрализацией ускоренного ионного потока. В результате различных механизмов преобразования возникающие плазменные колебания трансформируются в шумоподобное электромагнитное излучение широкого диапазона частот – от сотен герц до десятков гигагерц [3]. Данное излучение может существенно ухудшить качество приема сигнала на борту космического аппарата.

На рис. 1 приведены примеры спектров излучения лабораторного макета СПД-100-2 для различных величин напряжения разряда U_p в диапазоне 300...800 В с интервалом 100 В. Спектры сняты в апертуре измерительной антенны в полосе 1 МГц в результате экспериментальных измерений излучения двигателя, помещенного в радиопрозрачный вакуумный отсек, интегрированный в типовую безэховую камеру [4–6].

Эпюры амплитудной огибающей напряженности излучения СПД-100-2 в апертуре приемной антенны при величине напряжения разряда $U_p = 800$ В, полученные в полосе спектроанализатора 160 МГц,

приведены на рис. 2: $a - f_0 = 6,820$ ГГц; $b - f_0 = 6,960$ ГГц; $в - f_0 = 7,100$ ГГц; $г - f_0 = 7,240$ ГГц; $д - f_0 = 7,380$ ГГц; $e - f_0 = 7,520$ ГГц.

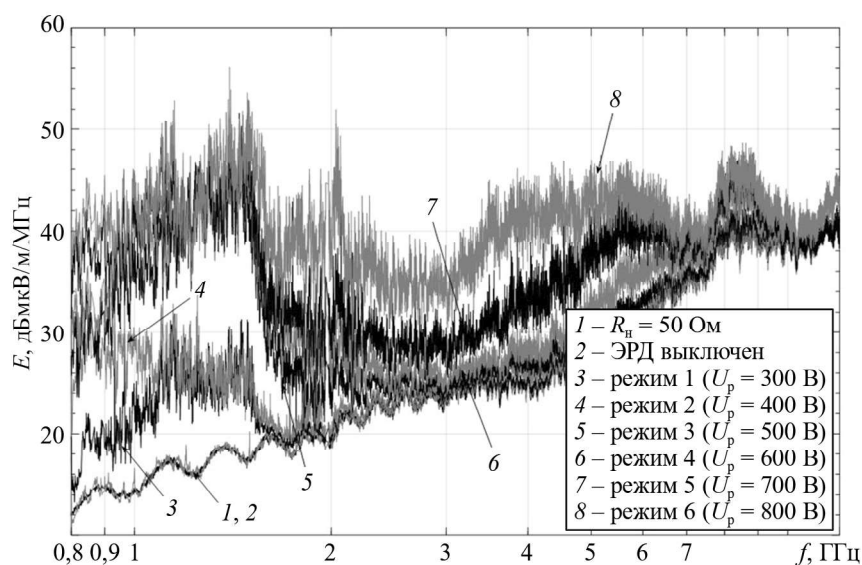


Рис. 1

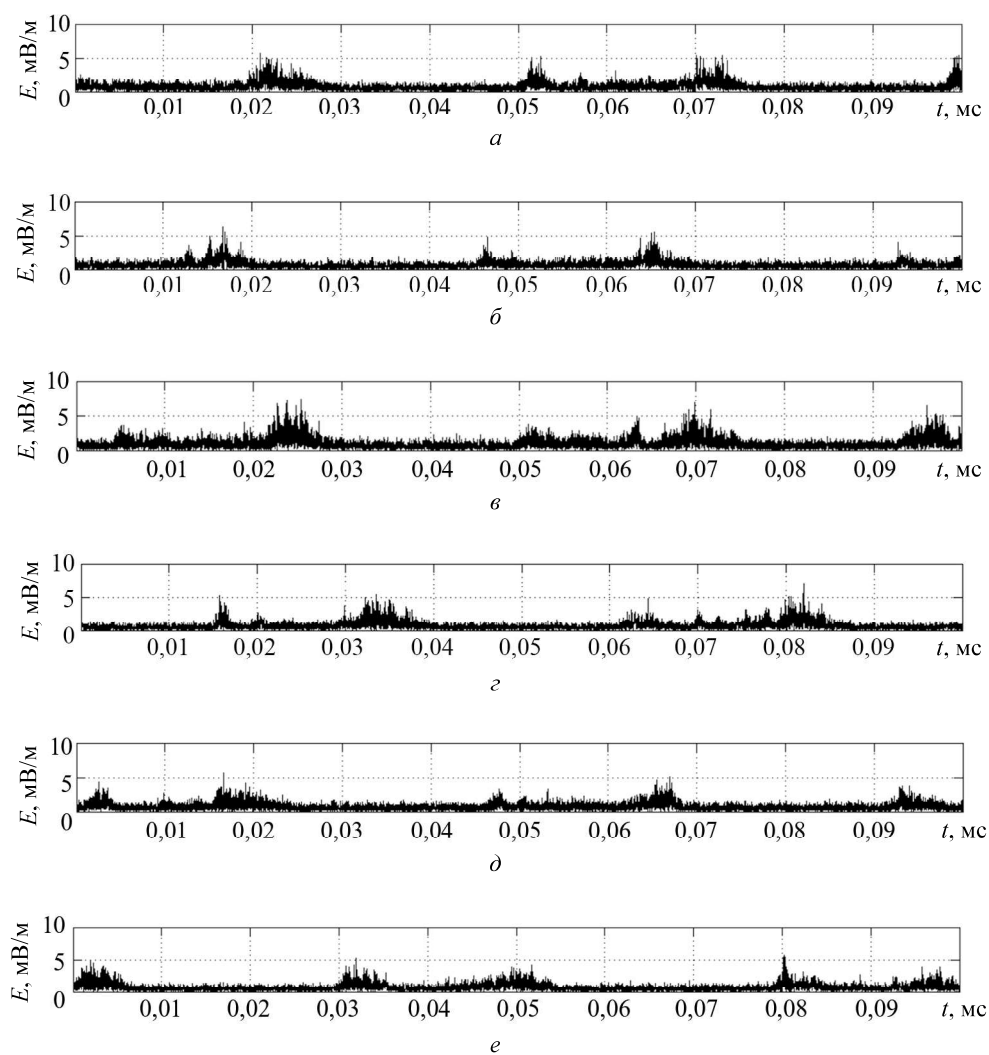


Рис. 2

В работе [3] приведены результаты лабораторных измерений помехового излучения других моделей стационарных плазменных двигателей для различных режимов работы и разных уровней износа радиального канала, связанного с длительностью работы двигателя. В связи с этим актуальной является задача исследования и отработки новых способов борьбы с помехами от стационарных плазменных двигателей и повышения помехоустойчивости приема сигналов на борту космических аппаратов, оснащенных стационарными плазменными двигателями.

В работе предложен вариант борьбы с излучением стационарных плазменных двигателей, основанный на методах слепого разделения сигналов, с разнесенным приемом на две антенны. Под методами слепого разделения сигналов, или методами слепого разделения источников, понимают алгоритмы, позволяющие выполнить разделение сигналов из принятых смесей [7]. Эти смеси, как правило, состоят из нескольких исходных сигналов, помех и тепловых шумов. Под термином «слепое разделение» подразумевается, что разделение сигналов может осуществляться без априорной информации о характеристиках и формах исходных сигналов и каналов связи до их смешивания, т. е. непосредственно по принятым реализациям смесей сигналов, помехи от стационарных плазменных двигателей и тепловых шумов [8, 9].

При данном подходе на космическом аппарате устанавливается дополнительная антенная система простой конструкции, основной задачей которой является прием помехи от электроракетных двигательных установок (рис. 3). В составе электроракетной двигательной установки обычно N отдельных стационарных плазменных двигателей. В связи с этим образуются два канала приема – основной, направленный в сторону передатчика информационного сигнала, и канал приема помехи от электроракетных двигательных установок.

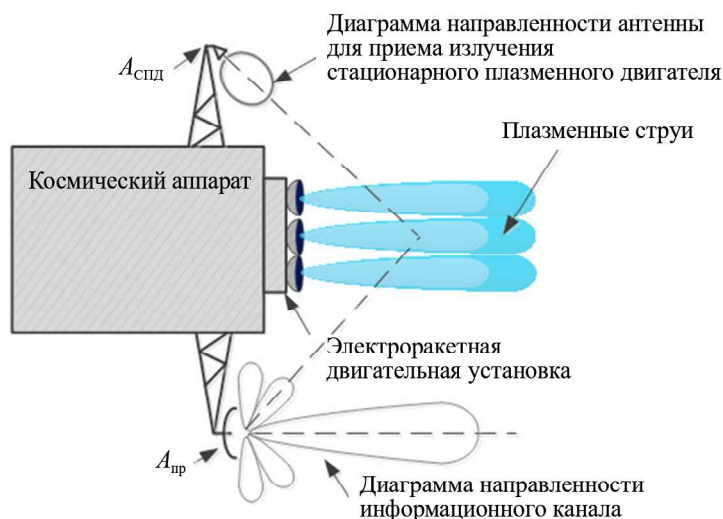


Рис. 3

Сигналы, принятые в каждом канале, составляют совокупность полезного сигнала, помехи от электроракетных двигательных установок и теплового шума в канале приема (далее – смеси). Математически принятые смеси на входе приемников каждого из каналов можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{S}_{\text{вх1}}(t) &= a_{c1} \cdot \dot{s}_c(t) + a_{n1} \cdot \dot{s}_n(t) + a_{ш1} \cdot \dot{n}_1(t); \\ \dot{S}_{\text{вх2}}(t) &= a_{c2} \cdot \dot{s}_c(t) + a_{n2} \cdot \dot{s}_n(t) + a_{ш2} \cdot \dot{n}_2(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где $\dot{S}_{\text{вх1}}(t)$, $\dot{S}_{\text{вх2}}(t)$ – смеси основного и побочного каналов на входе приемника; $\dot{s}_c(t)$ – полезный сигнал от земной станции; $\dot{s}_n(t)$ – импульсная помеха от стационарных плазменных двигателей; $\dot{n}_1(t)$, $\dot{n}_2(t)$ – тепловые шумы каналов приема; a_{c1} , a_{c2} – весовые коэффициенты при полезном сигнале в принятых смесях; a_{n1} , a_{n2} – весовые коэффициенты при импульсной помехе в принятых смесях; $a_{ш1}$, $a_{ш2}$ – весовые коэффициенты при тепловых шумах приемников.

Алгоритм SOBI (Second Order Blind Identification) использует статистики второго порядка для временной декорреляции принятых сигналов и состоит из следующих вычислительных шагов.

1. Обеление принятых сигналов.
2. Вычисление задержанных корреляционных матриц.
3. Проведение совместной диагонализации матриц на основе обобщения алгоритма Якоби для диагонализации одной эрмитовой матрицы.

Алгоритм SOBI основывается на предположении о диагональной форме задержанных корреляционных матриц, которая определяется следующим выражением [10–12]:

$$R_x(\tau) = E\{x(t)x(t+\tau)^T\} = HR_s(\tau)H^T, \forall \tau, \quad (2)$$

где $x(t)$ – вектор из M наблюдаемых сигналов; H – матрица смешивания; $R_s(\tau)$ – корреляционная матрица сигналов источников $s(t)$; $R_x(\tau)$ – задержанная корреляционная матрица; индекс « T » – комплексное транспонирование.

С учетом того что уравнение (2) выполняется для всех значений τ , существует унитарная матрица $U = BH$, где B – обеляющая матрица, которая диагонализует все корреляционные матрицы:

$$U^T R_x(\tau) U = R_s(\tau). \quad (3)$$

Таким образом, могут быть вычислены оценки исходных сигналов $\hat{s}(t) = U^\# Bx(t)$, где верхний индекс $\#$ обозначает псевдообратную функцию Мура – Пенроуза [9].

Как показано [13, 14], с использованием алгоритма SOBI в сравнении с FastICA, JADE и Infomax получены лучшие характеристики по скорости вычислений с обеспечением наиболее точного вычисления корреляционных характеристик в соответствии с критериями Пирсона и Спирмена.

В работе используется алгоритм SOBI из библиотеки LYCIA Toolbox (LibrarY of Complex ICA Algorithms) версии 1.3 [15], которая совместима с MATLAB и Octave.

На рис. 4 приведена блок-схема имитационной модели, разработанной для исследования эффективности использования методов слепого разделения сигналов с целью повышения помехоустойчивости систем дальней космической связи в условиях воздействия помех от стационарных плазменных двигателей. Данная блок-схема может быть использована для любого алгоритма слепого разделения сигналов, используемого в модели.

Формирователь командно-программной информации осуществляет генерацию массива бит, который представляет собой командно-программную информацию радиосистемы дальней космической связи согласно рекомендациям [16]. Затем сформированный массив передается на модуль «Формирователь пакета», в котором может производиться кодирование входных данных линейным циклическим кодом Рида – Соломона (255,223) и блочное перемежение. В начало пакета добавляется 48 бит заголовка.

Сформированный пакет передается на модулятор гауссовой модуляции минимального сдвига (ГММС). Перед модуляцией для обеспечения непрерывности фазы осуществляется дифференциальное кодирование входных данных.

В блоке весового суммирования производится формирование двух комплексных векторов смесей $\dot{S}_{\text{BX1}}$ и $\dot{S}_{\text{BX2}}$, которые представляют собой нормированные к единичной мощности комплексный сигнал $\dot{s}_c$ на выходе модулятора, помеху $\dot{s}_n$ и векторы аддитивного белого гауссового шума (АБГШ) $\dot{n}_1$ и $\dot{n}_2$, сложенные с разными весовыми коэффициентами:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{BX1}} &= a_{c1} \cdot \dot{s}_c + a_{n1} \cdot \dot{s}_n + a_{m1} \cdot \dot{n}_1; \\ \dot{S}_{\text{BX2}} &= a_{c2} \cdot \dot{s}_c + a_{n2} \cdot \dot{s}_n + a_{m2} \cdot \dot{n}_2. \end{aligned} \quad (4)$$

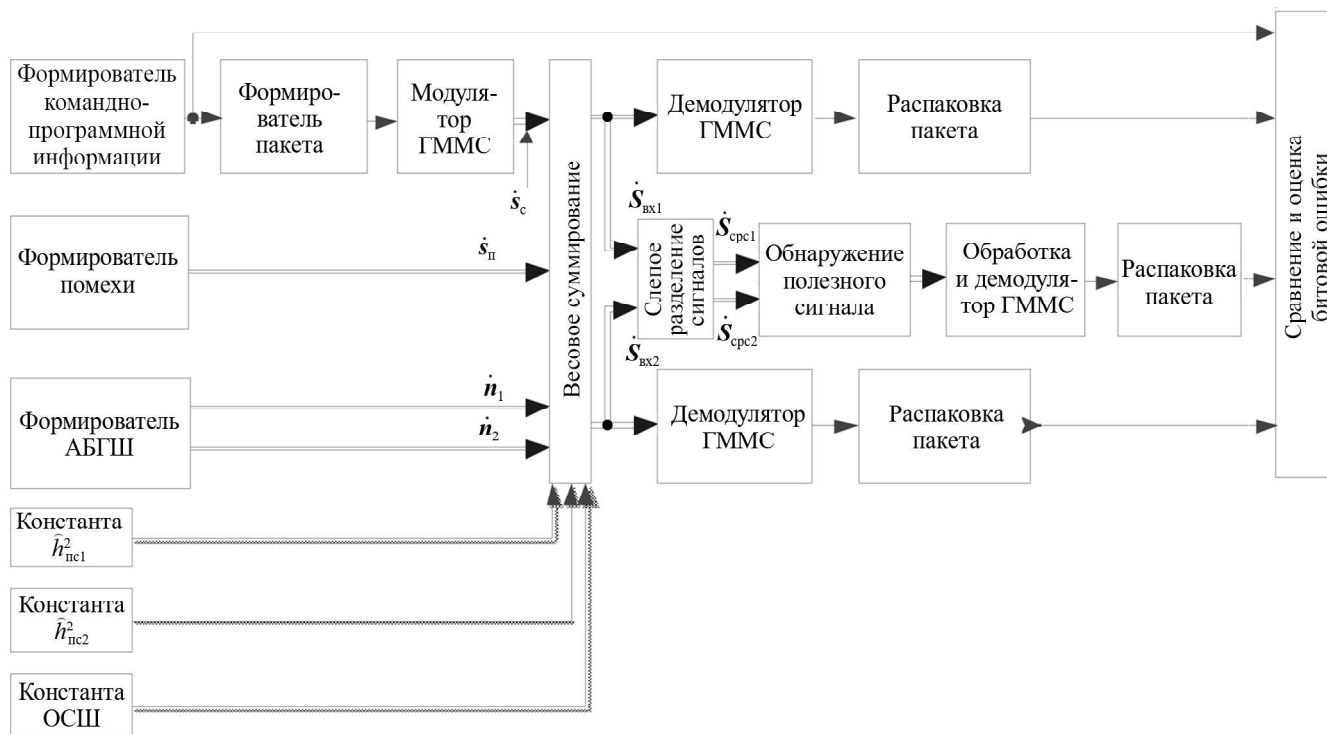


Рис. 4

Так, коэффициентами $a_{ш1}$ и $a_{ш2}$ задаются величины отношения средних мощностей сигнала и шума (отношение сигнал – шум) в имитационной модели, а коэффициентами a_{ci} и $a_{пи}$ (где $i = 1, 2$) определяются величины отношения средних мощностей помехи и сигнала в смесях $\hat{h}_{псi}^2$:

$$\hat{h}_{псi}^2 = 10 \lg \left(\frac{P_{пи}}{P_{ci}} \right), \quad (5)$$

где $P_{пи}$ – средняя мощность помехового излучения в i -й смеси; P_{ci} – средняя мощность сигнала в i -й смеси.

Подробно пересчет величин битового отношения сигнал – шум к отношению средних мощностей сигнала и шума, а также переход от величин отношения помеха – сигнал в смесях к значениям a_{ci} и $a_{пи}$ рассмотрен в работе [14].

Импульсную помеху в имитационной модели можно реализовать тремя различными способами:

- использовать реализации реального излучения от стационарных плазменных двигателей, полученные экспериментально [17];
- использовать модель импульсного помехового излучения стационарных плазменных двигателей на основе модифицированной модели Холла [18, 19];
- применять упрощенную модель Холла для импульсного помехового излучения.

Применение в модели реализаций, полученных в результате эксперимента, приоритетно, но ограничивается конечным объемом имеющихся выборок, а также невозможностью изменять параметры скважности.

В работах [18, 19] предложена и исследована модель импульсного помехового излучения стационарных плазменных двигателей на основе модифицированной модели Холла, обеспечивающая схожие характеристики с реальными помехами от стационарных плазменных двигателей и задающие различные параметры средней скважности помехи. Однако ее использование связано с большим объемом вычислительных затрат при формировании реализаций помехового излучения.

На основе модифицированной модели Холла предложена упрощенная модель импульсной помехи, представляющая собой последовательность квазипериодических шумоподобных импульсов, которые

имеют нормальный закон распределения. Скважность данного процесса задается параметром в имитационной модели. Данная модель значительно проще с точки зрения используемых вычислительных ресурсов.

После весового суммирования последовательно осуществляется демодуляция, деперемежение и декодирование комплексных векторов смесей без прохождения через блок слепого разделения сигналов и после прохождения.

Поскольку на выходе блока слепого разделения сигналов образуются два комплексных вектора оценки сигнала и помехи ($\dot{S}_{\text{срс1}}$ и $\dot{S}_{\text{срс2}}$), но заранее неизвестно, на каком из выходов будет каждый сигнал, то требуется произвести захват и дальнейшую обработку только разделенного полезного сигнала. Алгоритмами слепого разделения сигналов данная задача не реализуется. Для этого в имитационной модели используется обнаружение полезного сигнала, которое производится методом сравнения максимумов взаимной корреляционной функции сигналов $\dot{S}_{\text{срс1}}$ и $\dot{S}_{\text{срс2}}$ на выходе блока слепого разделения сигналов с известной преамбулой, входящей в структуру передаваемых данных. Обнаруженный сигнал поступает на блок обработки разделенного сигнала и демодуляции, затем на блок распаковки пакета.

В блоке сравнения и оценки битовой ошибки (см. рис. 4) производится сравнение массива переданных бит командно-программной информации радиосистемы дальней космической связи с принятыми массивами без слепого разделения и после слепого разделения. Оцениваются вероятности битовых ошибок и величины выигрыша по битовой ошибке от применения алгоритмов слепого разделения сигналов $p_{\text{п}}/p_{\text{срс}}$, где $p_{\text{п}}$ – вероятность битовой ошибки при демодуляции ГММС-сигнала в смеси с импульсной помехой; $p_{\text{срс}}$ – вероятность битовой ошибки при демодуляции ГММС-сигнала, выделенного из входных смесей алгоритмом слепого разделения SOBI.

Перед проведением имитационного моделирования необходимо задать параметры сигналов и помех и рассчитать требуемый объем выборки.

При моделировании использовались параметры, соответствующие типовой радиосистеме дальней космической связи, предназначенной для связи с космическими аппаратами, находящимися на орбите Марса или дальше. Рассматривалась геометрия задачи, при которой отношение помеха – сигнал может находиться в диапазоне 10...35 дБ. Приведем исходные данные моделирования, соответствующие задаче передачи командно-программной информации по каналу Земля – космические аппараты: два антенных канала с разнесенным приемом; частота дискретизации сигнала на входе алгоритмов слепого разделения сигналов – 115,2 МГц; битовая скорость передачи данных – 960 кбит/с; размер информационной части пакета – 65536 октетов; диапазон изменения значений битового отношения сигнал – шум в канале – 0...10 дБ; шаг изменения значений битового отношения сигнал – шум в канале – 0,5 дБ; величина отношения мощности импульсной помехи к мощности полезного сигнала в первом канале – 10 дБ; величина отношения мощности импульсной помехи к мощности полезного сигнала во втором канале – 15...35 дБ с шагом 5 дБ; средняя величина скважности импульсной помехи – 0,05; требуемая относительная точность результатов имитационного моделирования $\varepsilon_0 = 0,1$; доверительная вероятность полученных результатов $Q = 0,9$.

Для расчета значений вероятности битовой ошибки при заданных величинах битового отношения сигнал – шум требуется определить объем выборки N . По формуле [20]:

$$N = t_{\varphi}^2 \frac{1-p}{p\varepsilon_0^2}, \quad (6)$$

где t_{φ} – квантиль гауссовского закона распределения вероятностей, $t_{\varphi} = 1,645$ при величине доверительной вероятности $Q = 0,9$ [21]; p – оцениваемая вероятность битовой ошибки; ε_0 – относительная точность полученных результатов.

Таким образом, например, для оценки вероятности битовой ошибки 10^{-4} с относительной точностью $t_{\varphi} = 0,1$ и доверительной вероятностью $Q = 0,9$ требуется выборка из $2,71 \cdot 10^6$ информационных бит.

С целью экономии вычислительных ресурсов и сокращения времени моделирования размер выборки выбирался адаптивно в соответствии со значениями величины битового отношения сигнал – шум для ГММС-сигнала в канале с аддитивным белым гауссовым шумом.

Приведем графики зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал – шум для канала с аддитивным белым гауссовым шумом и импульсной шумовой помехой без применения помехоустойчивого кода (рис. 5, а) и с использованием кода Рида – Соломона (рис. 5, б). Величины отношения помеха – сигнал в каналах составляют $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ Дб и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 30$ Дб.

Кривая 1 (см. рис. 5) соответствует случаю демодуляции ГММС-сигнала в канале с аддитивным белым гауссовым шумом без импульсного помехового излучения от стационарных плазменных двигателей, кривая 2 получена в результате демодуляции принятых смесей без слепого разделения сигналов, кривая 3 получена в результате демодуляции принятых смесей после слепого разделения сигналов алгоритмом SOBI.

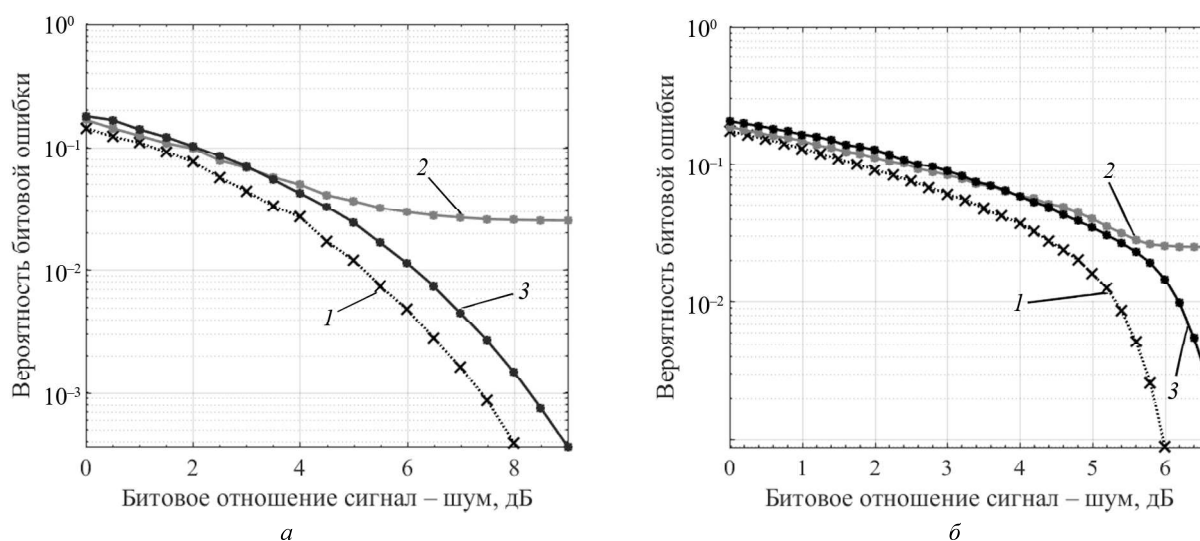


Рис. 5

Как видим (см. рис. 5, а), из-за влияния помехового излучения стационарных плазменных двигателей при величинах $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ Дб и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 30$ Дб в каналах существенно уменьшается вероятность битовой ошибки, которая при увеличении битового отношения сигнал – шум после 5 дБ перестает снижаться и составляет примерно $2,5 \cdot 10^{-2}$.

Использование метода слепого разделения сигналов SOBI позволяет существенно уменьшить вероятность битовой ошибки. Так, при битовом отношении сигнал – шум, равном 8,5 дБ (см. рис. 5, а), вероятность битовой ошибки, полученная при демодуляции после слепого разделения сигналов, составляет $7,502 \cdot 10^{-4}$, что в 33,3 раза меньше, чем при демодуляции смеси с импульсной помехой, равной $2,5 \cdot 10^{-2}$.

При сравнении зависимости вероятности битовой ошибки от битового отношения сигнал – шум для ГММС-сигнала на выходе алгоритма слепого разделения сигнала SOBI с результатами, полученными при демодуляции сигнала в канале с аддитивным белым гауссовым шумом без импульсной помехи от стационарных плазменных двигателей, выявлено, что энергетический проигрыш при использовании слепого разделения сигналов относительно гауссовского канала составляет порядка 1 дБ (см. рис. 5, а).

На рис. 5, б энергетический выигрыш от применения слепого разделения в канале с кодом Рида – Соломона достигается при битовом отношении сигнал – шум от 4,5 дБ и более, проигрыш относительно гауссовского канала также не превышает 1 дБ. В целом кривая вероятности битовой ошибки, полученная при слепом разделении алгоритмом SOBI с кодированием Рида – Соломона, до величины битового отношения сигнал – шум 6,2 дБ имеет энергетический проигрыш относительно кривой без применения помехоустойчивого кода. Далее наблюдается выигрыш. Например, при величине битового отношения

сигнал – шум, равном 6,6 дБ, вероятность битовой ошибки, полученная при демодуляции разделенного сигнала в канале без слепого разделения сигналов, составляет $2,5 \cdot 10^{-2}$, в то же время вероятность битовой ошибки разделенной смеси в канале с кодом Рида – Соломона равна $2,609 \cdot 10^{-3}$.

Аналогичные графики зависимости для величины отношения помеха – сигнал в каналах $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 20$ дБ приведены на рис. 6. Обозначения кривых на рис. 6 соответствуют обозначению кривых на рис. 5.

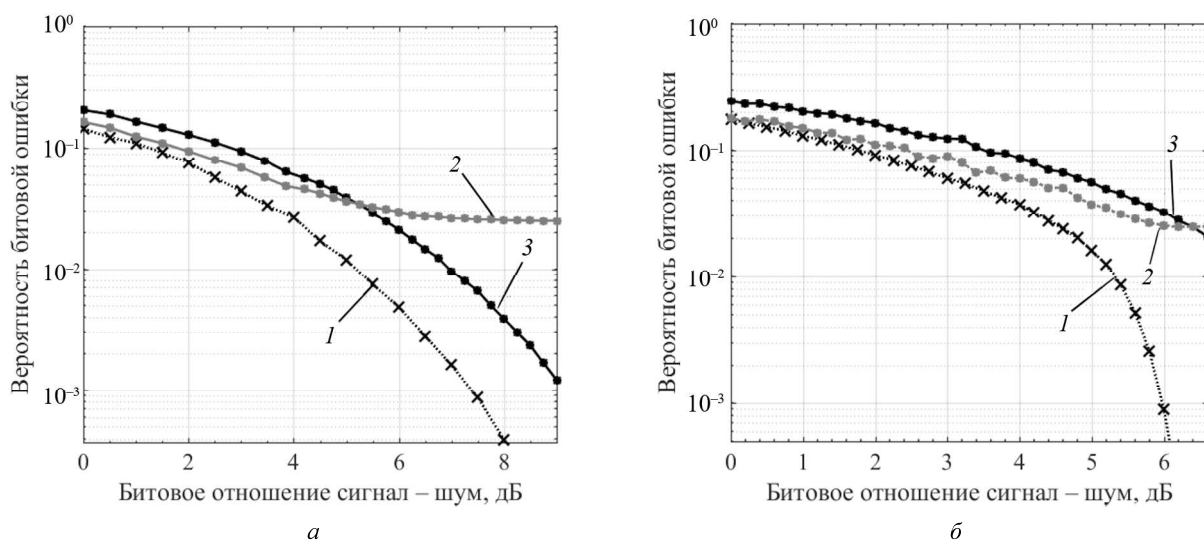


Рис. 6

Как видим (см. рис. 6), при сравнении результатов, полученных для ГММС-сигнала с импульсной помехой без слепого разделения, с результатами при применении алгоритма слепого разделения сигналов SOBI при величинах битового отношения сигнал – шум до 6 дБ (с применением кода Рида – Соломона – до 6,2 дБ (рис. 6, б) наблюдается энергетический проигрыш от использования слепого разделения сигналов – до 1,5 дБ. При увеличении битового отношения сигнал – шум в смесях от 6 дБ и более (от 6,2 дБ и более) (см. рис. 6, б), наблюдается выигрыш по битовой ошибке. Так, при полученных результатах без использования кода Рида – Соломона (см. рис. 6, а) при величине битового отношения сигнал – шум 9 дБ выигрыш по битовой ошибке больше в 19 раз.

Как видим (см. рис. 5, 6), для достижения энергетического выигрыша от применения алгоритма SOBI в канале с импульсной помехой от стационарных плазменных двигателей с $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 20$ дБ требуется большая величина битового отношения сигнал – шум в каналах, чем в случае с импульсной помехой от стационарных плазменных двигателей с $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 30$ дБ : в каналах без помехоустойчивого кодирования при одном и том же значении битового отношения сигнал – шум, равном 8 дБ, вероятность битовой ошибки, полученная после слепого разделения с $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 30$ дБ, составляет $1,471 \cdot 10^{-3}$, а после разделения с $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 20$ дБ – $3,861 \cdot 10^{-3}$, т. е. чем больше различие отношения помеха – сигнал в каналах приема, тем более эффективно слепое разделение сигналов.

На рис. 7 представлены графики зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал – шум при фиксированной величине отношения средних мощностей помехи и сигнала в первом канале $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и величине отношения сигнал – помеха во втором канале $\hat{h}_{\text{пс2}}^2$ в диапазоне 17...35 дБ.

Как видим (см. рис. 7), с увеличением величины $\hat{h}_{\text{пс2}}^2$ относительно $\hat{h}_{\text{пс1}}^2$ улучшается качество слепого разделения алгоритмом SOBI, и, соответственно лучше результат демодуляции: при битовом отношении сигнал – шум 7 дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 17$ дБ вероятность битовой ошибки составляет 0,05719, в то время как

при $\hat{h}_{\text{пс}2}^2 = 30$ дБ вероятность битовой ошибки равна $4,475 \cdot 10^{-3}$, что приблизительно в 12,78 раз меньше, чем в первом случае.

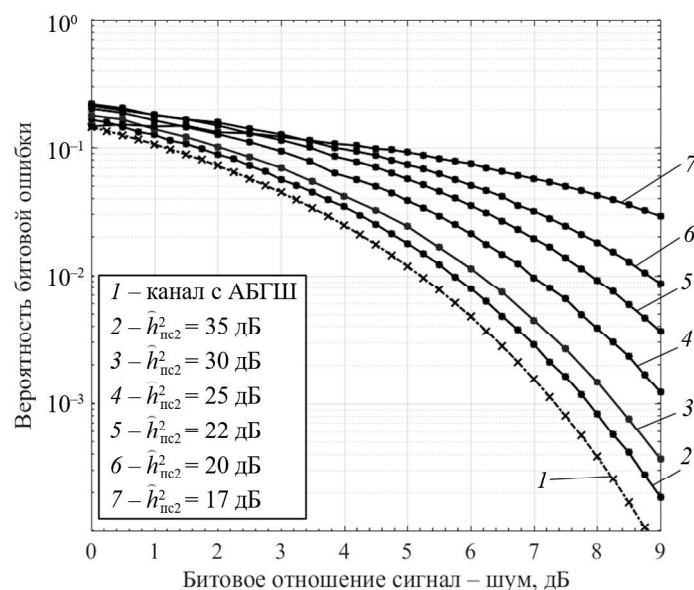


Рис. 7

Графики зависимости выигрыша по битовой ошибке от применения алгоритма SOBI относительно величины битового отношения сигнал – шум в каналах с импульсной помехой и тепловыми шумами без применения помехоустойчивого кодирования при $\hat{h}_{\text{пс}1}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс}2}^2$ в диапазоне 17...35 дБ приведены на рис. 8.

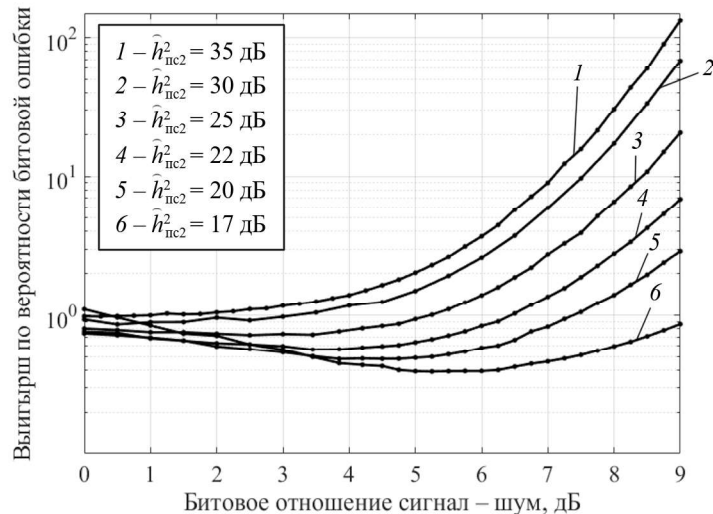


Рис. 8

Как видим (см. рис. 8), чем меньше различие уровней отношения помеха – сигнал в принятых смесях $\Delta \hat{h}_{\text{пс}}^2 = |\hat{h}_{\text{пс}2}^2 - \hat{h}_{\text{пс}1}^2|$, тем большее значение величины битового отношения сигнал – шум в каналах требуется для достижения выигрыша от применения алгоритма слепого разделения SOBI.

На рис. 9 приведены графики зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал – шум в канале с тепловыми шумами приемника, помеховым излучением от стационарных плазменных двигателей и помехоустойчивым кодированием кодом Риды – Соломона (255, 223) при фиксированной величине $\hat{h}_{\text{пс}1}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс}2}^2$ в диапазоне 15...35 дБ.

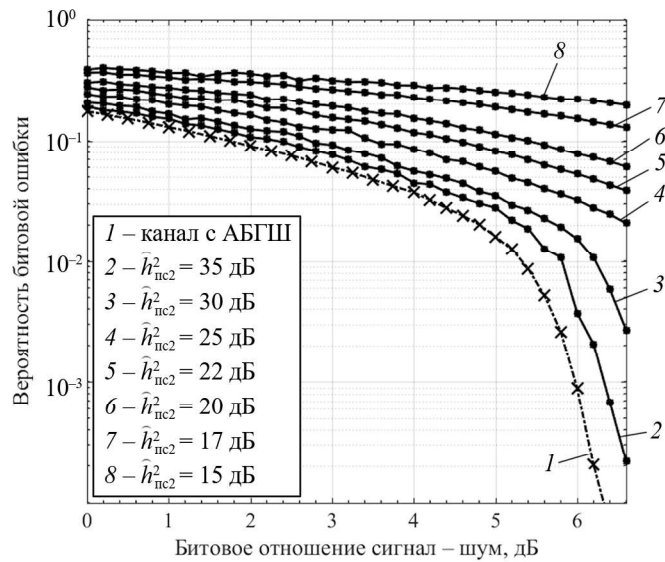


Рис. 9

График зависимости выигрыша по битовой ошибке от величины битового отношения сигнал – шум для фиксированного значения величины $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2$ в диапазоне 15...35 дБ приведен на рис. 10.

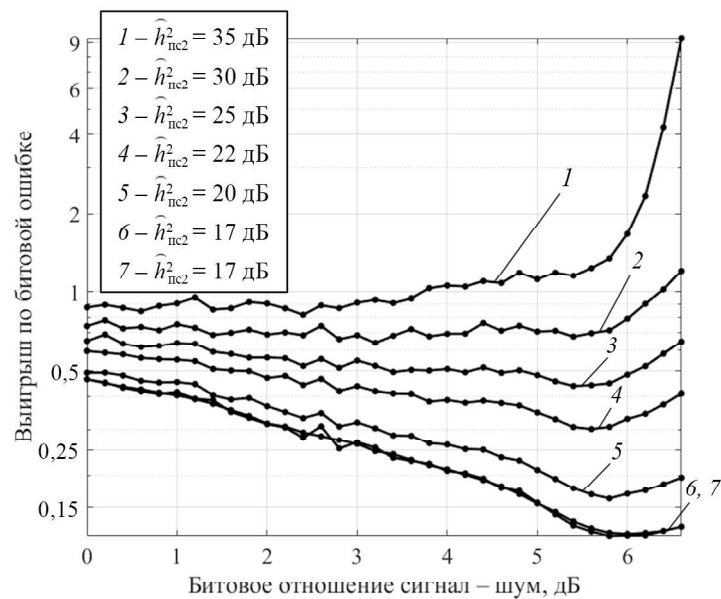


Рис. 10

Как видим (см. рис. 10), для достижения выигрыша по битовой ошибке при малых величинах битового отношения сигнал – шум требуется, чтобы величины отношения помеха – сигнал $\hat{h}_{\text{пс1}}^2$ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2$ в принятых сигналах различались как можно больше: при $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 35$ дБ выигрыш от применения алгоритма SOBI начинает увеличиваться при битовом отношении сигнал – шум от 3,8 дБ и выше. При сравнении полученных результатов (см. рис. 10) и результатов (см. рис. 8) выявлено, что за счет применения кода Рида – Соломона выигрыш по битовой ошибке получен при меньших значениях битового отношения сигнал – шум.

Таким образом, в работе рассмотрен канал передачи командно-программной информации радиосистемы дальней космической связи с разнесенным приемом на две антенны для протокола физического уровня, соответствующего рекомендациям [16], и модуляционно-кодовой схемы на основе

ГММС-сигнала и кода Риды – Соломона (255,223) в условиях тепловых шумов приемника и квазипериодических шумоподобных импульсных помех от стационарных плазменных двигателей. Согласно результатам имитационного моделирования помехи от работы электроракетной двигательной установки на основе стационарных плазменных двигателей могут существенно влиять на достоверность принимаемой информации.

При величине средней скважности импульсной помехи $T = 0,05$ помехоустойчивый код Риды – Соломона (255,223) в совокупности с перемежением бит при величинах битового отношения сигнал – шум в канале более 6 дБ и $\hat{h}_{\text{пс}}^2 = 10$ дБ не способен исправить возникшие битовые ошибки. Вероятность битовой ошибки в данном случае перестает уменьшаться при увеличении битового отношения сигнал – шум и составляет примерно 0,025.

Возможно получение существенного выигрыша по помехоустойчивости благодаря применению методов слепого разделения сигналов. Так, для алгоритма SOBI в канале без помехоустойчивого кодирования при битовом отношении сигнал – шум, равном 9 дБ, $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 25$ дБ достигается выигрыш по битовой ошибке, равный 20,5, относительно случая демодуляции принятых сигналов без слепого разделения. В канале с кодом Риды – Соломона при битовом отношении сигнал – шум, равном 6,6 дБ, выигрыш больше в 9,377 раза в сравнении с демодуляцией без слепого разделения при $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 35$ дБ.

На эффективность борьбы с помехами с использованием слепого разделения сигналов существенно влияют значения величин отношения помеха – сигнал в каналах приема. Так, при демодуляции принятых смесей без помехоустойчивого кодирования, при битовом отношении сигнал – шум 8 дБ, фиксированном значении величины $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 30$ дБ наблюдается выигрыш по вероятности битовой ошибки больше в 28,9 раз относительно демодуляции сигнала с $\hat{h}_{\text{пс1}}^2 = 10$ дБ и $\hat{h}_{\text{пс2}}^2 = 17$ дБ. В связи с этим для эффективного использования методов слепого разделения в радиосистемах дальней космической связи необходимо поддерживать разность отношений помеха – сигнал в каналах приема $\Delta \hat{h}_{\text{пс}}^2$ от 10 дБ и более. Это может быть обеспечено пространственным разнесением антенн и двигательной установки на борту космического аппарата.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-19-00515, <https://rscf.ru/project/23-19-00515/#!>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козубский К.Н. и др. СПД работают в космосе // Физика плазмы. 2003. № 3. С. 277–292.
2. Канев С.В. и др. Прямоточный электрореактивный двигатель для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 35–40.
3. Важеннин Н.А. и др. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. М.: Физматлит, 2012. 432 с.
4. Плохих А.П., Важеннин Н.А., Попов Г.А. Анализ влияния электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей на помехоустойчивость канала связи «Земля – космический аппарат» // Космические исследования. 2019. № 5. С. 339–346.
5. Плохих А.П., Важеннин Н.А. Принципы построения наземных испытательных комплексов для исследования помехозащищенности электроракетных двигателей // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2012. № 60. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35390> (дата обращения: 18.02.2024).
6. Кожевников В.В. и др. Лабораторные исследования струй электроракетных двигателей зондовыми методами // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 150–153.
7. Advances in Independent Component Analysis and Learning Machines / Eds. E. Bingham et al. Elsevier, 2015. 308 p.
8. Blind Source Separation: Advances in Theory, Algorithms and Applications / Eds. G.R. Naik, W. Wang. Springer, 2014. 551 p.
9. Handbook of Blind Source Separation: Independent Component Analysis and Applications. Handbook of Blind Source Separation / Eds. P. Comon, C. Jutten. Elsevier, 2010. 831 p.
10. Herrault J., Jutten C., Ans B. Detection de Grandeurs Primitives dans un Message Composite par Une Architecture de Calcul Neuromimetique en Apprentissage non Supervise [Electronical Resource]. URL:

- https://www.researchgate.net/publication/27606213_Detection_de_grandeurs_primitives_dans_un_message_composite_par_une_architecture_de_calcul_neuromimetique_en_apprentissage_non_supervise (дата обращения: 18.02.2024).
11. Jutten C., Herault J. Blind Separation of Sources, Part I: An Adaptive Algorithm Based on Neuromimetic Architecture // Signal Processing. 1991. Vol. 24. Iss. 1. P. 1–10.
 12. Belouchrani et al. A Blind Source Separation Technique Using Second-Order Statistics // IEEE Transactions on Signal Processing. 1997. Vol. 45. Iss. 2. P. 434–444.
 13. Sahonero-Alvarez G., Calderon H. A Comparison of SOBI, FastICA, JADE and Infomax Algorithms // Proc. of the 8th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics, March 21–24, 2017, Orlando, USA. P. 17–22.
 14. Tyapkin P.S., Vazhenin N.A. Applying Blind Signal Processing Methods in Data-Transmission Systems // Proc. of the Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, March 16–18, 2021, Moscow, Russia. P. 1–4.
 15. Dea J. et al. LibrarY of Complex ICA Algorithms (LYCIA) Toolbox v1.2 Walk-Through [Electronical Resource]. URL: <http://mlsp.umbc.edu/lycia/LYCIWalkthrough1.2.pdf> (дата обращения: 18.02.2024).
 16. Recommendation for Space Data System Standards. Space Packet Protocol. CCSDS 133.0-B-2 [Electronical Resource]. URL: <https://public.ccsds.org/Pubs/133x0b2e1.pdf> (дата обращения: 18.02.2024).
 17. Тяпкин П.С., Важенин Н.А., Плохих А.П. Использование методов слепого разделения сигналов в задачах повышения помехоустойчивости систем космической связи с квадратурной амплитудной модуляцией // Изв. вузов. Авиационная техника. 2023. № 3. С. 175–183.
 18. Важенин Н.А. Имитационное моделирование электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2013. № 69. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=43218> (дата обращения: 18.02.2024).
 19. Важенин Н.А., Плохих А.П., Фоменков А.И. Верификация моделей и программных комплексов для имитационного моделирования электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей // Изв. РАН. Энергетика. 2017. № 3. С. 62–73.
 20. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. М.: Высшая школа, 2001. 343 с.
 21. ГОСТ Р 50779.21-2004. Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. М.: Изд-во стандартов, 2004. 42 с.

Поступила в редакцию 18.03.24

После доработки 3.04.24

Принята к публикации 9.04.24

Improvement of Interference Immunity of Deep Space Communication Systems Exposed to Interference from Stationary Plasma Thrusters

P.S. TYAPKIN, N.A. VAZHENIN, AND A.P. PLOKHIKH

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

The purpose of this paper is to analyze the applicability and quantify potential efficiency of using blind signal separation algorithms to counter interference from stationary plasma thrusters. For various values of interference-to-signal ratio and of the average interference pulse-to-pause ratio, the bit error rate dependence on the signal-to-noise bit ratio is determined on the basis of the developed simulation model of the command-programming data transmission channel of deep-space communication system with the modulation-code scheme based on the GMSK-signal (Gaussian Minimum Shift Keying) and the Reed–Solomon code (255,223). The obtained results allow us to assess quantitatively the potential efficiency of using the SOBI algorithm of blind signal separation in the channels with GMSK-signal under the influence of emission from stationary plasma thrusters and thermal noises of the receiving path.

Deep space communication, stationary plasma thruster, GMSK-signal, blind signal separation, channel with AWGN, simulation modeling, independent component analysis, interference immunity improvement