

УДК 621.396.41

П.С. Тяпкин, Н.А. Важенин, А.П. Плохих

Анализ эффективности использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с помеховым излучением электрических ракетных двигателей в системах космической связи

Рассмотрены вопросы применения алгоритмов слепого разделения сигналов в задачах повышения помехоустойчивости канала спутниковой связи с восьмипозиционной фазовой манипуляцией к воздействию помех, вызванных работой стационарных плазменных двигателей (СПД), которые являются одними из разновидностей электрических ракетных двигателей (ЭРД) [1]. В рамках исследования была разработана имитационная модель канала связи с разнесенным приемом на две антенны. При моделировании в качестве помех в канале связи были рассмотрены импульсные шумоподобные сигналы, формируемые в результате работы СПД. Используемый в исследовании алгоритм слепого разделения сигналов *nc-FastICA* основан на методе анализа независимых компонент. Результаты моделирования свидетельствуют о возможности эффективного использования алгоритмов слепого разделения сигналов для борьбы с помехами СПД. Применение рассмотренных в работе алгоритмов позволяет достичь выигрыша по вероятности битовой ошибки на два порядка и более. Так, был рассмотрен один из наихудших случаев приема сигнала: выигрыш от применения алгоритма *nc-FastICA* достигается при величинах битового отношения сигнал/шум более 5 дБ при значениях отношения помеха/сигнал в канале приема информационного сигнала 10 дБ и в канале приема помехи от СПД 30 дБ.

Ключевые слова: слепое разделение сигналов, анализ независимых компонент, повышение помехоустойчивости систем связи, дальняя космическая связь, ЭРД.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-7-12

Использование электрических ракетных двигателей (ЭРД) для космических приложений в настоящее время быстро расширяется. В частности, стационарные плазменные двигатели (СПД) начинают широко применяться в задачах освоения космического пространства [1–4]. Проведенные исследования [1, 5] показали, что СПД являются источниками собственного электромагнитного излучения в полосе от сотен мегагерц до десятков гигагерц. Наиболее актуальной является задача борьбы с влиянием данного типа излучения в программах освоения дальнего космоса, когда уровень сигнала в месте приема на борту космического аппарата крайне мал. Было предложено применять методы слепого разделения сигналов для повышения помехоустойчивости спутниковых каналов связи при воздействии импульсных помех от СПД.

Для более точного анализа эффективности применения методов слепого разделения сигналов (СРС) для борьбы с помеховым излучением СПД представляет интерес использование при моделировании для описания помехи реализаций такого излучения, полученных экспериментально при изучении спектрально-временных характеристик излучения СПД [1].

Методы слепого разделения сигналов в космической связи

Под методами слепого разделения сигналов понимаются такие алгоритмы, задача которых заключается в разделении всех N исходных сигналов $\mathbf{x}(t)$ из входных наблюдаемых сигналов (смесей) $\mathbf{y}(t)$, причем сами исходные сигналы и модель их смешивания \mathbf{H} считаются неизвестными на прием-

ной стороне. Под наблюдаемыми сигналами (смесями) в терминологии слепого разделения сигналов понимают несколько сигналов, сложенных между собой с разными весовыми коэффициентами.

Применительно к дискретным системам математически задача слепого разделения сигналов может быть описана следующим матричным выражением:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

где \mathbf{y} – матрица наблюдаемых смесей размерностью $M \times T$, \mathbf{x} – матрица исходных сигналов размерностью $N \times T$, \mathbf{H} – матрица смешивания, \mathbf{n} – матрица шумов, N – количество исходных сигналов, M – количество наблюдаемых смесей, T – длина реализаций сигналов и шумов.

Задачей методов слепого разделения сигналов является поиск такой матрицы разделения $\mathbf{W} = \mathbf{H}^{-1}$, что

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{y}. \quad (2)$$

В рамках рассматриваемой задачи смеси включают в себя информационный сигнал ФМн-8, импульсную помеху от СПД и тепловой шум.

Наиболее предпочтительной и часто применяемой технологией слепого разделения сигналов является метод анализа независимых компонент (АНК), который основан на статистической независимости исходных сигналов.

В практических приложениях при использовании метода АНК для эффективного и точного разделения исходных сигналов требуется выполнение трёх допущений [6–8].

1. Исходные сигналы должны быть взаимно статистически независимыми. Или в статистическом математическом описании

$$w(S) = \prod_{m=1}^M w_m(s_m), \quad (3)$$

где $w()$ – закон распределения соответствующего процесса.

2. Компоненты независимых источников (сигналов) имеют негауссовый закон распределения вероятностей, т.е. исходные сигналы имеют статистики более высокого порядка отличные от нуля, например, эксцесс или кумулянт четвёртого порядка. Из этого предположения следует, что алгоритмы слепого разделения сигналов на базе метода АНК не способны разделять смеси мультигауссовских сигналов.

3. Количество наблюдаемых сигналов должно быть таким же или более, чем количество исходных сигналов.

Алгоритмами слепого разделения сигналов не осуществляются идентификация и поиск полезного сигнала и помехи в принятых смесях. Эта задача должна осуществляться последующими каскадами приемника.

В данной работе для решения задачи слепого разделения сигналов из принятых смесей был рассмотрен алгоритм non-circle complex FastICA (nc-FastICA) [11, 12], основанный на методе АНК. Выбор данного алгоритма в имитационной модели основан на популярности алгоритма FastICA в исследовательских задачах, благодаря его высокой

(среди других рассмотренных алгоритмов) точности разделения сигналов, а также тем, что nc-FastICA способен осуществлять обработку комплексных сигналов в отличие от FastICA, который работает только с вещественными данными.

Имитационная модель канала связи

Для исследования эффективности применения алгоритма слепого разделения сигналов nc-FastICA для борьбы с импульсными шумовыми помехами от СПД была разработана имитационная модель канала связи с восьмипозиционной фазовой манипуляцией (ФМн-8) и разнесенным приемом на две антенны.

Комплексный вектор смесей на входе приемника, состоящих из сигнала ФМн-8, импульсной помехи и тепловых шумов, может быть представлен как

$$\dot{S}_{BXi} = a_{Ci} \cdot \dot{S}_C + a_{Pi} \cdot \dot{S}_П + \dot{n}_i, \quad (4)$$

где \dot{S}_{BXi} – вектор входных смесей на i -м входе приемника, \dot{S}_C – вектор отсчетов полезного сигнала ФМн-8, $\dot{S}_П$ – вектор отсчетов импульсной помехи от ЭРД, a_{Ci} и a_{Pi} – весовые коэффициенты при полезном сигнале и при импульсной помехе соответственно, \dot{n}_i – вектор отсчетов тепловых шумов i -го приемника, $i = 1, 2$.

На рис. 1 приведена блок-схема разработанной имитационной модели. Данная имитационная модель описывает процессы передачи радиосигналов с заданной модуляцией по каналу связи, в котором кроме тепловых шумов имеется импульсная шумоподобная помеха с заданными спектрально-временными характеристиками.

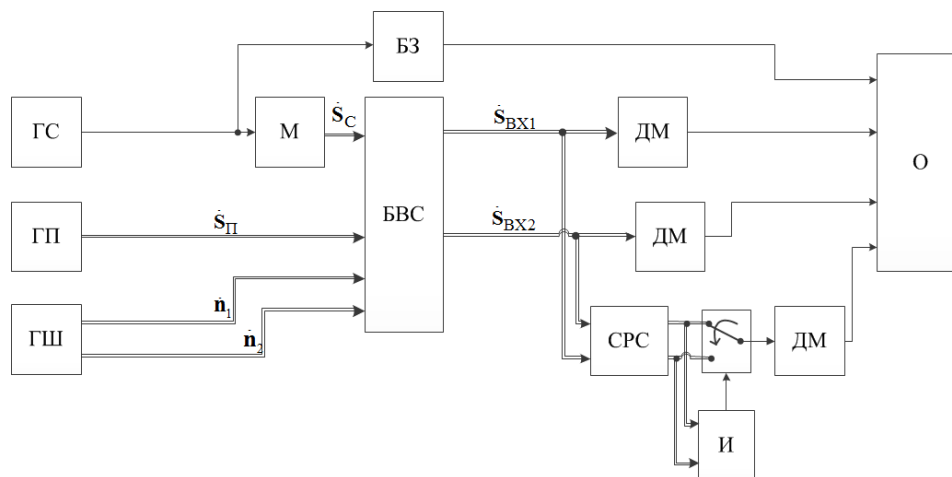


Рис. 1. Блок-схема имитационной модели

Моделирование осуществляется с использованием метода комплексной огибающей. В данном случае в качестве помехи рассматривается радиоизлучение СПД. Для моделирования использовались квадратурные реализации такого излучения, полученные экспериментально.

Функционирование модели происходит следующим образом: передающая часть формирует информационный сигнал и помеху и состоит из генератора информационного сигнала (см. блок «ГС» на

рис. 1), модулятора (см. блок «М» на рис. 1). В блоке весового суммирования (см. блок «БВС» на рис. 1) к входному сигналу с задаваемыми весовыми коэффициентами добавляются помехи, сформированные генератором помех (см. блок «ГП» на рис. 1), тепловые шумы, формируемые генератором шума (см. блок «ГШ» на рис. 1), образуя тем самым две смеси. Величины отношения сигнал/шум в двух смесях принимались равными между собой. Затем сформированные смеси демодулируются (см. блоки «ДМ»

на рис. 1). Также смеси поступают на блок слепого разделения сигналов (см. блок «СРС» на рис. 1), на выходе которого формируются разделённые сигнал и импульсная помеха. Задача идентификации полезного сигнала решается с использованием блока идентификации полезного сигнала (см. блок «И» на рис. 1).

Идентификация сигнала осуществляется на основе анализа законов распределения (ЗР) разделённых сигналов и сравнения их с ЗР, характерным для фазоманипулированных сигналов. Блок идентификации устанавливает положение переключателя так, чтобы на блок демодулятора после переключателя поступал обнаруженный полезный сигнал с выхода блока слепого разделения сигналов.

Блок оценки вероятности битовой ошибки (см. блок «О» на рис. 1) производит сравнение задержанного блоком задержки (см. блок «БЗ» на рис. 1) исходного информационного сигнала с двумя демодулированными принятыми смесями без слепого разделения сигналов, а также с демодулированным сигналом на выходе блока слепого разделения сигналов. В результате производится оценка вероятности битовой ошибки.

Параметры имитационного моделирования

Для проведения имитационного моделирования были выбраны следующие параметры и допущения:

Битовая скорость передаваемых данных: 500 кбит/с.

Метод модуляции: ФМн-8, помехоустойчивое кодирование отсутствует.

Частота дискретизации принятых смесей составляет 5 МГц.

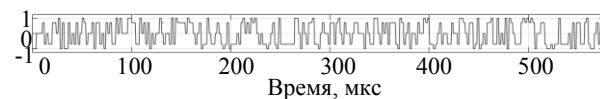
Для подготовки результирующих графиков по результатам моделирования был рассмотрен пример одного из наихудших случаев приема сигнала от наземной станции: величины битового ОСШ в канале варьировались в диапазоне 0...13 дБ, величины отношения помеха/сигнал в первой смеси составляли 10 дБ, во второй – 30 дБ. Величина средней скажкости импульсной помехи от СПД составляла 0,17.

Результаты имитационного моделирования

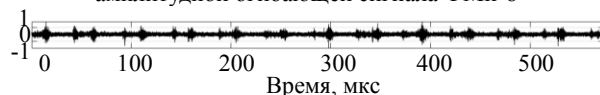
На рис. 2 приведены эпюры сигналов, полученные во время имитационного моделирования. Нормированная синфазная компонента комплексной амплитудной огибающей сигнала ФМн-8 приведена на рис. 2, а. Данный сигнал смешивается с импульсной помехой и тепловыми шумами. Реализации синфазных компонент комплексных амплитудных огибающих данных смесей приведены на рис. 2, б и в. На рис. 2, в и д отображены битовые ошибки, возникающие в результате сравнения передаваемой последовательности бит и принятых демодулированных смесей сигналов с тепловыми шумами и импульсной помехой. Величины битового отношения сигнал/шум в двух принятых каналах выбраны одинаковыми и составляют 15 дБ.

На рис. 3 приведены эпюры, полученные в результате слепого разделения принятых смесей, которые наглядно показывают, что использование СРС существенно сокращает количество битовых ошибок при передаче информации, несмотря на то, что уровень помехи многократно превышает уровень

принимаемого (полезного) сигнала. Так, на рис. 3, а и б приведены синфазные компоненты комплексной амплитудной огибающей сигнала ФМн-8 (см. рис. 3, а) и импульсной помехи (см. рис. 3, б), полученные в результате использования алгоритма слепого разделения сигналов nc-FastICA. Видно, что разделённые сигнал и импульсная помеха визуально соответствуют исходным сигналам.



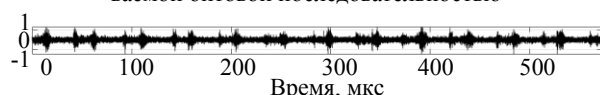
а – нормированная синфазная компонента комплексной амплитудной огибающей сигнала ФМн-8



б – нормированная синфазная компонента комплексной амплитудной огибающей смеси с ОПС = 20 дБ



в – битовые ошибки, полученные в результате демодуляции принятой смеси (ОПС = 20 дБ) и сравнения с передаваемой битовой последовательностью

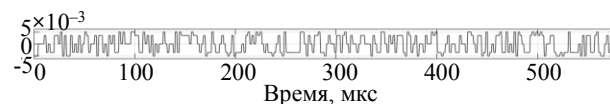


г – нормированная синфазная компонента комплексной амплитудной огибающей смеси с ОПС = 10 дБ



д – битовые ошибки, полученные в результате демодуляции принятой смеси (ОПС = 10 дБ) и сравнения с передаваемой битовой последовательностью

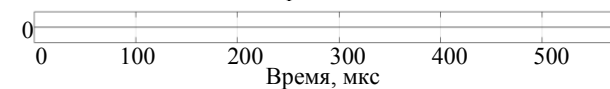
Рис. 2. Примеры эпюр сигналов при моделировании без использования СРС



а – синфазная компонента комплексной амплитудной огибающей сигнала ФМн-8 на выходе блока алгоритма nc-FastICA



б – синфазная компонента комплексной амплитудной огибающей помехового излучения от СПД на выходе блока алгоритма nc-FastICA



в – битовые ошибки, полученные в результате демодуляции разделенного из смесей сигнала ФМн-8 и сравнения с передаваемой битовой последовательностью

Рис. 3. Примеры эпюр сигналов при моделировании при использовании СРС

Это же подтверждает отсутствие битовых ошибок при демодуляции разделенного сигнала ФМн-8

на рис. 3, в. Следовательно, для данных характеристик и параметров имитационной модели алгоритм слепого разделения сигналов nc-FastICA позволяет устранять битовые ошибки, связанные с воздействием импульсных помех от ЭРД даже при больших величинах ОПС.

В результате моделирования были получены серии графиков зависимости вероятности битовой ошибки от величин битового отношения сигнал/шум при разных значениях величины помеха/сигнал в канале и средней скважности импульсной помехи. Для вероятности $1 \cdot 10^{-3}$ точность оценки битовой ошибки на основании проведенного моделирования составила 15% с доверительной вероятностью 0,9. Пример полученных результатов приведён на рис. 4.

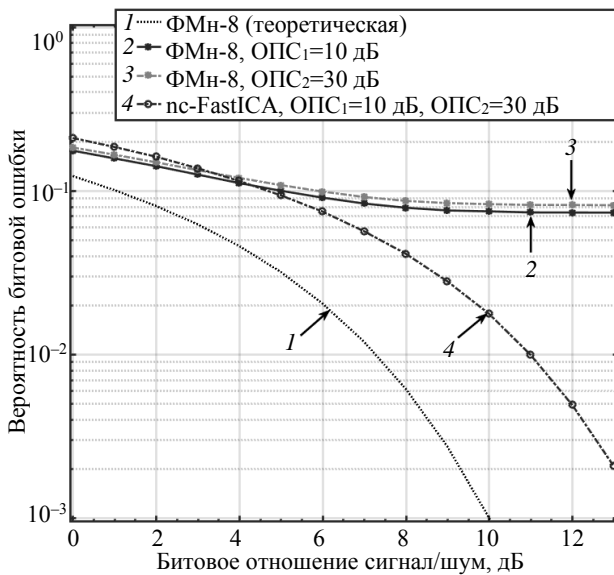


Рис. 4. График зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал/шум

Результаты моделирования, приведенные на рис. 4, были получены при средней скважности импульсной помехи $T_{\text{помехи}}$, равной 0,17.

Из рисунка видно, что экспериментальная кривая вероятности битовой ошибки (см. рис. 4, кривая 4), соответствующая демодуляции сигнала ФМн-8 после слепого разделения, примерно на 4 дБ отстоит от теоретической кривой (см. рис. 4, кривая 1). Но, в отличие от кривых, полученных в результате демодуляции принятых смесей без слепой обработки, с увеличением величины битового отношения сигнал/шум от 5 дБ и выше, данная кривая имеет убывающий характер. Кривые вероятностей битовой ошибки при демодуляции принятых смесей (см. рис. 3, кривые 2 и 3) с увеличением битового отношения сигнал/шум перестают убывать, останавливаясь на значениях $7,3 \cdot 10^{-2}$ (ОПС = 10 дБ) и $8,14 \cdot 10^{-2}$ (ОПС = 30 дБ).

По полученным кривым можно определить значение энергетического выигрыша от применения алгоритма слепого разделения сигналов nc-FastICA: для этого при разных значениях вероятности битовой

ошибки определим соответствующие им значения битового отношения сигнал/шум для случаев без слепого разделения сигналов и с применением алгоритма СРС.

Из рис. 4 определим, что до значения вероятности битовой ошибки $1,08 \cdot 10^{-1}$ в первом канале приема и $1,27 \cdot 10^{-1}$ во втором канале наблюдается энергетический проигрыш до 1 дБ. При вероятности битовой ошибки $8,36 \cdot 10^{-2}$ энергетический выигрыш относительно второго канала приема составляет примерно 2 дБ. Подобная величина энергетического выигрыша относительно первого канала приема достигается при вероятности битовой ошибки, равной $8,11 \cdot 10^{-2}$. При значениях вероятности битовой ошибки менее $7,3 \cdot 10^{-2}$ в первом канале и менее $8,14 \cdot 10^{-2}$ во втором канале становится невозможным определить величину энергетического выигрыша: кривая резко устремляется в бесконечность.

Таким образом, было принято решение определять величину выигрыша от применения алгоритмов слепого разделения сигналов по разнице вероятностей битовых ошибок при одинаковых значениях битового отношения сигнал/шум. Обозначим данную разницу вероятностей битовых ошибок как выигрыш по вероятности битовой ошибки. График зависимости выигрыша по вероятности битовой ошибки (в разгах) от величины битового отношения сигнал/шум приведен на рис. 5.

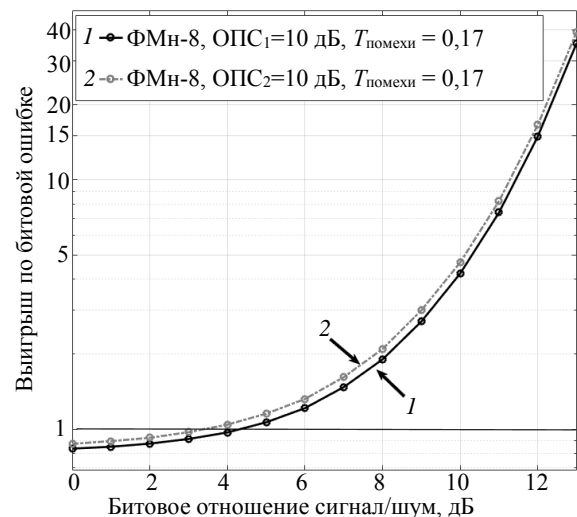


Рис. 5. График зависимости выигрыша по битовой ошибке от величин битового отношения сигнал/шум при применении алгоритма nc-FastICA

Из этого графика наглядно видно на примере алгоритма nc-FastICA, насколько эффективно могут применяться алгоритмы слепого разделения сигналов для повышения помехоустойчивости в каналах связи с импульсными помехами от СПД.

Так, например, при применении алгоритма nc-FastICA в канале связи с ФМн-8 и величиной битового отношения сигнал/шум равной 12 дБ, можно добиться вероятности битовой ошибки, равной

$4,93 \cdot 10^{-3}$, в то время как без слепой обработки при той же величине битового отношения сигнал/шум вероятность битовой ошибки составит $7,34 \cdot 10^{-2}$ при демодуляции смеси с отношением помеха-сигнал равным 10 дБ и $8,17 \cdot 10^{-2}$, с отношением помеха/сигнал 30 дБ соответственно.

Заключение

В работе оценена эффективность использования алгоритмов слепого разделения для каналов связи с фазовой манипуляцией и квазипериодической шумоподобной импульсной помехой от стационарных плазменных двигателей. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что применение алгоритма nc-FastICA позволяет существенно повысить помехоустойчивость каналов связи с ФМн-8 при воздействии импульсных помех от СПД. Показано, что при приёме сигнала ФМн-8 с импульсной помехой от СПД со средней скважностью 0,17 и отношениями помеха/сигнал 10 дБ в первом канале и 30 дБ во втором, при величине битового отношения сигнал/шум, равного 13 дБ, вероятность битовой ошибки равна $2,08 \cdot 10^{-3}$, что примерно в 35 раз ниже, чем в случае приема этих же смесей без слепой обработки.

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

Литература

1. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи / Н.А. Важенин, В.А. Обухов, А.П. Плохих, Г.А. Попов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 432 с.
2. The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the Past 24 Years. / D. Lev, R. Myers, K. Lemmer, J. Kolbeck, M. Keidar, H. Koizumi, H. Liang, D. Yu, T. Schönher, J. Gonzalez et al. // Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, GA, USA, 8–12 October 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/326925975_The_Technological_and_Commercial_Expansion_of_Electric_Propulsion_in_the_Past_24_Years, свободный (дата обращения: 18.11.2023).
3. Koppel C. The Smart-1 Electric Propulsion Subsystem / C. Koppel, D. Estublier // Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, AL, USA, 20–23 July 2003 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://sci.esa.int/documents/34677/36590/1567255180622-AIAA2004-3435-koppel-smart09.pdf>, свободный (дата обращения: 18.11.2023).
4. Development of the Psyche Mission for NASA's Discovery Program. / D.Y. Oh, S. Collins, D. Goebel, B. Hart, G. Lantoine, S. Snyder, G. Whiffen, L. Elkins-Tanton, P. Lord, Z. Pirkel et al. // Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference, Atlanta, GA, USA, 8–12 October 2017. Aerospace 2020, 7, 120 26 of 30 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricrocket.org/2019/192.pdf>, свободный (дата обращения: 18.11.2023).
5. Плохих А.П. Анализ влияния электромагнитного излучения стационарных плазменных двигателей на помехоустойчивость канала связи «земля – космический аппарат» / А.П. Плохих, Н.А. Важенин, Г.А. Попов // Космические исследования. – 2019. – Т. 57, № 5. – С. 339–346.

6. Naik G.R. Blind Source Separation: Advances in Theory, Algorithms and Applications / G.R. Naik, W. Wang, eds. // Signals and Communication Technology. Blind Source Separation. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. – 551 p.

7. Yu X. Blind source separation: theory and applications. / X. Yu, D. Hu, J. Xu. – John Wiley & Sons, Singapore Pte. Ltd., 2014. – 366 p.

8. Либеровский Н.Ю. Математическое моделирование слепого разделения двух вещественных сигналов с использованием кумулянтов четвертого порядка / Н.Ю. Либеровский, Д.С. Чиров, В.С. Припутин // Вестник ЮУрГУ МПИ. Сер.: Математическое моделирование и программирование. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 43–53.

9. Belouchrani A. A blind source separation technique using second-order statistics / A. Belouchrani, K. Abed-Meraim, J.F. Cardoso, E. Moulines // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1997. – Vol. 45, No. 2. – P. 434–444.

10. Sahonero-Alvarez G. A Comparison of SOBI, FastICA, JADE and Infomax Algorithms / G. Sahonero-Alvarez, H. Calderon // Proceedings of the 8th international multi-conference on complexity, informatics and cybernetics. – 2017. – P. 17–22.

11. Novey M. On Extending the Complex FastICA Algorithm to Noncircular Sources / M. Novey, T. Adali // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2008. – Vol. 56, No. 5. – P. 2148–2154.

12. Xie G. An Improved Complex-valued FastICA Algorithm for Jamming Signals Sorting in Beidou Navigation Satellite System / G. Xie, H. Tang, R. Xue // 2020 IEEE 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP). – Shanghai, China: IEEE, 2020. – P. 20–25.

Тяпкин Павел Станиславович

Аспирант каф. 408 «Инфокоммуникации» Московского авиационного института (МАИ) Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, Россия, 125993
Тел.: +7-999-969-79-87
Эл. почта: tjapkinp@yandex.ru

Важенин Николай Афанасьевич

Д-р техн. наук, проф. каф. 408 «Инфокоммуникации» МАИ Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, Россия, 125993
Тел.: +7 (499) 158-40-82
Эл. почта: VazheninNA@mai.ru

Плохих Андрей Павлович

Д-р техн. наук, проф. каф. 408 «Инфокоммуникации» МАИ Волоколамское шоссе, д. 4, г. Москва, Россия, 125993
Тел.: +7 (499) 158-00-20
Эл. почта: plokhikh2001@mail.ru

Tyapkin P.S., Vazhenin N.A., Plokhikh A.P.

Efficiency analysis for the application of blind signal separation methods to counter interference radiation from electric propulsions in space communication systems

The article considers the use of blind signal separation algorithms to improve interference immunity of the satellite communication channel with octal phase shift keying as applied to the interference, that is caused by the operation of stationary plasma thrusters (SPT), and represents one of the varieties of

electric propulsion [1]. During the study, a simulation model of communication channel with an additional channel for receiving interference from SPT was developed. While modeling, some pulsed noise-like signals, formed as a result of SPT operation, were considered as interference in the communication channel. The blind signal separation algorithm nc-FastICA used in the study is based on the method of independent component analysis. The main task of the modeling was to verify the applicability of blind signal separation methods to counter the interference from SPT in the communication channel. The simulation results proved the possibility of efficient use of blind signal separation algorithms to counter SPT interference. Application of the considered algorithm allows achieving a gain in bit error rate by two and more orders of magnitude. Thus, one of the worst cases of signal reception was considered: the gain from the use of the nc-FastICA algorithm is achieved when the bit signal-to-noise ratio is more than 10 dB and when the interference-to-signal ratio in the signal-receiving channel is 10 dB and in the interference receiving channel from the SPT is 30 dB.

Keywords: blind signal separation, independent component analysis, improvement of communication system interference immunity, deep space communication, EP.

DOI: 10.21293/1818-0442-2023-26-4-7-12

References

- Vazhenin N.A., Obuhov V.A., Plokhikh A.P., Popov G.A. *Elektricheskie raketnye dvigateli kosmicheskikh apparatov i ih vliyanie na radiosistemy kosmicheskoy svyazi* [Electric rocket engines of spacecraft and their influence on space communication radio systems]. M., FIZMATLIT, 2013, 432 p. (in Russ.).
- Lev D., Myers R., Lemmer K., Kolbeck J., Keidar M., Koizumi H., Liang H., Yu D., Schönherr T., Gonzalez J. et al. The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion in the Past 24 Years. *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference*, Atlanta, GA, USA, 8–12 October 2017. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326925975_The_Technological_and_Commercial_Expansion_of_Electric_Propulsion_in_the_Past_24_Years/, free (Accessed: November 18, 2023).
- Koppel C., Estublier D. The Smart-1 Electric Propulsion Subsystem. *Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Huntsville, AL, USA, 20–23 July 2003. Available at: <https://sci.esa.int/documents/34677/36590/1567255180622-AIAA2004-3435-koppel-smart09.pdf>, free (Accessed: November 18, 2023).
- Oh D.Y., Collins S., Goebel D., Hart B., Lantoine G., Snyder S., Whiffen G., Elkins-Tanton L., Lord P., Pirkl Z. et al. Development of the Psyche Mission for NASA's Discovery Program. *Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference*, Atlanta, GA, USA, 8–12 October 2017. *Aerospace* 2020, 7, 120–26 of 30. Available at: <http://electricrocket.org/2019/192.pdf>, free (Accessed: November 18, 2023).
- Plokhikh A.P., Vazhenin N.A., Popov G.A. Analysis of the influence of electromagnetic emission from stationary plasma thrusters on the interference immunity of the Earth-spacecraft communication channel. *Cosmic Research*. 2019, vol. 57, no. 5, pp. 339–346 (in Russ.).
- Naik G.R., Wang W., eds. *Blind Source Separation: Advances in Theory, Algorithms and Applications: Signals and Communication Technology*. Blind Source Separation. Berlin, Heidelberg: *Springer Berlin Heidelberg*, 2014, 551 p.
- Yu X., Hu D., Xu J. *Blind source separation: theory and applications*. Blind source separation. *Singapore: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.*, 2014, 366 p.
- Liberovskiy N.Y., Chirov D.S., Priputin V.S., Development of the two real signals blind separation method using fourth-order cumulants. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Mathematical Modelling, Programming & Computer Software" (Bulletin SUSU MMCS)*, 2020, vol. 13, no. 2, pp. 43–53 (in Russ.).
- Belouchrani A., Abed-Meraim K., Cardoso J.-F., Moulines E. A blind source separation technique using second-order statistics. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, vol. 45, no. 2, pp. 434–444.
- Sahonero-Alvarez G., Calderon H. A Comparison of SOBI, FastICA, JADE and Infomax Algorithms. *Proceedings of the 8th International Multi-conference on Complexity, Informatics and Cybernetics*, 2017.
- Novey M., Adali T. On Extending the Complex FastICA Algorithm to Noncircular Sources. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, vol. 56, no. 5, pp. 2148–2154.
- Xie G., Tang H., Xue R. An Improved Complex-valued FastICA Algorithm for Jamming Signals Sorting in Beidou Navigation Satellite System. *2020- IEEE 3rd International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP)*. Shanghai, China: IEEE, 2020, pp. 20–25.

Pavel S. Tyapkin

Postgraduate student, Department 408 «Infocommunications»
Moscow Aviation Institute (MAI)
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125993
Phone: +7-999-969-79-87
Email: tjapkin@yandex.ru

Nikolay A. Vazhenin

Doctor of Science in Engineering, Professor, Department 408
«Infocommunications» MAI
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125993
Phone: +7 (499) 158-40-82
Email: VazheninNA@mai.ru

Andrey P. Plokhikh

Doctor of Science in Engineering, Professor,
Department 408 «Infocommunications» MAI
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, Russia, 125993
Phone: +7 (499) 158-00-20
Email: plokhikh2001@mail.ru