

Научная статья

УДК 621.396.67

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-37-43



Анализ качества алгоритмов адаптивной пространственной и пространственно-частотной фильтрации сигналов в системах спутниковой навигации

Евгений Иванович Глушанков¹ ✉, glushankov57@gmail.com

Владимир Игоревич Царик², wladimirzarik@mail.ru

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М.А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

²ООО «Эйртэго»,
Санкт-Петербург, 197375, Российская Федерация

Аннотация: Рассмотрена задача компенсации помех при приеме спутникового навигационного сигнала. Приведены алгоритмы построения адаптивных пространственных и пространственно-частотных фильтров. Осуществлена обработка построенными фильтрами реальных спутниковых сигналов с широкополосной помехой в среде MATLAB. В результате сравнения различных показателей качества обработки выявлены наиболее эффективные алгоритмы фильтрации.

Ключевые слова: адаптивный пространственный фильтр, корреляционная матрица, вектор весовых коэффициентов, итерационная процедура, коэффициент подавления, пространственно-частотная обработка, антенная решетка, MATLAB, обращение мощности, формирование луча

Ссылка для цитирования: Глушанков Е.И., Царик В.И. Анализ качества алгоритмов адаптивной пространственной и пространственно-частотной фильтрации сигналов в системах спутниковой навигации // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 37–43. DOI:10.31854/ 1813-324X-2022-8-3-37-43

Quality Analysis of Space and Space-Frequency Adaptive Signal Processing Algorithms in Satellite Navigation Systems

Evgeniy Glushankov¹ ✉, glushankov57@gmail.com

Vladimir Tsarik², wladimirzarik@mail.ru

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

²Airtago, LLC,
St. Petersburg, 197375, Russian Federation

Abstract: The problem of interference mitigation in satellite navigation signals is considered. Construction algorithms for space- and space-frequency adaptive filters are described. The processing of real satellite signals with broadband interference by means of the constructed filters is carried out in MATLAB. As a result of comparing different processing quality indicators, the most efficient filtering algorithms are identified.

Keywords: *space adaptive filter, correlation matrix, weight coefficients vector, iteration procedure, suppression coefficient, space-frequency processing, antenna array, MATLAB, power inversion, beamforming*

For citation: Glushankov E., Tsarik V. Quality Analysis of Space and Space-Frequency Adaptive Signal Processing Algorithms in Satellite Navigation Systems. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(3):37–43. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-37-43

1. Введение

Глобальная спутниковая система навигации находит широкое применение для определения координат различных объектов (наземных, водных, воздушных объектов, низкоорбитальных космических аппаратов). Однако полезные навигационные сигналы, поступающие от спутников, обладают повышенной уязвимостью к воздействию различных помех ввиду слабой мощности сигнала вблизи поверхности Земли. Наличие в спутниковом сигнале различного рода помех существенно затрудняет его обработку приемником и приводит к увеличению погрешности при вычислении навигационных характеристик. В этой связи задача подавления помехи при приеме спутниковых навигационных сигналов посредством их фильтрации является достаточно важной и актуальной [1].

Среди различных методов фильтрации эффективными и достаточно часто применяемыми являются методы пространственной фильтрации, основанные на фокусировке диаграммы направленности антенной решетки радиотехнической системы таким образом, чтобы направление ее основного лепестка совпадало с направлением на источник полезного сигнала, а направления на источники помех попадали в ее нули. Такие методы фильтрации называются пространственными, так как их функционирование и качество определяется пространственной конфигурацией антенной решетки радиотехнической системы. Результаты работы пространственных фильтров можно существенно улучшить, если сделать их трансверсальными путем добавления в каждый из приемных каналов на выходе антенных элементов линий временных задержек. Такие фильтры, в свою очередь, называются пространственно-временными фильтрами. Добавление дополнительных временных отсчетов увеличивает количество степеней свободы при построении фильтра и, как следствие, увеличивает его устойчивость к широкополосным и многолучевым помехам. В свою очередь, обработка задержанных временных отсчетов в частотной области называется пространственно-частотной обработкой, которая также улучшает качество такой совместной фильтрации [1, 2].

В данной работе рассматривается несколько различных алгоритмов построения пространственных и пространственно-частотных фильтров. Сравнительный анализ качества пространственной и пространственно-частотной обработки сигналов построенными фильтрами будет проводиться по

быстродействию, коэффициенту подавления помех и отношению сигнал/шум на основе экспериментально записанных сигналов от спутников и помех в реальной спутниковой радиотехнической системе.

2. Постановка задачи

Рассмотрим следующую постановку задачи адаптивной пространственной (пространственно-частотной) фильтрации сигналов. Пусть в плоскости Oxy расположена кольцевая эквидистантная антенная решетка, состоящая из восьми антенных элементов (рисунк 1).

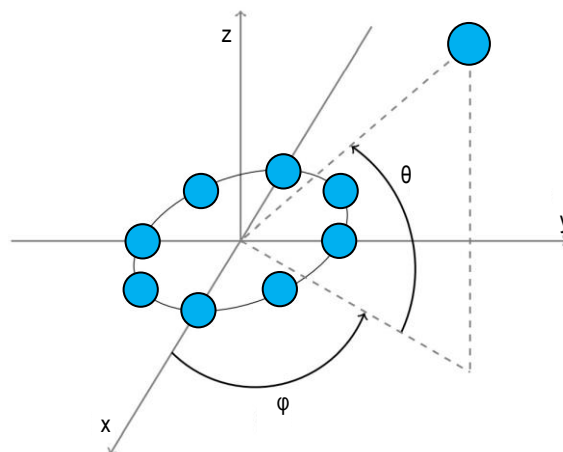


Рис. 1. Взаимное расположение антенной решетки и источника сигнала (помехи)

Fig. 1. Mutual Displacement of an Antenna Array and a Signal (or Interference) Source

Такая реальная восьмиэлементная кольцевая решетка использовалась при экспериментальных исследованиях. Центр решетки расположен в начале координат, радиус окружности равен 7,19 см. В верхнем полупространстве ($z > 0$) расположены один источник полезного сигнала и несколько некоррелированных источников широкополосной помехи. На входе антенной решетки присутствует входной сигнал $x \in \mathbb{C}^{8 \times K}$, где K – количество временных отсчетов сигнала, представляющий собой аддитивную смесь полезного сигнала, помехи и шума, при этом уровень полезного сигнала выше уровня шума, а уровень помехи выше уровня полезного сигнала. Такая ситуация наиболее характерна при функционировании спутниковых навигационных систем. Пусть для обработки принимаемых сигналов и помех используется адаптивный пространственный (пространственно-частотный) фильтр, выходной сигнал y которого

представляет собой выделенный из смеси с помехой и шумом полезный сигнал, причем $y \in \mathbb{C}^K$. На сегодняшний день известно большое количество различных алгоритмов построения фильтров, решающих поставленную выше задачу. В данной работе будет рассмотрен анализ и сравнение нескольких наиболее применимых для данной ситуации алгоритмов пространственной и пространственно-частотной фильтрации реальных спутниковых сигналов методом моделирования в среде MATLAB.

3. Построение фильтров

3.1. Пространственные фильтры

Рассмотрим несколько алгоритмов вычисления весовых коэффициентов пространственного фильтра, основанных на прямых и итерационных адаптивных процедурах.

Прямые алгоритмы

При использовании прямых алгоритмов весовые коэффициенты w вычисляются по формулам, использующим информацию о корреляционных характеристиках входных сигналов, путем непосредственного обращения корреляционных матриц, а выходной сигнал фильтра y определяется следующим образом:

$$y = w^T x,$$

где w – вектор весовых коэффициентов пространственного (пространственно-частотного) фильтра.

Различные алгоритмы фильтрации отличаются друг от друга методом, используемым при вычислении весовых коэффициентов w . Рассмотрим прямые алгоритмы адаптации.

Алгоритм обращения мощности

Алгоритм обращения мощности или формирования нуля диаграммы направленности основывается на винеровском решении путем вычисления обратной корреляционной матрицы R^{-1} входного сигнала [3]. Выполняя преобразование путем нормировки относительно средних значений мощности, весовые коэффициенты можно определить по следующей формуле:

$$w = \begin{pmatrix} 1 & \frac{R_{12}^{-1}}{R_{11}^{-1}} & \dots & \frac{R_{18}^{-1}}{R_{11}^{-1}} \\ \frac{R_{21}^{-1}}{R_{22}^{-1}} & 1 & \dots & \frac{R_{28}^{-1}}{R_{22}^{-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{R_{81}^{-1}}{R_{88}^{-1}} & \frac{R_{82}^{-1}}{R_{88}^{-1}} & \dots & 1 \end{pmatrix} I,$$

где R_{ij} – элемент i -й строки j -го столбца корреляционной матрицы R ($i, j = 1, 2, \dots, 8$); I – единичный вектор-столбец размерности 8.

Алгоритм формирования луча

Алгоритм формирования луча [3], как и метод обращения мощности, основывается на обращении корреляционной матрицы входного сигнала, однако при его использовании применим следующую формулу для вычисления весовых коэффициентов:

$$w(\varphi, \theta) = \left(\frac{R^{-1} a(\varphi, \theta)}{a(\varphi, \theta)^H R^{-1} a(\varphi, \theta)} \right)^T, \quad (1)$$

где $a(\varphi, \theta)$ – управляющий вектор антенной решетки по направлению, заданному долготой φ и широтой θ (см. рисунок 1), определяемый как:

$$a(\varphi, \theta) = \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} uv \right\}, \quad (2)$$

i – мнимая единица; $\lambda = 0,19$ м – длина волны полезного сигнала, соответствующая центральной частоте сигнала GPSL1; u – матрица декартовых координат антенных элементов,

$$v = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \theta \end{pmatrix}.$$

С учетом того, что направления θ и φ на полезный сигнал априори неизвестны, оптимальные весовые коэффициенты определяются из условия максимизации коэффициента подавления помехи, равного отношению мощностей входного и выходного сигналов.

Алгоритм формирования луча с приближенными вычислением и обращением циркулянтной корреляционной матрицы

При данном подходе для вычисления вектора весовых коэффициентов также используется обратная корреляционная матрица входного сигнала и дополнительно учитывается тот факт, что у кольцевой эквидистантной антенной решетки корреляционная матрица является сопряженной циркулянтной [4]. При этом оценку сопряженной циркулянтной корреляционной матрицы можно получить следующим образом:

$$\hat{R}_{i,j} = \frac{1}{8(8-(j-i))} x \sum_{k=1}^8 \sum_{l=1}^{8-j+i} x_l(k) x_{j-i+l}^*(k), \quad i \leq j, \\ \hat{R}_{N+1-j,i} = \hat{R}_{i,j}^*, \quad i > j.$$

Матрицу $\hat{R}^{-1}$, обратную к полученной оценке сопряженной циркулянтной матрицы $\hat{R}$, можно вычислить с применением специального итерационного алгоритма, увеличивающего скорость вычислений [5]. Далее весовые коэффициенты фильтра вычисляются с использованием матрицы $\hat{R}^{-1}$ и формулы (1).

Использование спектрального разложения

В данном случае корреляционную матрицу входного сигнала представим в виде:

$$R = VDV^*,$$

где V – матрица, составленная из собственных векторов R ; D – диагональная матрица, составленная из собственных чисел $\lambda_1, \dots, \lambda_8$, для которых выполняются соотношения:

$$\lambda_1 \approx \lambda_2 \approx \dots \approx \lambda_M < \lambda_{M+1} < \dots < \lambda_8$$

для некоторого $M \in \{1, 2, \dots, 8\}$. Далее из матрицы V выбирается подматрица $\tilde{V}$, состоящая из первых M столбцов V . Тогда весовые коэффициенты w вычисляются по формуле:

$$w = \tilde{V} \tilde{V}^H.$$

Итерационный пространственный фильтр

В случае итерационной процедуры вычисления весовые коэффициенты w_k фильтра и отсчеты y_k выходного сигнала пересчитываются в соответствии с алгоритмом LMS (аббр. от англ. Least Mean Squares – наименьшие средние квадраты, то есть алгоритм, оптимальный по данному критерию) по формулам [6]:

$$\begin{aligned} w_0 &= (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T, \\ d_k &= x_{1,k}, x_k = (x_{2,k}, \dots, x_{8,k})^T, \\ y_k &= d_k - w_{k-1}^H x_k, \\ w_k &= w_{k-1} + \mu x_k y_k^*, \end{aligned}$$

где $k = 1, \dots, K$; μ – параметр алгоритма, называемый «параметром забывания».

Во всех прямых методах адаптации в качестве корреляционных матриц используются выборочные, получаемые по обучающей матрице входных сигналов или помех, причем размерность обучающей выборки превышает число каналов пространственной (или пространственно-частотной) обработки, то есть матрицы являются невырожденными.

3.2. Пространственно-частотная обработка

Пространственно-частотную обработку сигнала будем осуществлять путем деления каждого канала входного сигнала на секции по 1024 временных отсчетов. Такая реализация удобна тем, что впоследствии может быть достаточно легко приспособлена для использования в программируемых логических интегральных схемах. Сначала все временные отсчеты каждого входного канала $x_l(l = 1, \dots, 8)$ в секции преобразуем в частотную область с использованием дискретного преобразования Фурье, определяемого формулой [7]:

$$X_l(k) = \sum_{j=1}^{1024} x_l(j) e^{-\frac{\pi i}{512}(k-1)(j-1)},$$

где i – мнимая единица; $k = 1, \dots, 1024$.

Затем в частотной области каждую секцию будем делить на сегменты по 128 отсчетов. В каждом сегменте частотные отсчеты $Y \in \mathbb{C}^{128}$ выходного сигнала вычисляются с помощью умножения частотных отсчетов $X \in \mathbb{C}^{8 \times 128}$ входного сигнала на вектор весовых коэффициентов $w \in \mathbb{C}^8$ пространственно-частотного фильтра:

$$Y = w^H X.$$

Как показано в [8], выбранное количество частотных отсчетов в сегменте вычисления весов фильтра, равное 128, обеспечивает оптимальную работу алгоритма фильтрации с точки зрения соотношения между вычислительными затратами и качеством фильтрации сигнала: уменьшение количества частотных отсчетов в сегменте снижает объем вычислений, но приводит к худшему подавлению помехи, а увеличение дает лишь незначительное улучшение качества компенсации, но серьезно повышает вычислительную сложность алгоритма.

Весовые коэффициенты w фильтра определяем в соответствии со следующим выражением [1]:

$$w = \frac{\hat{R}^{-1} s}{s^H \hat{R}^{-1} s}. \quad (3)$$

Здесь $\hat{R}$ – оценка ковариационной матрицы частотных отсчетов входного сигнала с диагональной нагрузкой, вычисляемая по всему сегменту по формуле:

$$\hat{R} = \tilde{R} + 0,001 \cdot \text{tr}(\tilde{R}) E_8,$$

где

$$\tilde{R} = \sum_{k=1}^{128} X(k) X^H(k),$$

$\text{tr}(\cdot)$ – оператор следа матрицы; E_8 – единичная матрица порядка 8, а вектор $s \in \mathbb{C}^8$ будем задавать двумя следующими способами.

Первый способ заключается в задании s как вектора, все элементы которого равны нулю, кроме одного, равного единице. Данный подход аналогичен рассмотренному в подразделе *Алгоритм обращения мощности*. За счет многократного применения данного алгоритма с разным расположением единицы в векторе s можно получить до восьми различных выходных сигналов.

Второй способ заключается в задании вектора s как управляющего вектора антенной решетки в соответствии с формулой (2). В этом случае формула (3) для вычисления весовых коэффициентов совпадает с формулой (1) пространственного алгоритма формирования луча. При таком подходе получается только один выходной сигнал y .

Для ускорения вычисления весов w фильтра можно воспользоваться различными методами ортогонализации корреляционных матриц. Используем для этого разложение Холецкого оценки $\hat{R}$ ко-

вариационной матрицы частотных отсчетов входного сигнала, определяемое выражением:

$$\hat{R} = LL^H,$$

где L – нижнетреугольная матрица.

При использовании данного разложения обращение матрицы $\hat{R}$ и умножение полученной обратной матрицы на вектор s сводится к решению двух систем линейных алгебраических уравнений с треугольными матрицами, которое осуществляется с использованием простых рекуррентных соотношений. В данном случае применение разложения Холецкого возможно в связи с тем, что матрица $\hat{R}$ является эрмитовой и положительно определенной, что обеспечивается как за счет способа определения матрицы $\hat{R}$ и количества частотных отсчетов для ее вычисления, так и за счет диагональной нагрузки, которая сдвигает собственные значения матрицы $\hat{R}$ дальше от нуля. После вычисления весов w фильтра и частотных отсчетов Y выходного сигнала с помощью обратного преобразования Фурье вычисляются отсчеты выходного сигнала u во временной области для текущего сегмента. Далее вся процедура повторяется для каждого сегмента каждой секции отсчетов входного сигнала.

Компьютерное моделирование

Для сравнения работы описанных выше алгоритмов пространственной и пространственно-частотной фильтрации были проведены эксперименты по обработке в среде MATLAB экспериментальных записей реальных спутниковых сигналов с несколькими (от одного до трех) некоррелированными источниками широкополосной помехи. При записи сигналов антенная решетка и источники полезного сигнала и помехи находились в безэховой экранированной камере, при этом спутниковый сигнал принимался на крыше здания и подавался в камеру через систему кабелей. Схема эксперимента представлена на рисунке 2. Рассматривались различные сигнально-помеховые ситуации, отличающиеся числом помех (от одной до трех), энергетическими характеристиками и углами прихода. В результате проведения нескольких экспериментов были получены записи сигналов, состоящих из смеси помех, полезных спутниковых сигналов и шумов, уровни которых соответствуют заданным при постановке задачи фильтрации (уровень полезного сигнала выше уровня шума, а уровень помехи выше уровня полезного сигнала, что характерно для спутниковой навигации). Далее эти записи, имеющие вид дискретных последовательностей временных отсчетов сигналов, были подвергнуты равномерному квантованию (в блоке 6) и записаны в память ЭВМ (блок 7) для последующей обработки по анализируемым алгоритмам, программные блоки которых реализованы в виде отдельных функций (по числу алгоритмов фильтрации) в среде MATLAB.

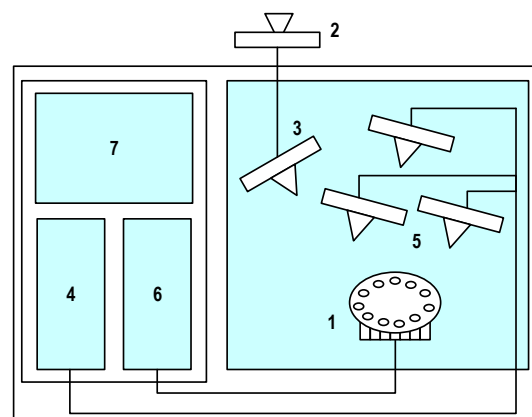


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 – антенная решетка, установленная в безэховой камере; 2 – антенна, принимающая спутниковый сигнал на крыше здания; 3 – антенна, передающая спутниковый сигнал в безэховую камеру; 4 – устройство для излучения помех; 5 – антенны, излучающие помехи; 6 – устройство для записи сигнала с антенной решеткой; 7 – ЭВМ, осуществляющая цифровую обработку сигналов

Fig. 2. Experiment Scheme: 1 – Antenna Array in an Anechoic Chamber; 2 – Satellite Signal Receiving Antenna on the Building Roof; 3 – Antenna That Transmits the Satellite Signal into the Anechoic Chamber; 4 – Jamming Device; 5 – Antennas That Transmit Interference; 6 – Device That Records Signals from Antenna Array; 7 – Computer That Implements Digital Signal Processing

При компьютерном моделировании с помощью встроенной в MATLAB функции измерялось время работы (ВР) каждого алгоритма и максимальный поканальный коэффициент подавления (КП) помехи, равный отношению мощностей входного и выходного сигналов. Для вычисления прямого и обратного дискретного преобразования Фурье использовалась встроенная в среду MATLAB функция вычисления быстрого преобразования Фурье. После компенсации выходной сигнал подавался на вход программного приемника спутниковых сигналов SoftGNSS [9], где измерялось среднее отношение сигнал/шум (ОСШ) для обнаруженного источника полезного спутникового сигнала, которое в указанном приемнике вычисляется с помощью метода суммирования дисперсии [10]. Результаты обработки сигналов длиной $K = 5 \cdot 10^6$ отсчетов с абсолютным уровнем 37 дБ без помехи и отношением сигнал/шум 45 дБ приведены в таблице 1. Прочерки означают отсутствие видимых спутников в обработанном сигнале. Результаты анализа зависимости коэффициента подавления и среднего ОСШ приведены на рисунках 3 и 4, соответственно.

Из результатов экспериментов можно сделать следующие выводы. Быстродействие прямых алгоритмов пространственной обработки оказалось наибольшим, однако при этом значения основных показателей качества – КП и ОСШ при такой обработке получились меньше, чем у других алгоритмов.

ТАБЛИЦА 1. Результаты экспериментов

Table 1. Results of Experiments

N_n	УС	Результаты обработки сигналов	Алгоритм						
			Обращение мощности	Формирование луча	ФЛ с циркулянтной матрицей	Спектральное разложение	LMS	ПЧО с ФН	ПЧО с ФЛ
1	60	ВР, с	1,03	2,19	0,92	1,09	24,12	66,84	17,48
		КП, дБ	29	40	30	30	31	3	41
		ОСШ, дБ	48	49	32	50	50	51	37
1	75	ВР, с	0,95	2,45	1,3	1,03	24,31	66,47	22,23
		КП, дБ	34	52	38	34	45	45	55
		ОСШ, дБ	39	47	37	39	51	51	39
2	69	ВР, с	0,96	2,59	1,31	1,01	20,82	63,64	15,96
		КП, дБ	17	26	24	16	42	32	48
		ОСШ, дБ	–	25	–	25	25	46	42
3	72	ВР, с	0,98	3,1	1,56	1,07	20,47	64,12	15
		КП, дБ	14	26	14	15	27	30	45
		ОСШ, дБ	–	–	–	–	39	41	42

Условные обозначения:

N_n – количество помех; УС – уровень сигнала, дБ; ПЧО – пространственно-частотная обработка; ФН – алгоритм формирования нуля; ФЛ – алгоритм формирования луча

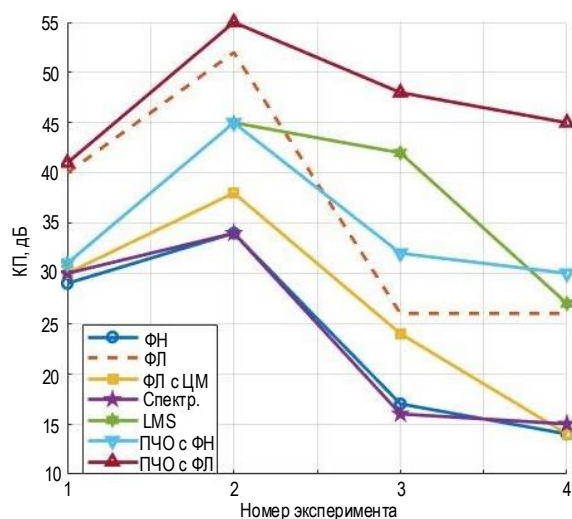


Рис. 3. Значения КП исследуемых алгоритмов в различных экспериментах

Fig. 3. Suppression Coefficient Values of the Investigated Algorithms in Different Experiments

Особенно ухудшение работы прямых пространственных методов наблюдается при наличии более чем одного источника помехи, в этом случае полезные сигналы спутников в выходном сигнале решетки имеют минимальное значение, а иногда и вообще отсутствуют. Постепенное уменьшение значений ОСШ при обработке точными алгоритмами особенно хорошо видно на рисунке 4.

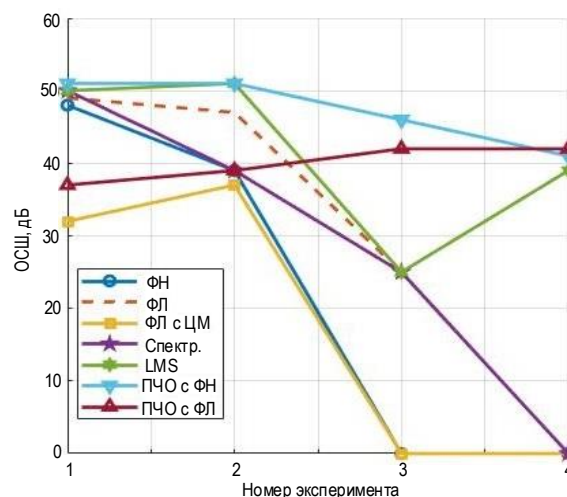


Рис. 4. Значения ОСШ в обработанном сигнале в различных экспериментах

Fig. 4. Signal-to-Noise Ratio Values of the Processed Signal in Different Experiments

С точки зрения быстродействия и качества обработки наилучшие результаты наблюдаются у алгоритма, основанного на спектральном разложении. Несмотря на то, что при обработке данным алгоритмом получаются относительно низкие значения КП, что следует из рисунка 3, значения ОСШ в выходном сигнале примерно равны средним значениям в каждом из экспериментов, что видно из положения соответствующей кривой (см. рисунок 4). Итерационный же пространственный алгоритм показывает большее время работы по сравнению с прямыми методами, но также и большую устойчивость к количеству помех и значения КП и ОСШ, близкие к пространственно-частотным методам.

В свою очередь, алгоритмы пространственно-частотной обработки одинаково справляются с любым количеством помех и показывают наилучшие значения КП и ОСШ в выходном сигнале. При этом пространственно-частотная обработка с применением алгоритма обращения мощности работает в 3–4 раза дольше, чем с алгоритмом формирования луча, но в то же время показывает лучшие значения КП и ОСШ. Стоит также отметить общее падение КП всех алгоритмов при увеличении числа помех, которое хорошо видно из рисунка 3.

5. Заключение

В данной работе были рассмотрены несколько алгоритмов адаптивной пространственной и пространственно-частотной фильтрации. Качество работы приведенных алгоритмов было проанализировано путем цифровой обработки на компьютере реальных спутниковых сигналов. Результаты компьютерного моделирования в разных сигнально-помеховых условиях свидетельствуют о преимуществах использования пространственно-частотных фильтров перед пространственными фильтрами.

При этом в зависимости от требований к быстродействию обработки сигналов возможно применение либо наиболее быстрых алгоритмов формирования луча, либо более медленных, но точных алго-

ритмов обращения мощности. Таким образом, можно рекомендовать пространственно-частотные алгоритмы фильтрации для использования в системах помехозащищенной навигации.

Список источников

1. Xu H., Cui X., Lu M. An SDR-Based Real-Time Testbed for GNSS Adaptive Array Anti-Jamming Algorithms Accelerated by GPU // *Sensors*. 2016. Vol. 16. Iss. 3. P. 356. DOI:10.3390/s16030356
2. Sklar J.R. Interference Mitigation Approaches for the Global Positioning System // *Lincoln Laboratory Journal*. 2003. Vol. 14. Iss. 2. PP. 167–180.
3. Van Trees H.L. *Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory*. NewYork: John Wiley & Sons, 2002.
4. Glushankov E.I., Kirik D.I., Kirsanov D.M., Rylov E.A. Adaptation of antenna arrays with using correlation matrices of a special types // *Proceedings of the Conference on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, Kaliningrad, Russia, 30 June–02 July 2021)*. IEEE, 2021. DOI:10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488331
5. Воеводин В.В., Тыртышников Е.Е. Вычислительные процессы с теплоцевыми матрицами. М.: Наука, 1987. 320 с.
6. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
7. Мало́зов В.Н., Машарский С.М. Основы дискретного гармонического анализа: учебное пособие. СПб.: «Лань», 2012. 304 с.
8. Melvin W.L. A STAP overview // *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2004. Vol. 19. Iss. 1. PP. 19–35. DOI:10.1109/MAES.2004.1263229
9. Borre K., Akos D.M., Bertelsen N., Rinder P., Jensen S.H. *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach*. Boston: Birkhäuser, 2007. 176 p.
10. Sharawi M.S., Akos D.M., Aloï D.N. GPS C/N0 estimation in the presence of interference and limited quantization levels // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2007. Vol. 43. Iss. 1. PP. 227–238. DOI:10.1109/TAES.2007.357129

References

1. Xu H., Cui X., Lu M. An SDR-Based Real-Time Testbed for GNSS Adaptive Array Anti-Jamming Algorithms Accelerated by GPU. *Sensors*. 2016;16(3):356. DOI:10.3390/s16030356
2. Sklar J.R. Interference Mitigation Approaches for the Global Positioning System. *Lincoln Laboratory Journal*. 2003. Vol. 14. Iss. 2. PP. 167–180.
3. Van Trees H.L. *Optimum Array Processing. Part IV of Detection, Estimation and Modulation Theory*. NewYork: John Wiley & Sons; 2002.
4. Glushankov E.I., Kirik D.I., Kirsanov D.M., Rylov E.A. Adaptation of antenna arrays with using correlation matrices of a special types. *Proceedings of the Conference on Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO, 30 June–02 July 2021, Kaliningrad, Russia*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488331
5. Voevodin V.V., Tyrtshnikov E.E. *Calculation Processes with Toeplitz Matrices*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 320 p. (in Russ.)
6. Dzhigan V.I. *Adaptive Signal Processing: Theory and Algorithms*. Moscow: Tekhnosfera Publ.; 2013. 528 p. (in Russ.)
7. Malozymov V.N., Masharskiy S.M. *Foundations of Discrete Harmonic Analysis*. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2012. 304 p. (in Russ.)
8. Melvin W.L. A STAP overview. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2004;19(1):19–35. DOI:10.1109/MAES.2004.1263229
9. Borre K., Akos D.M., Bertelsen N., Rinder P., Jensen S.H. *A Software-Defined GPS and Galileo Receiver. A Single-Frequency Approach*. Boston: Birkhäuser; 2007. 176 p.
10. Sharawi M.S., Akos D.M., Aloï D.N. GPS C/N0 estimation in the presence of interference and limited quantization levels. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2007;43(1):227–238. DOI:10.1109/TAES.2007.357129

Статья поступила в редакцию 20.06.2022; одобрена после рецензирования 05.08.2022; принята к публикации 11.08.2022.

The article was submitted 20.06.2022; approved after reviewing 05.08.2022; accepted for publication 11.08.2022.

Информация об авторах:

**ГЛУШАНКОВ
Евгений Иванович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0003-4148-3208>

**ЦАРИК
Владимир Игоревич**

ведущий инженер ООО «Эйртэго»

 <https://orcid.org/0000-0003-3428-9976>