

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
В АНТЕННЫХ СИСТЕМАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ
ДЛЯ НИЗКОЛЕТЯЩИХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Афанасьев Никита Андреевич

аспирант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: plaffy.cs@gmail.com

Глушанков Евгений Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиосистем и обработки сигналов
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: glushankov57@gmail.com

Адрес: Адрес: 193232, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, корп. 1.

Аннотация: При использовании спутниковых систем связи через низколетящие космические аппараты важным является вопрос помехоустойчивости радиолиний. Это связано с удаленностью космических станций, доступностью спутниковых ретрансляторов с обширной области земли и общей радиоэлектронной обстановкой в совпадающих и близких диапазонах частот. В спутниковых системах возможны ситуации, когда эфир того или иного спутникового ретранслятора возможно подавить при помощи использования направленных помех с земной станции. Есть множество способов уменьшения влияния помех, одним из которых является использование пространственно-временной обработки сигнала на борту ретранслятора с синтезированной апертурой. Синтез апертуры в данном случае происходит за счёт движение космических аппаратов по низкой околоземной орбите. В данном случае временное разнесение отсчётов будет исчисляться долями миллисекунд. Для исследования алгоритмов адаптивной обработки сигналов в таких системах были построены модели, рассчитывающие вероятность ошибки при разных отношениях сигнал/шум, разных длинах синтезированных апертур и разных частотах излучений. При этом рассмотрены четыре варианта частотных диапазонов и четыре варианта длин синтезированной апертуры. В результате моделирования были определены оптимальные, по вероятности ошибки и отношению сигнал/шум, конфигурации использования адаптивного алгоритма обработки сигнала в антенных системах с синтезированной апертурой для низколетящих космических аппаратов.

Ключевые слова: алгоритм адаптации, синтезированная апертура, адаптивный фильтр, регуляризация, вектор весовых коэффициентов, CubSat.

Существует много различных способов повышения помехоустойчивости радиолокационных, радионавигационных систем и систем радиосвязи, среди которых одними из наиболее конструктивных являются методы первичной обработки сигнала, и в частности, пространственно-временная обработка сигналов в адаптивных антенных решётках [1, 2]. При этом для алгоритмов обработки сигналов, использующихся на низколетящем космическом аппарате (НКА), существенным фактором является необходимость обеспечения их высокой скорости сходимости к оптимальному решению из-за высокой скорости движения самого

космического аппарата (КА) [3]. Среди подобных алгоритмов для НКА рассмотрим алгоритм пространственно-временной обработки (ПВОС) в адаптивных антеннах с синтезированной апертурой (СА), варианты реализации которых предложены в [4–6].

Основываясь на представлении, предложенном в [4], запишем в общем виде сигнал на входе антенной системы с синтезированной апертурой в i -й момент времени ($i = 1, 2, \dots, N$, N — число элементов синтезированной апертуры):

$$x(t_i) = S(t_i) \exp(-j\phi_s(t_i)) +$$

$$+ \sum_{k=1}^K p_k(t_i) \exp(-j\phi_{pk}(t_i)) + n(t_i),$$

где $S(t_i)$, $p_k(t_i)$ — функции, определяющие форму огибающей сигнала и помех; $n(t_i)$ — аддитивный белый гауссовский шум; K — число помех; $\phi_s(t_i)$, $\phi_p(t_i)$ — их фазовые составляющие, описываемые выражением вида [7]:

$$\begin{aligned} \phi_s(t_i) &\approx w_{0s}t_i - \frac{2\pi R_{0si}}{\lambda_s} + \frac{2\pi vt_i}{\lambda_s} \sin \theta_{si} - \\ &\quad - \frac{\pi v^2 t_i^2}{\lambda_s R_{0si}} \cos^2 \theta_{si} + \phi_{si}(t_i); \\ \phi_p(t_i) &\approx w_{0p}t_i - \frac{2\pi R_{0pi}}{\lambda_p} + \frac{2\pi vt_i}{\lambda_p} \sin \theta_{pi} - \\ &\quad - \frac{\pi v^2 t_i^2}{\lambda_p R_{0pi}} \cos^2 \theta_{pi}. \end{aligned}$$

Здесь $w_{0s}t_i$, $w_{0p}t_i$ — линейно изменяющиеся со временем фазовые сдвиги относительно несущей частоты сигнала и помехи; $\frac{2\pi R_{0si}}{\lambda_s}$, $\frac{2\pi R_{0pi}}{\lambda_p}$ — фазовые сдвиги, обусловленные временем распространения сигналов от станции до ЛА; $\frac{2\pi vt_i}{\lambda_s} \sin \theta_{si}$, $\frac{2\pi vt_i}{\lambda_p} \sin \theta_{pi}$ — линейные составляющие изменения фазы сигнала и помехи, обусловленные доплеровским смещением частоты; $\frac{\pi v^2 t_i^2}{\lambda_s R_{0si}} \cos^2 \theta_{si}$, $\frac{\pi v^2 t_i^2}{\lambda_p R_{0pi}} \cos^2 \theta_{pi}$ — квадратичные составляющие изменения фазы сигнала и помехи; $\phi_{si}(t_i)$ — информационная составляющая фазы сигнала.

Предполагается, что мощность помехи имеет более высокий уровень относительно полезного сигнала, из чего определяется оптимальное значение вектора весовых коэффициентов (ВВК) [1, 8]

$$W = b \widehat{M}^{-1} S_{оп}, \quad (1)$$

где b — произвольное число, не равное нулю; $S_{оп}$ — значение вектора опорного сигнала,

определяемого углом прихода полезного сигнала; \widehat{M} — оценка матрицы ковариации помех вида $M_{pp} = E[pp^T]$; p — вектор помех (при превышении уровня помех над сигналом можно принять, что $p = x$); E — символ математического ожидания; τ — знак транспонирования, размерности векторов и матриц определяются величиной размера апертуры N .

Основываясь на предположении, что координаты источника полезного сигнала либо априорно известны, либо определены известными методами [8], в качестве вектора опорного сигнала используется вектор, характеризующий направление прихода полезного сигнала:

$$S_{оп}(k) = [e^{-j\phi k_1}, e^{-j\phi k_2}, \dots, e^{-j\phi k_N}],$$

где N — число, определяющее размер синтезируемой апертуры; k — величина, определяющая положение отрезка наблюдения на линии синтеза (рис. 1); ϕk_i — значение фазы полезного сигнала на входе антенны в момент дискретного времени k_i .

Размер соответствующих матриц и векторов определяется количеством отсчетов, используемых при синтезе апертуры. Значение достаточной статистики, определяющее оценку полезного сигнала на выходе устройства обработки, после синтезирования апертуры равно $y(k) = W^T(k)x(k)$.

Обычно максимально правдоподобная оценка матрицы M , которая используется в (1) для определения ВВК, находится из выражения

$$\widehat{M} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^L x(k)x^T(k),$$

где L — число элементов обучающей выборки.

Для хорошей обусловленности матрицы \widehat{M} требуется, чтобы $L \geq N$ (N — размерность ВВК). В противном случае ($L < N$) матрица будет вырожденной или плохо обусловленной. Однако при применении алгоритма прямого обращения матрицы (1) целесообразно выби-

Таблица 1.

Номер конфигурации	Частота излучения (МГц)	Местоположения источника полезного сигнала		Стартовое положение под спутниковой точки КА		Доплеровское смещение частоты (кГц)
		Широта	Долгота	Широта	Долгота	
1	250	60	30	51	34	0,5
2	1600	60	30	51	34	3
3	4200	60	30	51	34	8
4	8100	60	30	51	34	16

рять $L=1$, т. е. осуществлять мгновенную оценку матрицы, в связи с перемещением КА и необходимостью вычисления в реальном времени оценки полезного сигнала. Поэтому в данном случае ковариационная матрица \widehat{M} всегда вырожденная.

Для предотвращения расходимости алгоритма пространственно-временной обработки сигналов при вырожденной матрице \widehat{M} целесообразно использовать метод регуляризации [6]. В данном случае мгновенная оценка матрицы M определяется в каждый момент времени как

$$\widehat{M} = \alpha I + xx^T,$$

где $\alpha > 0$ — параметр регуляризации; I — единичная матрица размера $N \times N$.

Данный алгоритм разрабатывался для реализации на базе космических аппаратов типа SubSat. В качестве платформы реализации могут использоваться как цифровой сигнальный процессор (ЦПОС), так и ПЛИС. Рассмотрим следующую конфигурацию для проверки результативности данного алгоритма, приведённую в таблице 1.

Параметры КА, а именно местоположение и доплеровское смещение частоты, были получены путём разбора TLE (two-lines elements) файлов алгоритмом sgr4. Файлы формата TLE можно найти на сайтах держателей ресурса. Данные файлы получают путём снятия параметров КА (вектор и состояние) в определённый момент времени, далее данный набор данных конвертируются в TLE файлы. В свою очередь, sgr4 это алгоритм с открытым исходным кодом, предназначенный для чтения фай-

лов формата TLE. В результате чтения пользователь получает информацию о состоянии и скоростях спутника по 3-м осям в выбранный момент времени. Важно отметить, что актуальными TLE считаются те, у которых разница между временем составления TLE и выбранным временем моделирования не превышает 3-х суток.

Далее будут приведены результаты моделирования для каждой из конфигураций с примером результата системы без ПВОС. При этом для каждой конфигурации рассматривается четыре значения длины синтезированной апертуры (СА). В результате моделирования строилась зависимость $P_{\text{ошиб}}$ (вероятности ошибок) от SNR (отношения сигнал/шум в дБ).

На рис. 1–4 представлены зависимости вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для четырех конфигураций из таблицы 1 соответственно. Из рис. 1 видно, что для частоты 250 МГц наилучшее качество передачи данных достигается при использовании адаптивного алгоритма с длиной СА 10–20 элементов.

Из рис. 2 видно, что для частоты 1600 МГц наилучшее качество передачи данных достигается при использовании адаптивного алгоритма с длиной СА 10 элементов.

Из рис. 3 видно, что для частоты 4200 МГц потери качества составляют более 30%. Данная частота не рекомендуется для использования данного алгоритма независимо от длины СА.

Из рис. 4 видно, что для частоты 8100 МГц наилучшее качество передачи данных достигается при использовании адаптивного алгоритма с длиной СА 10 элементов, однако

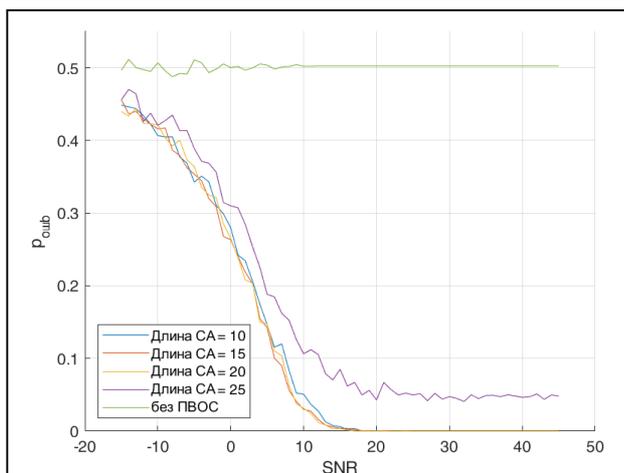


Рис. 1. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для конфигурации 1

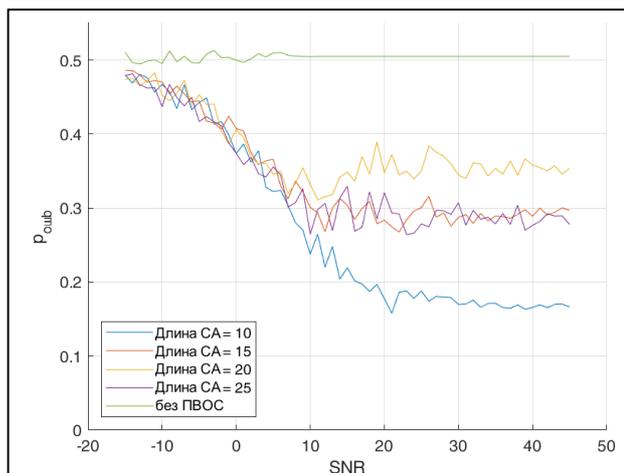


Рис. 2. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для конфигурации 2

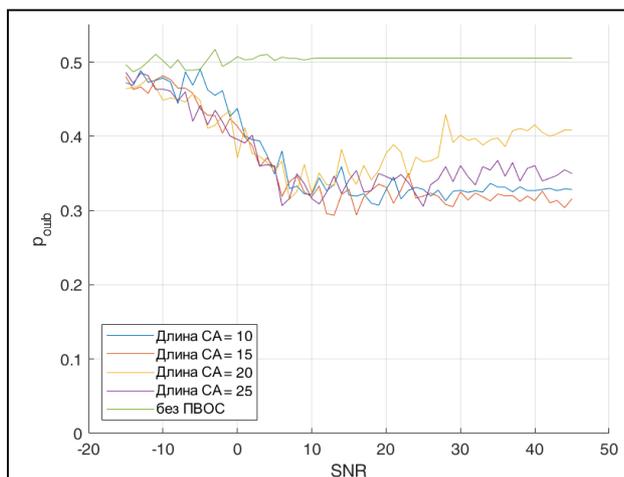


Рис. 3. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для конфигурации 3

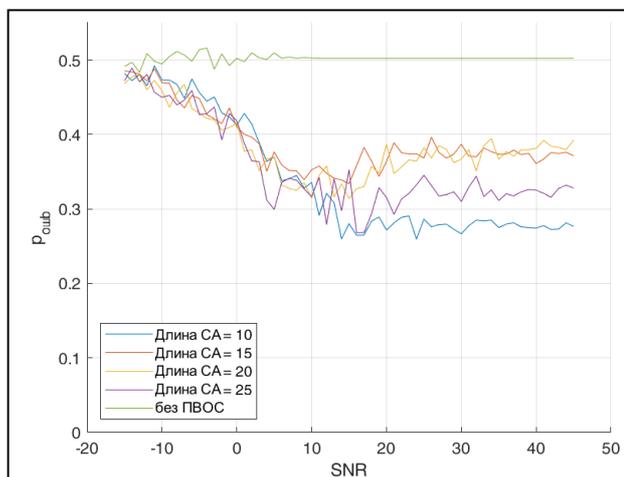


Рис. 4. Зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум для конфигурации 4

при этом значение вероятности ошибки более 0,2

Из результатов моделирования видно, что предложенный алгоритм целесообразно использовать с длиной синтезированной апертуры от 10 элементов при рабочей частоте не более 1600 МГц. Наибольшей эффективности алгоритм достигает при работе в УВЧ диапазоне (250 МГц) с длиной СА 10 элементов.

Литература

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.
2. Афанасьев Н.А., Глушанков Е.И., Кирик Д.И., Рылов Е.А. Сравнение винеровского и калмановского решения в задачах адаптации антенных

решеток // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 3. С. 33–39.

3. Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. Малые космические аппараты // Пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютерных технологий, механико-математического и географического, 2012.

4. Родимов А.П., Глушанков Е.И., Кобин С.В. Адаптивная пространственно-временная обработка радиосигналов в антенных системах с синтезированной апертурой // Радиотехника и электроника, 1987. Т. 32. №3. С. 640–642.

5. Афанасьев Н.А., Глушанков Е.И. Регуляризованный алгоритм адаптации антенн с синтезированной апертурой для помехоустойчивости радиотехнических систем на низкой околоземной орбите // В сборнике: Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики (ПКМ-2022). Сборник лучших докладов Всерос-

сийской научно-технической и научно-методической конференции магистрантов и их руководителей. Сост. Н.Н. Иванов. Санкт-Петербург, 2023. С. 139–143.

6. *Афанасьев Н.А., Глушанков Е.И.* Анализ алгоритмов пространственной обработки сигналов в адаптивных антеннах с синтезированной апертурой низкоорбитальных космических аппаратов // В сборнике: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО

2023). Сборник научных статей XII Международной научно-технической и научно-методической конференции: том 3. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2023. С. 42–46.

7. *Караваев В.В., Сазонов В.В.* Основы теории синтезированных антенн. М.: Сов. Радио, 1974. 168 с.

8. *Ратынский М.В.* Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: ЛЕНАНД, 2022. 240 с.

Поступила 16 января 2024 г.

English

ALGORITHM ANALYSIS OF ADAPTIVE SIGNAL PROCESSING IN SYNTHETIC APERTURE RADAR SYSTEMS FOR LOW-FLYING SPACE VEHICLES

Nikita Andreevich Afanasev — Postgraduate student, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: plaffy.cs@gmail.com

Evgeniy Ivanovich Glushankov — Grand Dr. in Engineering, Professor, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications.

E-mail: glushankov57@gmail.com

Address: 193232, Russian Federation, St. Petersburg, Bolshhevikov Ave., 22/1.

Abstract: Noise immunity issue of radio-frequency lines is vital when using satellite communication systems via low-flying space vehicles. This is due to space stations' remoteness, the accessibility of satellite repeaters from the Earth extensive area and the general electronic environment in co-channel and neighboring frequency bands. There may occur scenarios in satellite systems when the airwaves of one or another satellite repeater can be suppressed by using directional jamming from the Earth station. There are many ways to minimize jamming effect, one of which is using space-time signal processing on-board SAR repeater. The aperture synthesis occurs here due to space vehicle movement in low Earth orbit. Then the time separation of samples will come to fractions of milliseconds. The models were developed for algorithm analysis of adaptive signal in such systems to estimate error probability for various signal-to-noise ratios, various lengths of synthetic apertures and various emission frequencies. Upon that, there were examined four options of frequency bands and four options of synthetic aperture lengths. The simulation resulted in defining optimal patterns of using adaptive algorithm for signal processing in SAR systems for low-flying space vehicles with regard to error probability and signal-to-noise ratio.

Keywords: adaptation algorithm, synthetic aperture, adaptive filter, regularization, weight vector, CubSat

References

1. *Monzingo R.A., Miller T.U.* Adaptive antenna arrays. Introduction to theory. Moscow: Radio i Svyaz', 1986. 448 p.

2. *Afanasyev N.A., Glushankov E.I., Kirik D.I., Rylov E.A.* Comparison of the Wiener and Kalman solutions in problems of adaptation of antenna arrays. Radioengineering and telecommunication systems. 2021. No. 3. Pp. 33–39.

3. *Ablameyko S. V., Saechnikov V. A., Spiridonov A. A.* Small spacecraft. Handbook for students of the Faculties of Radiophysics and Computer Technology, Mechanics, Mathematics and Geography, 2012.

4. *Rodimov A.P., Glushankov E.I., Koblin S.V.* Adaptive space-time processing of radio signals in antenna systems with synthesized aperture. Radioengineering and Electronics, 1987. Vol. 32. No. 3. Pp. 640–642.

5. *Afanasyev N.A., Glushankov E.I.* A regular algorithm for adapting antennas with synthesized aperture for noise immunity of radio technical systems in low Earth orbit. Training of professional staff in the Master's degree program for the digital economy (PCM-2022). A collection of the best reports of the All-Russian Scientific, technical and scientific-methodical conference of undergraduates and their supervisors. Comp. N.N. Ivanov. St. Petersburg, 2023. Pp. 139–143.

6. *Afanasyev N.A., Glushankov E.I.* Analysis of algorithms for spatial signal processing in adaptive antennas with synthesized aperture of low-orbit spacecraft. In the collection: Actual problems of infotelecommunications in

science and education (APINO 2023). Collection of scientific articles of the XII International Scientific, Technical and scientific-methodical Conference: Vol. 3. St. Petersburg: SPbSUT, 2023. Pp. 42–46.

7. *Karavaev V.V., Sazonov V.V.* Fundamentals of the theory of synthesized antennas. Moscow: Sov. Radio, 1974. 168 p.

8. *Ratynsky M.V.* Adaptation and superresolution in antenna arrays. Moscow: LENAND, 2022. 240 p.