



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-70-74>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 621.396

## ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОГО ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ В СУБАПЕРТУРНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТКАХ ВЫСОКОИНФОРМАТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ

С. В. КОЗЛОВ, В. В. РАДИОНОВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 20.09.2023*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023  
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

**Аннотация.** В статье показано, что при цифровом диаграммообразовании в субапертурной антенной решетке высокоинформативных космических радиолокаторов с синтезированием апертуры необходимо предусматривать процедуру выравнивания временных задержек выходных сигналов субапертур на передачу и на прием. Установлено, что потери в отношении сигнал/шум на радиолокационном изображении точечной цели для типового размера апертуры по углу места 0,7 м и при ширине спектра сигнала 600 МГц достигают 2,1 и 7,5 дБ для углов отклонения от надира 21° и 50° соответственно. Сформулированы рекомендации по выравниванию задержек на передачу и прием на основе спектральной обработки. Приведены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** радиолокационное изображение, синтез апертуры антенны, антенная решетка, субапертура, временная задержка огибающей, быстрое преобразование Фурье.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Козлов, С. В. Особенности цифрового диаграммообразования в субапертурных антенных решетках высокоинформативных космических радиолокаторов с синтезированием апертуры / С. В. Козлов, В. В. Радионович // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 70–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-70-74>.

## DIGITAL BEAMFORMING FEATURES IN SUBAPERTURE ANTENNA ARRAYS OF HIGHLY INFORMATIVE SPACE RADARS WITH APERTURE SYNTHESIS

SERGEI V. KOZLOV, VLADISLAV V. RADIONOVICH

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 20.09.2023*

**Abstract.** It is shown that during digital beamforming in a subaperture antenna array of highly informative space radars with synthetic aperture, it is necessary to provide a procedure for equalizing the time delays of the subaperture output signals for transmission and reception. It has been established that losses in the signal-to-noise ratio on a radar image of a point target for a typical aperture size at an elevation angle of 0.7 m and a signal spectrum width of 600 MHz reach 2.1 and 7.5 dB for off-nadir angles of 21° and 50°, respectively. Recommendations are formulated for equalizing time delays for transmission and reception based on spectral processing. Simulation results are presented.

**Keywords:** radar image, antenna aperture synthesis, antenna array, subaperture, envelope time delay, fast Fourier transform.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.

**For citation.** Kozlov S. V., Radionovich V. V. (2023) Digital Beamforming Features in Subaperture Antenna Arrays of Highly Informative Space Radars with Aperture Synthesis. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 70–74. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-70-74> (in Russian).

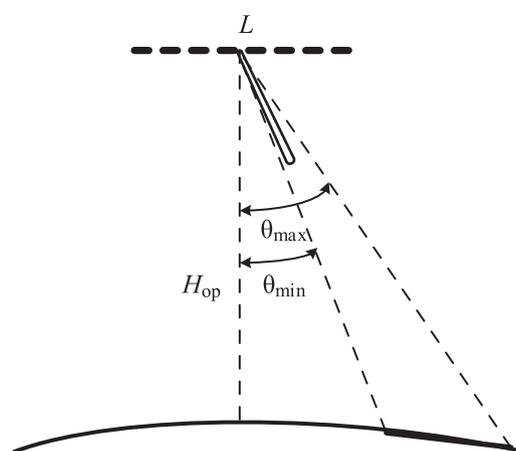
## Введение

Одной из основных тенденций развития радиолокаторов с синтезированием апертуры космического базирования является использование активных антенных решеток (АР). Это объясняется необходимостью управлять положением главного лепестка диаграммы направленности АР без поворота корпуса космического аппарата и связанных с ним энергетических затрат. Вторая тенденция – использование широкополосных сигналов с шириной их спектра до 1200 МГц [1]. При этом временное запаздывание сигнала между различными активными субапертурами АР становится соизмеримым с шириной главного лепестка функции рассогласования сигнала. В [1, 2] отмечено, что без выравнивания временных задержек в процессе цифрового диаграммообразования (ЦДО) в субапертурной АР максимумы сигналов субапертур после обработки не будут совпадать по времени. Это приводит к «размыванию» формы отклика сигнала от точечной цели на радиолокационном изображении. Для компенсации задержек предложено использовать линии задержки с перестраиваемым временем задержки исходя из геометрии наблюдения.

Целью исследований авторов являлась конкретизация особенностей ЦДО в указанных АР в части характеристик отклика сигнала от точечной цели и величины энергетических потерь при отсутствии и наличии компенсации временных задержек в субапертурной антенной решетке космического радиолокатора с синтезированием апертуры (РСА) методом моделирования.

## Условия и методика моделирования

Типовая геометрия наблюдения в космическом РСА приведена на рис. 1. Высота орбиты РСА составляет  $H_{op}$ , нормаль АР ориентирована в нади́р, угол  $\theta$  отклонения главного лепестка от нади́ра может принимать значения от  $20^\circ$  до  $50^\circ$  справа и слева от линии пути, что обеспечивает двусторонний обзор без поворота корпуса космического аппарата (аналогично системе дистанционного зондирования Земли ИСЗУЕ). Длина антенных решеток в угломестной плоскости составляет  $L$ , что приводит к разности задержек сигнала между крайними точками АР при распространении сигнала в одном направлении на величину  $\Delta\tau = L\sin\theta/c$ , где  $c$  – скорость света.



**Рис. 1.** Геометрия наблюдения в радиолокаторе с синтезированием апертуры космического базирования  
**Fig. 1.** Observation geometry in space-based synthetic aperture radar

В качестве зондирующего сигнала рассматривались последовательности линейно-частотно-модулированных радиоимпульсов длительностью  $T_0$  и шириной спектра  $\Delta f_0$ . Сигнал от точечной цели после ЦДО на выходе  $M$ -элементной АР без несущественного в данном случае

амплитудного множителя и собственной фазы коэффициента отражения от цели можно представить в виде

$$\dot{U}(t) = \sum_{n=1}^M \dot{W}_n^{(r)} \left( \sum_{m=1}^M \dot{W}_m^{(tr)} \dot{U}_0(t - \bar{\tau} - (1 - v_{tr})\tau_m - (1 - v_r)\tau_n) e^{j\varphi_m(\theta)} \right) e^{j\varphi_n(\theta)}, \quad (1)$$

где  $\dot{W}_n^{(r)}$ ,  $\dot{W}_m^{(tr)}$  – весовые коэффициенты при ЦДО на прием и передачу;  $\dot{U}_0(t)$  – закон модуляции зондирующего сигнала;  $\bar{\tau}$  – время задержки сигнала от центра АР;  $v_{tr} = 0, 1$ ,  $v_r = 0, 1$  – дискретные переменные, определяющие наличие (1) или отсутствие (0) выравнивания временных задержек по апертуре;  $\tau_m$  – разность времен задержек на передачу от центра АР и  $m$ -й субапертуры;  $\tau_n$  – разность времен задержки на прием от центра АР и  $n$ -й субапертуры;  $\varphi_m(\theta)$  – сдвиг фаз от  $m$ -й субапертуры по сравнению с центром АР на передачу при направлении наблюдения  $\theta$ ;  $\varphi_n(\theta)$  – сдвиг фаз от  $n$ -й субапертуры на прием.

Весовые коэффициенты ЦДО таковы, что  $\arg(\dot{W}_m^{(tr)}) = -\varphi_m(\theta)$ ,  $\arg(\dot{W}_n^{(r)}) = -\varphi_n(\theta)$ , то есть происходит фокусировка АР в заданном направлении на передачу и прием. Амплитудное распределение на прием и передачу равномерное –  $|\dot{W}_m^{(tr)}| = |\dot{W}_n^{(r)}| = 1$ . Методика моделирования предполагала расчет принимаемого сигнала в соответствии с формулой (1), сжатие его в согласованном фильтре устройства внутрипериодной обработки с получением сигнала  $\dot{Y}(t)$  и анализ характеристик сигнала. В качестве численных показателей использовались:

– коэффициент  $\gamma_{\text{ГП}} = \frac{\Delta t(v_{tr}, v_r = 0)}{\Delta t(v_{tr}, v_r = 1)}$  увеличения ширины  $\Delta t$  главного лепестка сигнала на выходе согласованного фильтра по уровню 0,5 от максимального значения при отсутствии компенсации временных задержек по апертуре;

– коэффициент  $\eta = \frac{Y_{\text{max}}^2(v_{tr}, v_r = 0)}{Y_{\text{max}}^2(v_{tr}, v_r = 1)}$  энергетических потерь за счет отсутствия компенсации временных задержек, где  $Y_{\text{max}} = \max(|\dot{Y}(t)|)$ .

### Результаты моделирования

На рис. 2, *a*, *b* приведены амплитудные огибающие сигнала на выходе согласованного фильтра при наличии выравнивания временных задержек (кривая 1) и задержек только на передачу (кривая 2), отсутствии выравнивания (кривая 3) при  $L = 0,7$  м,  $M = 8$ ,  $H = 500$  км,  $\theta = 50^\circ$  для различных значений  $\Delta f_0$ .

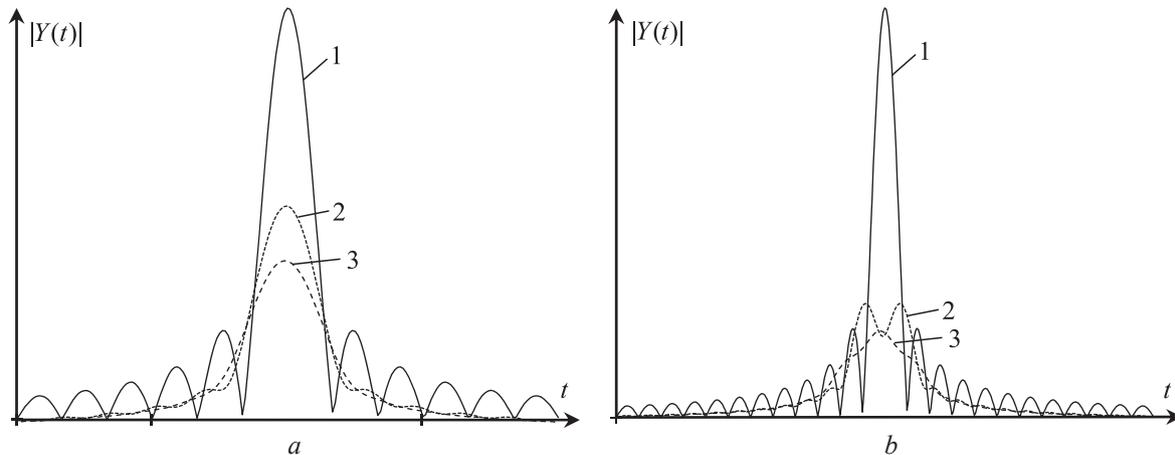


Рис. 2. Амплитудная огибающая сигнала от точечной цели на выходе согласованного фильтра:

$a - \Delta f_0 = 600$  МГц;  $b - \Delta f_0 = 1200$  МГц

Fig. 2. Amplitude envelope of the signal from a point target at the output of the matched filter:

$a - \Delta f_0 = 600$  MHz;  $b - \Delta f_0 = 1200$  MHz

Как видно из рис. 2 (кривая 3), отсутствие выравнивания временных задержек приводит к уменьшению амплитуды сигнала на выходе согласованного фильтра, расширению главного лепестка и разрушению (сглаживанию) осциллирующей структуры боковых лепестков функции

рассогласования. В табл. 1 для тех же типовых исходных данных, что и на рис. 2, приведены результаты моделирования для крайних значений угла отклонения от надира  $\theta$  ( $21^\circ$  и  $50^\circ$ ) и различных значений ширины спектра сигнала при выравнивании временных задержек как на прием, так и на передачу. Позиция *Sinc* означает сохранение осциллирующего характера боковых лепестков, «Нет» – отсутствие выраженных боковых лепестков.

**Таблица 1.** Результаты моделирования энергетических потерь и расширения главного лепестка  
**Table 1.** Simulation result of energy losses and main lobe expansion

Ширина спектра, МГц / Bandwidth, MHz	$\theta = 21^\circ$			$\theta = 50^\circ$		
	Потери $\eta$ , дБ / Losses $\eta$ , dB	$\gamma_{\text{гп}}$	Характер боковых лепестков / Character of the side lobes	Потери $\eta$ , дБ / Losses $\eta$ , dB	$\gamma_{\text{гп}}$	Характер боковых лепестков / Character of the side lobes
150	0,13	1,00	<i>Sinc</i>	0,65	1,02	<i>Sinc</i>
300	0,56	1,00	<i>Sinc</i>	2,50	1,03	<i>Sinc</i>
450	1,20	1,00	<i>Sinc</i>	5,00	1,36	Нет
600	2,10	1,14	<i>Sinc</i>	7,50	1,40	Нет
900	4,40	1,21	Нет	10,6	2,21	Нет
1200	6,80	1,47	Нет	13,00	2,47	Нет

Как следует из результатов моделирования, для типовых размеров АР космических РСА и при двухстороннем обзоре без поворота корпуса космического аппарата энергетические потери полезного сигнала из-за неравенства временных задержек по апертуре становятся значительными при  $\Delta f_0 \geq 300$  МГц. В случае  $\Delta f_0 \geq 600$  МГц существенным также является снижение разрешающей способности по наклонной дальности.

#### Технические решения по компенсации временных задержек в субапертурной антенной решетке

Из результатов моделирования следует, что задержки в субапертурной АР необходимо выравнивать как на передачу, так и на прием. Наиболее просто компенсируются задержки на передачу, если зондирующий сигнал в субапертурах формируется методом прямого цифрового синтеза (DDS). Это предусматривает расчет временных задержек для заданной геометрии наблюдения и коррекцию временного представления сигнала в схемах DDS субапертур.

Экономичный в аппаратурном плане вариант выравнивания временных задержек на прием предполагает: перевод сигналов субапертур в спектральную область путем вычисления быстрого преобразования Фурье принимаемой в пределах периода повторения реализации; коррекцию фазового спектра в соответствии с вычисленными временными задержками на основе теоремы о сдвиге; вычисление весовых коэффициентов неадаптивного или адаптивного ЦДО; весовое суммирование спектров и, при необходимости, обратный переход к временному представлению сигнала [2]. Аппаратурные затраты на реализацию выравнивания состоят в необходимости вычисления спектров выходных сигналов всех субапертур в устройстве ЦДО или непосредственно в субапертурах и умножения их на корректирующие весовые коэффициенты. При времени записи сигнала в пределах каждого периода повторения 100 мкс и частоте повторения импульсов РСА 5 кГц требуемая производительность процессоров вычисления прямого и обратного быстрого преобразования Фурье в расчете на одну субапертуру составит 18, 39 и 83 GFLOPS при ширине спектра сигнала 600, 900 и 1200 МГц соответственно. В случае выравнивания задержек на устройстве ЦДО требуемая производительность увеличивается примерно пропорционально половине числа субапертур (обратное преобразование проводится только один раз после ЦДО в спектральной области) при возможности дополнительного снижения требований к производительности за счет отказа от выравнивания малых задержек для части субапертур, наиболее близких к центру АР.

## Заключение

Полученные значения коэффициентов энергетических потерь и расширения главного лепестка функции рассогласования могут быть использованы для обоснованного выбора алгоритма и параметров цифрового диаграммообразования в радиолокаторах с широкополосными сигналами, и в частности для высокоинформативных космических радиолокаторов с синтезированием апертуры на базе субапертурных антенных решеток.

## Список литературы

1. Алексеева, А. М. О построении активных фазированных антенных решеток для космических радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения / А. М. Алексеева, Т. М. Лепёхина, В. Г. Польш // Вестник «НПО им. С. А. Лавочкина». 2022. № 1. С. 44–50.
2. Козлов, С. В. Цифровое диаграммообразование с компенсацией мешающих источников излучений в крупноапертурной антенной решетке и широкополосным зондированием / С. В. Козлов, М. А. Лобан, В. В. Радионович // Новости науки и технологии. 2021. № 3. С. 14–22.

## References

1. Alekseeva A. M., Lepeshina T. M., Pol V. G. (2022) On the Construction of Active Phased Array Antennas for High-Resolution Synthetic Aperture Space Radars. *Bulletin of the "Scientific and Production Organization named after S. A. Lavochkin"*. (1), 44–50.
2. Kozlov S. V., Loban M. A., Radionovich V. V. (2021) Digital Beamforming with Compensation of Interfering Radiation Sources in Large-Aperture Antenna Arrays and Broadband Sensing. *News Science and Technologies*. (3), 14–22.

## Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

### Сведения об авторах

**Козлов С. В.**, д-р техн. наук, проф., проф. каф. информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

**Радионович В. В.**, асп. каф. информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 6  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники  
Тел.: +375 17 293-88-17  
E-mail: radionovich@bsuir.by  
Радионович Владислав Валерьевич

### Information about the authors

**Kozlov S. V.**, Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at Information Radioengineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

**Radionovich V. V.**, Postgraduate at Information Radioengineering Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovki St., 6  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
Tel.: +375 17 293-88-17  
E-mail: radionovich@bsuir.by  
Radionovich Vladislav Valer'evich