

DOI 10.24412/2221-2574-2022-2-42-49

УДК 621.396.962.33

## АДАПТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ И ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ, ВНОСИМЫХ АППАРАТУРОЙ РСА В ПРИНИМАЕМЫЙ СИГНАЛ

**Карпов Олег Анатольевич**

доктор технических наук, старший научный сотрудник АО «АЭРОКОН».

E-mail: [karp.smtp@mail.ru](mailto:karp.smtp@mail.ru)

**Савостьянов Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер АО «АЭРОКОН».

E-mail: [v-savostyanov@yandex.ru](mailto:v-savostyanov@yandex.ru)

**Цветков Олег Евгеньевич**

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник АО «АЭРОКОН».

E-mail: [al.vetckov@yandex.ru](mailto:al.vetckov@yandex.ru)

Адрес: 140180, Российская Федерация, Московская обл., г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1.

*Аннотация:* Устранение в обрабатываемом сигнале амплитудно-фазовых искажений, вызванных зависимостью коэффициента передачи от частоты, является необходимой процедурой в алгоритмах картографирования с субметровым разрешением, особенно при использовании частотно-манипулированных сигналов. В статье рассматривается алгоритм, в реальном масштабе времени выполняющий оценку и компенсацию этих искажений и позволяющий получать качественные радиолокационные изображения с субметровым разрешением. Приведены описание алгоритма и результаты его исследования в лабораторных и лётных экспериментах.

*Ключевые слова:* радиолокатор с синтезированием апертуры антенны (РСА), частотно-манипулированные сигналы, амплитудно-фазовые искажения сигнала, компенсация искажений, автокалибровка.

Как известно, одним из способов получения высокого разрешения по дальности в РЛС с синтезированной апертурой антенны (РСА) является использование частотно-манипулированных сигналов (ЧМС), с помощью которых необходимая широкополосность системы создаётся за несколько периодов повторения (пачку) импульсов [1, 2]. Такой способ называют межпериодным расширением спектра или синтезом спектра сигнала. По сравнению с обычными широкополосными сигналами ЧМС дают возможность получать детальные радиолокационные изображения (РЛИ) без существенных изменений аппаратуры, повышать помехозащищённость, изменять параметры зондирующего сигнала в широком диапазоне.

Вместе с тем, как было отмечено в [2, 3], применение ЧМС в РСА имеет особенности, одной из которых является появление в принятом сигнале искажений, вызванных зависимостью от частоты, амплитуды и фазы сквозного коэффициента передачи СВЧ тракта, охваты-

вающего передатчик, антенну и приёмник. Частотная неравномерность коэффициента передачи приёмно-передающего тракта сказывается на увеличении уровня боковых лепестков в результирующем сигнале, что приводит к ухудшению обнаружения слабых сигналов и разрешающей способности по дальности, а также появлению ложных отметок от «ярких» объектов и снижению контрастности РЛИ. Поэтому оценка и компенсация в обрабатываемом сигнале искажений, вызванных зависимостью коэффициента передачи от частоты, является необходимой процедурой в алгоритмах картографирования с субметровым разрешением [4], особенно при использовании ЧМС.

Как показали исследования, оценить априорно зависимость сквозного коэффициента передачи СВЧ тракта от частоты практически невозможно, поскольку она может не только различаться от одного экземпляра изделия к другому, но и существенно изменяться для одного изделия при изменении параметров режима, рабочих температур и питающих

напряжений, а также из-за старения радиоэлементов аппаратуры. Следовательно, при использовании ЧМС в структуре обработки сигналов РСА должен присутствовать алгоритм, основанный на адаптивной оценке и компенсации вносимых аппаратурой РСА амплитудно-фазовых искажений непосредственно по принимаемому сигналу. По аналогии с автофокусировкой такую процедуру называют автокалибровкой.

Целью работы является разработка адаптивного алгоритма оценки и компенсации в сигнале амплитудно-фазовых искажений, вносимых аппаратурой РСА, а также проверка его работоспособности при синтезе радиолокационных изображений в РСА *Ku*-диапазона.

Пусть  $\xi(i, q)$  — комплексный принятый сигнал с амплитудно-фазовыми искажениями после сжатия по азимуту ( $q$  — номер отсчёта,  $i$  — номер доплеровского фильтра), а  $g(q)$  — это искомая комплексная корректирующая функция, после умножения сигнала  $\xi(i, q)$  на которую происходит полная компенсация искажений. Тогда оценку функции  $g(q)$  можно получить из двух составляющих — оценки амплитуды  $|\hat{g}(q)|$  и оценки фазы  $\arg\{\hat{g}(q)\}$  — с последующим объединением их в комплексную функцию  $\hat{g}(q)$ .

Получить оценку амплитуды можно достаточно просто, выполнив усреднение амплитуд по всей радиоголограмме (РГ):

$$|\hat{g}(q)| = \sqrt{\frac{\sum_{q=0}^{Q-1} \sum_{i=0}^{I-1} |\xi(i, q)|^2}{Q \sum_{i=0}^{I-1} |\xi(i, q)|^2}}, \quad (1)$$

а оценку фазы — с помощью описанного в [5, 6] непараметрического итерационного алгоритма автофокусировки, например, оптимального по критерию минимума дисперсии:

$$\arg\{\hat{g}(q)\} = \hat{\phi}_n(q) = \arg\{\hat{A}_{n-1}(q)\},$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, \hat{\phi}_0(q) = 0, \quad (2)$$

где  $Q$  — количество отсчётов,  $I$  — количество доплеровских фильтров,  $n$  — номер итерации,  $\hat{\phi}_n(q)$  — оценка фазовой функции,

$$\hat{A}_{n-1}(q) = \sum_{l=0}^{L-1} S^*(l, q) \sum_{u=0}^{Q-1} \left( |\hat{W}_{n-1}(l, u)|^2 - M_w^2 \right) \times \\ \times \hat{W}_{n-1}(l, u) \exp\left(-j2\pi \frac{uq}{Q}\right),$$

$\hat{W}_{n-1}(l, u) = \frac{1}{Q} \sum_{q=0}^{Q-1} S(l, q) \exp(j\hat{\phi}_{n-1}(q)) \exp\left(j2\pi \frac{uq}{Q}\right)$  — комплексное РЛИ для выбранных доплеровских фильтров, полученное с опорной функцией  $\exp(j\hat{\phi}_{n-1}(q))$ ;  $M_w = \frac{1}{QL} \sum_{u=0}^{Q-1} \sum_{l=0}^{L-1} |\hat{W}_0(l, u)|$  — математическое ожидание его модуля,  $S(l, q) = \xi(i(l), q)$ ;  $l$  — номер выбранного для автокалибровки доплеровского фильтра;  $L$  — количество выбранных доплеровских фильтров; \* — операция комплексного сопряжения.

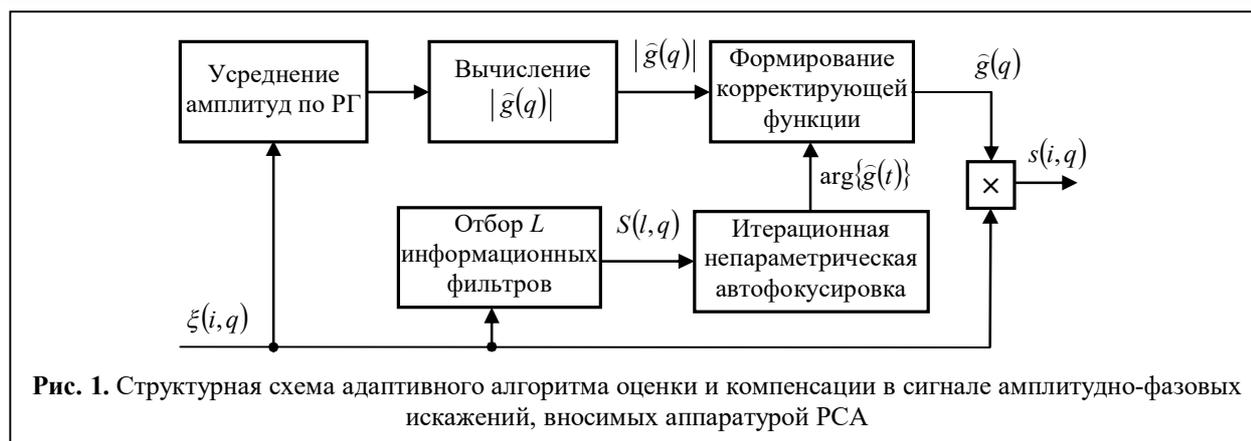
Объединив (1) и (2), получим оценку функции  $\hat{g}(q)$  как комплексный вектор

$$\hat{g}(q) = |\hat{g}(q)| \exp(j \arg\{\hat{g}(q)\}), \quad (3)$$

который можно использовать для компенсации в сигнале  $\xi(i, q)$  амплитудных и фазовых искажений, вносимых аппаратурой РСА.

Структурная схема разработанного адаптивного алгоритма показана на рис. 1.

Сравнение полученного алгоритма оценки фазы (2) с алгоритмами автофокусировки, описанными в [5, 6], показывает, что разница между ними заключается, главным образом, в смене переменной, по которой ведётся поиск фазовой функции  $\hat{\phi}_n(q)$ . Если в первом случае речь идёт о номере отсчёта  $q$ , то во втором — о номере импульса. Соответственно, в первом случае усреднение проводится по выбранным доплеровским фильтрам, а во втором — по выбранным дискретам дальности. Это указывает на принципиальную возможность использования в программном обеспечении РСА одного и того же непараметрического итерационного



алгоритма для реализации как автофокусировки РЛИ, так и поиска фазовой функции  $\hat{\phi}_n(q)$  при автокалибровке.

В качестве примера на рис. 2 представлены оценки амплитудных  $|\hat{g}(q)|$  и фазовых  $\arg\{\hat{g}(q)\}$  искажений, полученные по результатам наземной обработки РГ.

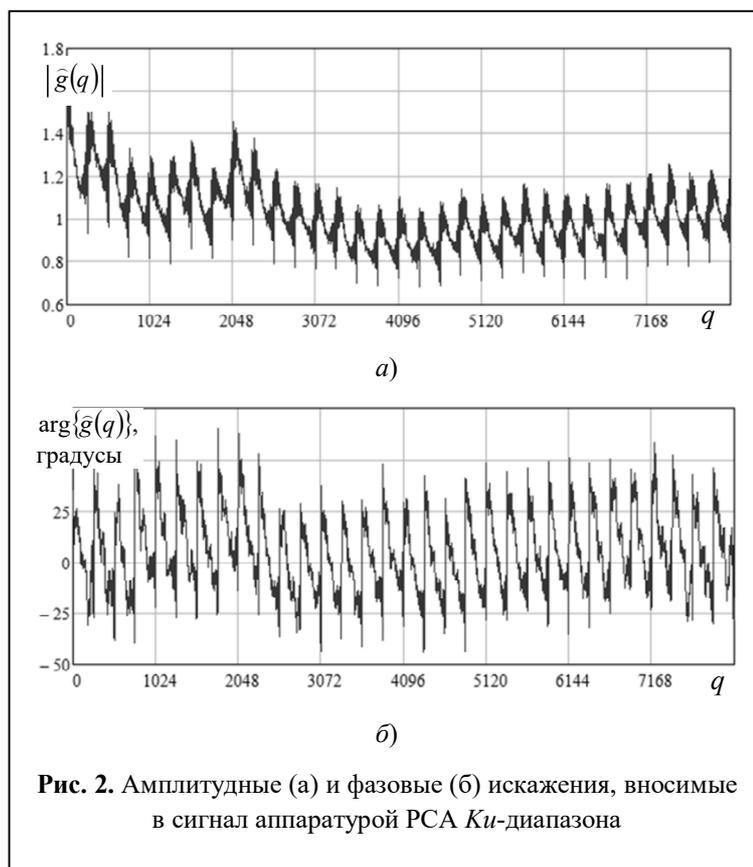
Эти РГ были записаны при проведении лётных экспериментов с многофункциональной РСА *Ku*-диапазона [2, 3] при следующих параметрах ЧМС:

- шаг по частоте — 20 МГц;
- количество импульсов в частотно-манипулированной пачке —  $M=32$ ;
- общая полоса частот —  $32 \times 20 = 640$  МГц;
- внутриимпульсная модуляция — ЛЧМ с девиацией 20 МГц;
- база ЛЧМ-сигнала —  $B=256$ ;
- общее количество отсчётов —  $Q=MB=8192$ .

Из графиков видно, что функции  $|g(q)|$  и  $\arg\{g(q)\}$  представляют собой результат модуляции, обусловленной, с одной стороны, формой огибающей одиночного импульса, а с другой — изменением коэффициента передачи СВЧ тракта РСА в широкой полосе частот.

Если эта модуляция при обработке сигналов никаким образом не

учитывается, то после сжатия по дальности в РЛИ появятся боковые лепестки высокого уровня. Так, для представленных на рис. 2 искажений РГ результат сжатия по дальности при использовании весовой функции «окно Дольфа-Чебышёва» с параметром  $\alpha = 2,5$  будет таким, как показано на рис. 3 ( $j$  — номер дискрета дальности относительно центра РЛИ). Очевидно, что структура и уровни боковых лепестков при этом существенно отличаются от идеальных [7], прежде всего, из-за появле-



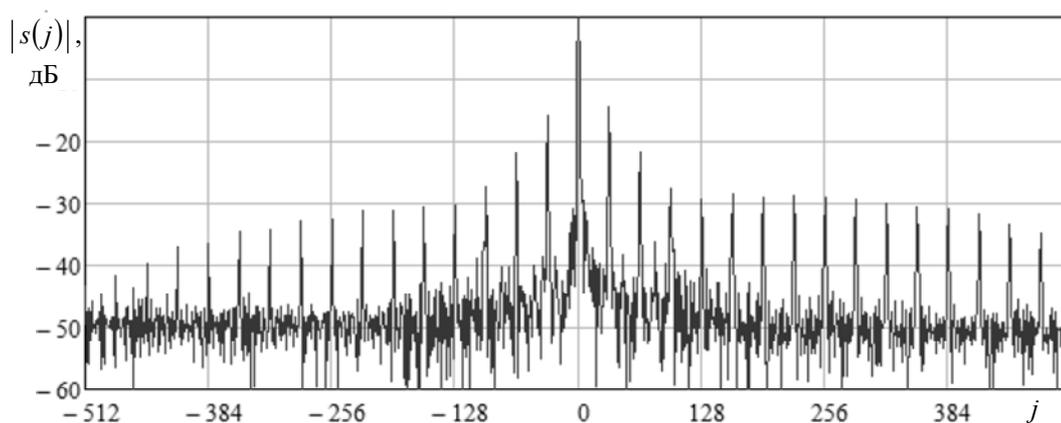


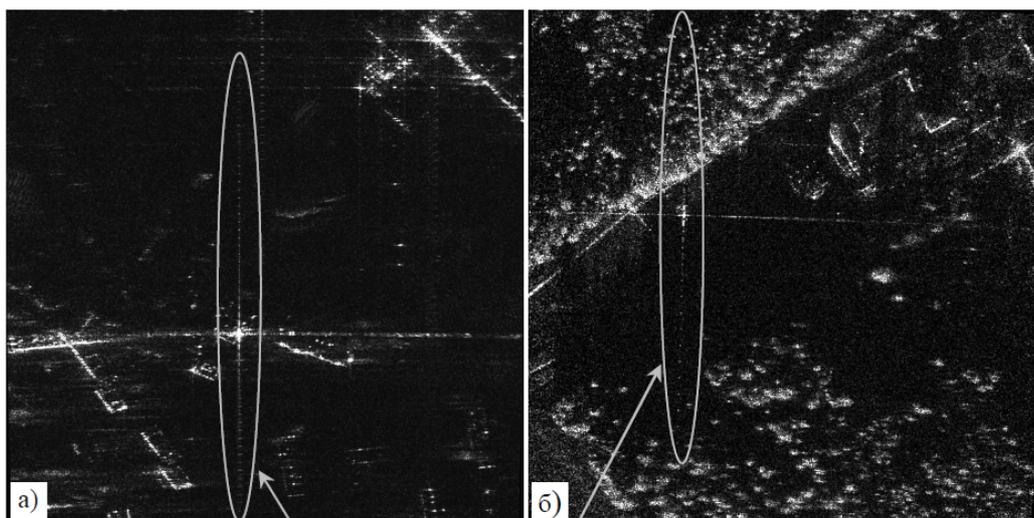
Рис. 3. Структура боковых лепестков в РЛИ по дальности при наличии в сигнале амплитудно-фазовых искажений

ния в отклике составляющих с максимальным уровнем до  $-15$  дБ и периодом  $M = 32$  элементов разрешения. Причём наибольший вклад в эти составляющие вносят фазовые искажения.

В формируемом РЛИ боковые лепестки столь высокого уровня образуют яркие ложные отметки по дальности, что приводит к искажению формы радиолокационных объектов и маскированию отметок от малоразмерных слабо отражающих объектов [1]. На рис. 4 показаны РЛИ субметрового разрешения, полученные в лётных экспериментах с РСА  $X$ - и  $Ku$ -диапазонов [3, 8] без компенсации в сигнале

амплитудно-фазовых искажений данного вида. На обоих РЛИ отчётливо видны боковые лепестки по дальности с интервалом  $M$  пикселей (здесь и далее области ложных целей — боковых лепестков — представлены в овале).

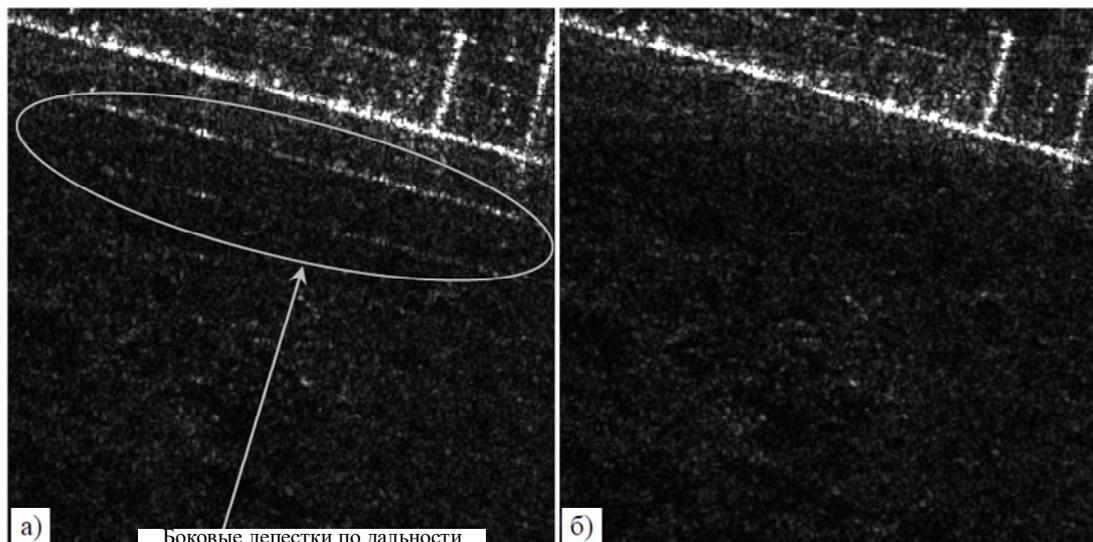
Как показали экспериментальные исследования с РСА  $Ku$ -диапазона [2, 3], применение адаптивного алгоритма позволяет в реальном масштабе времени компенсировать в сигнале амплитудно-фазовые искажения, вызванные зависимостью сквозного коэффициента передачи СВЧ тракта РСА от частоты.



Боковые лепестки по дальности

Рис. 4. РЛИ без компенсации в сигнале амплитудно-фазовых искажений:

- а)  $X$ -диапазон, разрешение 0,5 м,  $M = 16$ ,  $B = 256$ ;
- б)  $Ku$ -диапазон, разрешение 0,25 м,  $M = 32$ ,  $B = 256$

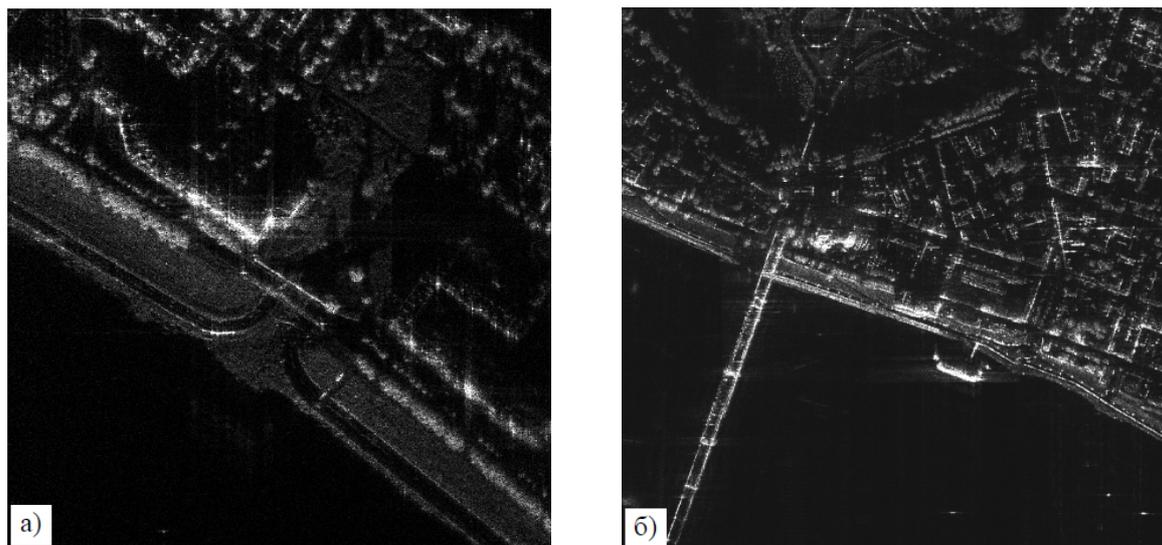


**Рис. 5.** Фрагмент РЛИ до (а) и после (б) компенсации в сигнале амплитудно-фазовых искажений (разрешение 0,25 м,  $Ku$ -диапазон,  $M=32$ ,  $B=256$ )

На рис. 5 представлены фрагменты РЛИ с разрешением 0,25 м, полученные после наземной обработки РГ без использования (а) и с использованием (б) описанного выше алгоритма. Если в первом случае на рисунке хорошо заметны ложные контуры здания, повторяющиеся по дальности с интервалом  $M=32$  пикселя, то во втором случае эти контуры стали практически незаметны. Анализ РЛИ, приведённого на рис. 5 б), показал, что при исполь-

зовании разработанного адаптивного алгоритма и весовой функции «окно Дольфа-Чебышёва» с параметром  $\alpha = 3,0$  уровень максимального бокового лепестка составил  $-39$  дБ, а интегрального — примерно  $-47$  дБ, т.е. качество полученного РЛИ можно считать хорошим.

В качестве примера для подтверждения эффективности разработанного алгоритма на рис. 6 приведены РЛИ с разрешением 0,5 и 1 м,



**Рис. 6.** РЛИ, полученные с адаптивным алгоритмом компенсации амплитудно-фазовых искажений: а) – разрешение 0,5 м,  $M=16$ ,  $B=256$ ; б) – разрешение 1 м,  $M=8$ ,  $B=512$

полученные в результате лётных экспериментов с РСА *Ku*-диапазона при использовании ЧМС с внутриимпульсной ЛЧМ [9].

Сравнение синтезированных РЛИ с оптическими снимками показывает, что применение разработанного алгоритма автокалибровки позволяет существенно улучшить полноту, достоверность и точность дешифрирования РЛИ, снизить влияние нежелательных артефактов, обязанных неидеальности оборудования РСА. Реализация алгоритма в реальном времени предоставляет разработчикам бортовой аппаратуры дополнительные возможности для автоматизации процедур обработки радиоголограмм и дешифрирования радиолокационных изображений.

#### Литература

1. Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / Под ред. Л.А. Школьного. М.: Изд. ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.
2. Савостьянов В.Ю., Карпов О.А., Ефимов А.В. Особенности обработки частотно-манипулированных сигналов в РСА // Материалы Всероссийской науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (27–29.06.2017, г. Муром). Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. С. 274–280.
3. Ефимов А.В., Савостьянов В.Ю., Титов М.И. Предварительные результаты испытаний малогабаритной РСА *Ku*-диапазона с частотно-манипулированными сигналами // Материалы II Всероссийской науч. конф. «Современные пробле-

мы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (26–28.06.2018, г. Муром). Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С. 609–616.

4. Ефимов А.В., Цветков О.Е. Искажения зондирующего сигнала и их коррекция при формировании радиолокационного изображения в РСА космического аппарата «Кондор-Э» // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2017. №4. С. 15–26.
5. Wang J., Liu X. SAR Minimum-Entropy Autofocus // Radar 2004. International Conference on Radar Systems 04, Philadelphia (USA), Apr. 26–29, 2004.
6. Зайцев С.Э., Карпов О.А., Костров В.В. Непараметрический алгоритм автофокусировки, оптимальный по критерию максимума дисперсии РЛИ // Материалы II Всероссийской научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (26–28.06.2018, г. Муром). Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2018. С. 435–446.
7. Хэррис Ф.Дж. Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье // ТИИЭР. 1978. Т. 66. №1. С. 60–96.
8. Кудашев В.С., Савостьянов В.Ю., Самарин О.Ф. МБРЛС: реалии и перспективы // Фазотрон. Информационно-аналитический журнал, 2014. №2(24). С. 12–15.
9. Савостьянов В.Ю., Карпов О.А., Ефимов А.В. Многофункциональная малогабаритная РЛС *Ku*-диапазона для лёгкого БЛА // Материалы Всероссийской науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» (28–30.05.2019, г. Муром). Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2019. С. 389–394.

Поступила 11 ноября 2021 г.

English

## ADAPTIVE COMPENSATION OF AMPLITUDE AND PHASE DISTORTIONS INTRODUCED BY SAR EQUIPMENT INTO RECEIVED SIGNAL

**Oleg Anatolyevich Karpov** — Grand Dr. in Engineering, Senior Research Associate, JSC AEROKON.

E-mail: [karp.smtp@mail.ru](mailto:karp.smtp@mail.ru)

**Vladimir Yuryevich Savostyanov** — PhD, Associate Professor, Senior Engineer, JSC AEROKON.

E-mail: [v-savostyanov@yandex.ru](mailto:v-savostyanov@yandex.ru)

**Oleg Evgenyevich Tsvetkov** — PhD, Associate Professor, Senior Research Associate, JSC AEROKON.

E-mail: [al.vetckov@yandex.ru](mailto:al.vetckov@yandex.ru)

Address: 140180, Russian Federation, Moscow Region, Zhukovsky, Zhukovsky st., 1.

**Abstract:** SAR (synthetic aperture radar) is examined where FSK (frequency-shift keyed) signals are used to obtain high resolution in range. Using FSK signals in SAR goes along with distortions emerging in received signal which are due to dependence on amplitude frequency and phase of through transmission ratio of signal path, including transmitter, antenna and receiver. Amplitude-phase distortions are hard to account for due to randomness and temporal variability of their manifestations. The paper is aimed at adaptive algorithm development for evaluating and compensation for signal amplitude-phase distortions caused by SAR equipment, as well as at verification of its performance in synthesizing radar images in SAR. Synthesis of compensation algorithm is done in two steps and it is for a complex signal, which is compressed in azimuth coordinate and is represented by module and argument (phase). First, signal module is evaluated by averaging amplitudes throughout RF hologram according to maximum likelihood criterion. Second, the phase is evaluated using non-parametric iteration autofocusing algorithm which is optimal as per minimum variance criterion. Complex vector was obtained as a result, which is used to compensate for amplitude and phase distortion. The developed autocalibration algorithm performs real-time distortions' evaluation and compensation. Block diagram synthesis is done, which implements the proposed adaptive algorithm. Algorithm research results in laboratory and flight environment are presented. It is made clear that powerful sidelobes at -15 dB level are observed if amplitude-phase distortions are in the signal. Such sidelobes in RI (radar images) make false marks, deform radar targets, disguise marks of small-size low-reflection targets. Flight tests with airborne Ku-band SAR testified that using developed algorithm enabled to reduce the level of maximum sidelobe down to -39 dB and boost quality of synthesized RI. Proposed algorithm capabilities are noted for processing operations' automation of RF holograms and radar images' decryption.

**Keywords:** SAR (synthetic aperture radar), frequency-shift keyed signals, amplitude-phase signal distortions, distortion compensation, autocalibration.

### References

1. Air reconnaissance radar systems, radar image interpretation. Ed. by *L.A. Shkolny*. M.: Publ. h. VVIA named after N.E. Zhukovsky, 2008. 531 p.
2. *Savostyanov V.Yu., Karpov O.A., Efimov A.V.* Features of processing frequency-manipulated signals in SAR // Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction: All-Russian scientific conference (27–29.06.2017, Murom). Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2017. Pp. 274–280.
3. *Efimov A.V., Savostyanov V.Yu., Titov M.I.* Preliminary test results of a small-sized Ku-band SAR with frequency-manipulated signals. Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction: II All-Russian scientific conference (26–28.06.2018, Murom). Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2018. Pp. 609–616.
4. *Efimov A.V., Tsvetkov O.E.* Distortions of the probing signal and their correction during the formation of the radar image in the radar of the spacecraft "Condor-E". Radio and telecommunication systems. 2017. No. 4. Pp. 15–26.
5. *Wang J., Liu X.* SAR Minimum-Entropy Autofocus. Radar 2004. International Conference on Radar Systems 04, Philadelphia (USA), Apr. 26–29, 2004.
6. *Zaytsev S.E., Karpov O.A., Kostrov V.V.* Nonparametric autofocus algorithm, optimal by the criterion of maximum dispersion of the radar image. Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction: II All-Russian scientific conference (26.06-28.06.2018, Murom). Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2018. Pp. 435–446.
7. *Harris F.J.* On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. Proc. IEEE, 1978. V. 66. No. 1. Pp. 51–83.
8. *Kudashev V.S., Savostyanov V.Yu., Samarin O.F.* MBRLS: realities and prospects. Phazotron. Information and analytical journal, 2014. No. 2(24). Pp. 12–15.
9. *Savostyanov V.Yu., Karpov O.A., Efimov A.V.* Multifunctional small-sized Ku-band radar for light UAV. Modern problems of remote sensing, radar, wave propagation and diffraction: All-Russian scientific conference (28–30.05.2019, Murom). Murom: Izdatelsko-poligrafichesky tsentr MI VIGU, 2019. Pp. 389–394.