

УДК 621.396.967

Влияние ошибок оценки дальности и скорости носителя радиолокатора с синтезированной апертурой антенны на качество радиолокационного изображения, имитируемого при помощи цифровой радиочастотной памяти

© А.П. Сонин

АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца»

Рассмотрены вопросы влияния ошибок оценки наклонной дальности и азимутальной скорости носителя радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) на качество радиолокационного изображения (РЛИ), имитируемого при помощи цифровой радиочастотной памяти (Digital Radio-Frequency Memory, DRFM) на выходе данного радиолокатора при его тестировании. Исследована DRFM, построенная на основе обращенного Omega-k-алгоритма, способная формировать на выходе РСА искусственную карту поверхности Земли (Map-Made Map). В качестве тестового использовалось изображение, содержащее несколько точечных отражателей (ТО) в различных участках имитируемого кадра.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, цифровая радиочастотная память, цифровая радиоголограмма, радиолокационное изображение, точечный отражатель, Omega-k-алгоритм, ScanSAR, StripMap, SpotLight, MATLAB.

Введение. Перспективной технологией тестирования РСА, в том числе без проведения полетов носителя, является использование DRFM, имитирующей в режиме реального времени цифровую радиоголограмму (ЦРГ), якобы отраженную от снимаемой подстилающей поверхности Земли [1–13].

При испытании неподвижного РСА в лабораторных, ангарных или полигонных условиях DRFM подключается непосредственно к тестируемому радиоканалу. В этом случае известные значения наклонной дальности R_0 от РСА до снимаемого участка поверхности и азимутальной скорости V_x носителя РСА, используемые в алгоритме синтеза РЛИ, могут быть точно установлены в DRFM, где они используются при синте-

зе ответной ЦРГ из зондирующего радиосигнала тестируемого радиолокатора.

Если же испытывается движущийся РСА с организацией полетов над полигоном, DRFM устанавливается перед ближней границей полосы съемки так, чтобы она попадала в главный лепесток (ГЛ) диаграммы направленности (ДН) антенны тестируемого радиолокатора. В DRFM в этом случае могут быть загружены лишь расчетные значения дальности R_0 и скорости V_x носителя РСА, однако реальные значения этих величин могут существенно отличаться от расчетных, поскольку при проведении полета заданная траектория носителя РСА и его скорость движения выдерживаются с некоторыми ошибками (ΔR_0 по наклонной дальности и ΔV_x по азимутальной скорости). Это приводит к развалу отклика алгоритма двумерной согласованной фильтрации (алгоритма обработки ЦРГ и синтеза РЛИ) в элементе разрешения РЛИ, поскольку значения реальной и имитируемой в DRFM глубины пространственной модуляции зондирующего радиосигнала различаются, что приводит, в свою очередь, к ухудшению качества имитируемого РЛИ.

Поэтому актуальной задачей при планировании испытательных полетов является определение зависимости качества РЛИ от ошибок выдерживания траектории и скорости полета носителя РСА. Решение этой задачи позволяет предъявить требования к необходимой точности выдерживания дальности и скорости полета носителя РСА при проведении испытаний.

Вывод аналитических соотношений. Расположение тестируемого РСА, DRFM и имитируемого ТО показано на рис. 1, из которого видно, что истинная дальность R_0 расстояния между DRFM и РСА отличается от расчетной $\widehat{R}_0$, так же как и реальная скорость движения РСА V_x не совпадает с ее расчетным значением $\widehat{V}_x$. В алгоритме синтеза РЛИ в РСА используются истинные значения R_0 и V_x , в то время как в DRFM для синтеза ЦРГ загружаются расчетные значения $\widehat{R}_0$ и $\widehat{V}_x$ данных величин, которые со стороны DRFM можно рассматривать как оценки истинных значений. Разности истинных и оцененных значений являются ошибками оценки соответственно наклонной дальности и азимутальной скорости:

$$\begin{aligned}\Delta R_0 &= \widehat{R}_0 - R_0; \\ \Delta V_x &= \widehat{V}_x - V_x.\end{aligned}\tag{1}$$

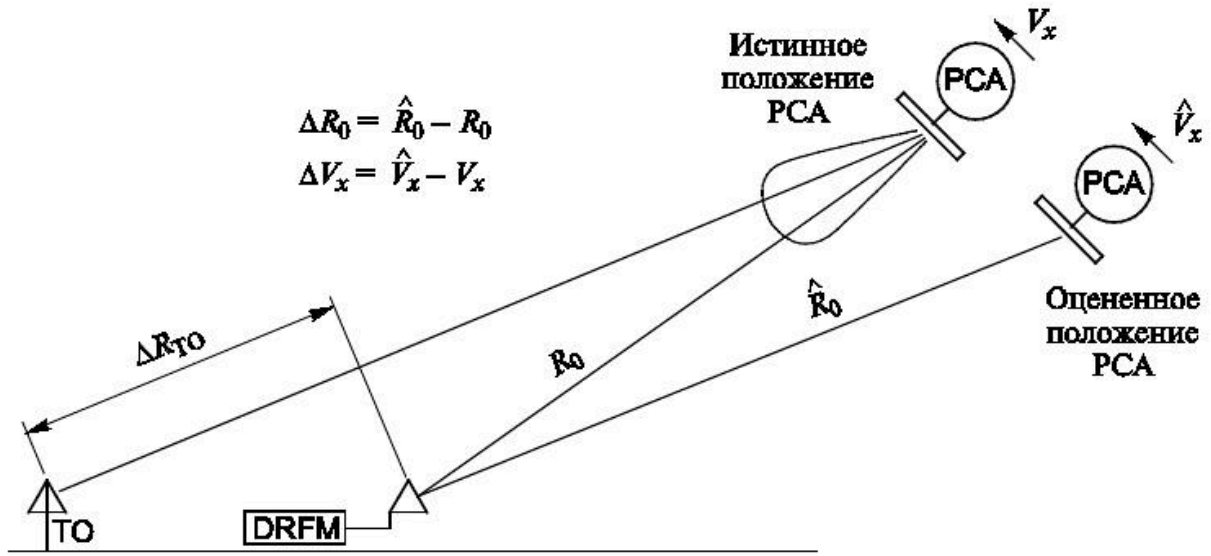


Рис. 1. Расположение тестируемого PCA, DRFM и имитируемого ТО

Чтобы определить снижение отклика азимутального согласованного фильтра (СФ) в зависимости от ошибок оценки наклонной дальности ΔR_0 и азимутальной скорости ΔV_x , необходимо найти разность законов пространственной модуляции:

$$\Delta\Delta R(t) = \Delta R_{false}(t) - \Delta R_{true}(t), \quad (2)$$

где $\Delta R_{true}(t)$ — закон пространственной модуляции зондирующего радиосигнала, отраженного от реального ТО; $\Delta R_{false}(t)$ — закон пространственной модуляции радиосигнала, имитируемого при помощи DRFM.

Максимального снижения отклика следует ожидать при набеге фазы на краях интервала синтеза апертуры антенны порядка 180° :

$$\left| \Delta\Delta R\left(\frac{T_{CA}}{2}\right) \right| \approx \frac{\lambda}{2}, \quad (3)$$

где T_{CA} — длительность интервала синтеза апертуры антенны.

Реальный закон пространственной модуляции определяется выражением

$$\Delta R_{true}(t) \approx (R_0 + \Delta R_{SimRefl}) \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{V_x t}{R_0 + \Delta R_{SimRefl}} \right)^2 \right) - (R_0 + \Delta R_{SimRefl}) =$$

$$= \frac{(V_x t)^2}{2(R_0 + R_{SimRefl})}, \quad (4)$$

где $\Delta R_{SimRefl} = \Delta R_{TO}$ — дальность имитируемого ТО относительно места установки DRFM.

Имитируемый закон пространственной модуляции определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} \Delta R_{false}(t) \approx R_0 + \Delta R_{SimRefl} + \frac{(V_x t)^2}{2R_0} - \frac{\Delta R_{SimRefl} (\widehat{V}_x t)^2}{2\widehat{R}_0 (\widehat{R}_0 + \Delta R_{SimRefl})} - \\ - (R_0 + \Delta R_{SimRefl}) = \frac{(V_x t)^2}{2R_0} - \frac{\Delta R_{SimRefl} (\widehat{V}_x t)^2}{2\widehat{R}_0 (\widehat{R}_0 + \Delta R_{SimRefl})}. \end{aligned} \quad (5)$$

Разность законов пространственной модуляции

$$\Delta \Delta R(t) \approx \frac{\Delta R_{SimRefl} t^2}{2} \left(\frac{V_x^2}{R_0 (R_0 + \Delta R_{SimRefl})} - \frac{\widehat{V}_x^2}{\widehat{R}_0 (\widehat{R}_0 + \Delta R_{SimRefl})} \right) \quad (6)$$

определяет функцию ошибки фазы имитируемой ЦРГ в течение интервала синтеза:

$$\begin{aligned} \Delta \Delta \varphi(t) \approx \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{V_x^2}{R_0 (R_0 + \Delta R_{SimRefl})} - \frac{(V_x + \Delta V_x)^2}{(R_0 + \Delta R_0)(R_0 + \Delta R_0 + \Delta R_{SimRefl})} \right) \times \\ \times R_{SimRefl} \left(\frac{T_{CA}}{2} \right)^2 \left(\frac{2t}{T_{CA}} \right)^2, \end{aligned} \quad (7)$$

которая имеет квадратичную зависимость от времени, как показано на рис. 2.

Ошибку фазы имитируемой ЦРГ на краях интервала синтеза можно найти по формуле

$$\begin{aligned} \Delta \Delta \varphi_{\max} \approx \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{V_x^2}{R_0 (R_0 + \Delta R_{SimRefl})} - \frac{(V_x + \Delta V_x)^2}{(R_0 + \Delta R_0)(R_0 + \Delta R_0 + \Delta R_{SimRefl})} \right) \times \\ \times R_{SimRefl} T_{CA}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

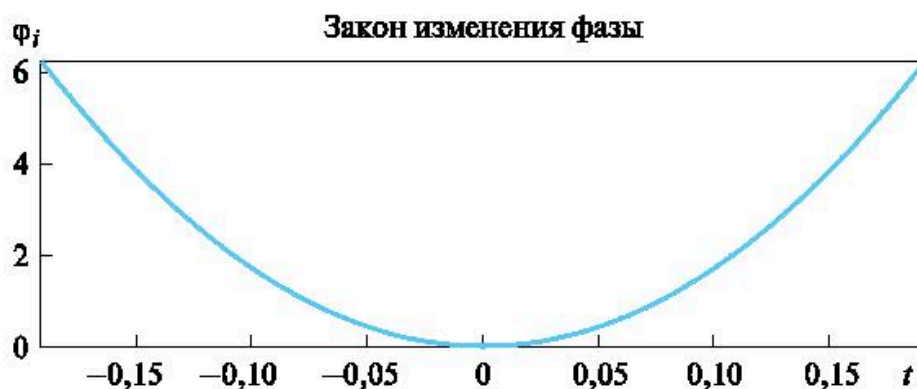


Рис. 2. Функция ошибки фазы имитируемой ЦРГ относительно реального закона пространственной модуляции в течение интервала синтезирования

Из данной формулы видно, что фаза на краях интервала синтезирования линейно зависит от имитируемой дальности ΔR_{SimRef} и квадратично — от времени синтезирования апертуры антенны T_{CA} .

Чтобы найти значение снижения отклика алгоритма согласованного фильтра на имитируемый ТО в зависимости от $\Delta\Delta\varphi_{\max}$, необходимо проинтегрировать в течение времени синтезирования произведение гармонических сигналов с нулевой начальной фазой и с дополнительной фазой, изменяющейся по закону (7), аналогично операциям, выполняемым в согласованном фильтре:

$$u_{MF}(\Delta R_0, \Delta V_x) = \int_0^{T_{CA}} W(t) \exp(j\omega t) \exp(j(\omega t + \Delta\Delta\varphi(t, \Delta R_0, \Delta V_x))) dt, \quad (9)$$

где закон изменения фазы $\Delta\Delta\varphi(t, \Delta R_0, \Delta V_x)$ определяется формулой (7); $W(t)$ — весовое окно, образованное главным лепестком азимутальной ДН антенны PCA в режимах StripMap и SpotLight, а в режиме ScanSAR $W(t) \approx 1$.

На рис. 3 приведена зависимость снижения отклика СФ на имитируемый ТО от нормированного значения (относительно 2π) фазовой ошибки на краях интервала синтезирования, рассчитанная по формуле (9).

Кривая, исходящая из 0 дБ, соответствует отсутствию взвешивания, вторая кривая — взвешиванию главным лепестком ДН, аппроксимированном функцией

$$W(t) = \left(\frac{\sin(t)}{t} \right)^2 = \text{sinc}(t)^2. \quad (10)$$

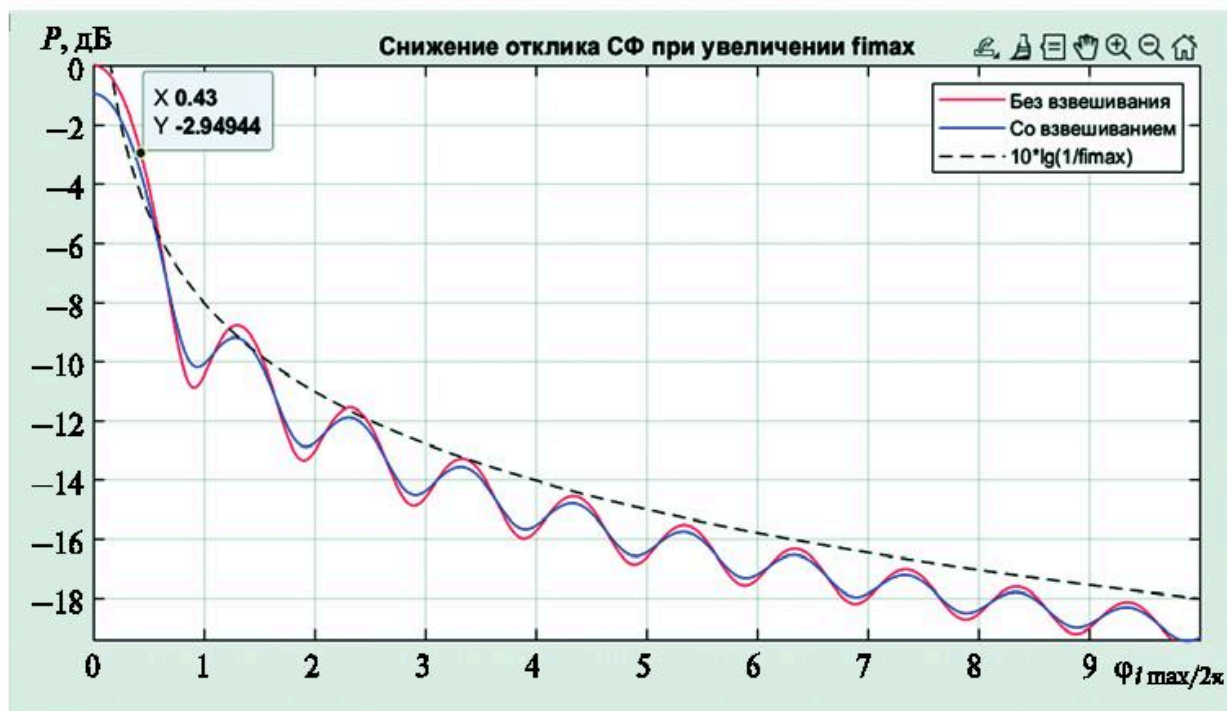


Рис. 3. Зависимость снижения отклика СФ на имитируемый ТО от нормированного значения (относительно 2π) фазовой ошибки на краях интервала синтезирования

Из графиков видно, что снижение отклика на 3дБ происходит при ошибке фазы на краях интервала синтезирования: $\Delta\Delta\varphi_{\max} = 2\pi \cdot 0,43 = 155^\circ$ при отсутствии взвешивания и $\Delta\Delta\varphi_{\max} = 2\pi \cdot 0,45 = 162^\circ$ при наличии взвешивания.

Первый минимум отклика наступает при $\Delta\Delta\varphi_{\max} \approx 2\pi \cdot 0,9 = 324^\circ$, а не при 180° , как предполагалось ранее (см. формулу (3)), что обусловлено квадратичным законом изменения фазовой ошибки $\Delta\Delta\varphi(t)$ (7), существенно возрастающей лишь на краях интервала синтезирования.

На графике также показана функция $P = 10 \lg\left(\frac{1}{\Delta\Delta\varphi_{\max}}\right)$, примерно совпадающая с максимумами функции снижения отклика СФ, что говорит об обратно пропорциональной зависимости уровня отклика от значения фазовой ошибки $\Delta\Delta\varphi_{\max}$ на краях интервала синтезирования.

Задавшись максимальным значением ошибки фазы имитируемой ЦРГ на краях интервала синтезирования $\Delta\Delta\varphi_{\max}$, из (8) можно определить максимально допустимую ошибку оценки азимутальной скорости РСА:

$$\Delta V_{x_{\max}} = \sqrt{\left(R_0 + \Delta R_0 \right) \left(R_0 + \Delta R_0 + \Delta R_{SimRefl} \right) \times \left(\frac{V_x^2}{R_0 \left(R_0 + \Delta R_{SimRefl} \right)} - \frac{2\lambda \Delta \Delta \phi_{\max}}{\pi \Delta R_{SimRefl} T_{CA}^2} \right) - V_x} \approx \sqrt{\left(V_x^2 - \frac{2\lambda \Delta \Delta \phi_{\max} R_0}{\pi \Delta R_{SimRefl} T_{CA}^2} \right) - V_x}. \quad (11)$$

Максимально допустимая ошибка оценки дальности РСА $\Delta R_{0\max}$ может быть найдена также из (8) путем численного решения следующего уравнения:

$$\frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{V_x^2}{R_0 \left(R_0 + \Delta R_{SimRefl} \right)} - \frac{\left(V_x + \Delta V_x \right)^2}{\left(R_0 + \Delta R_0 \right) \left(R_0 + \Delta R_0 + \Delta R_{SimRefl} \right)} \right) \times \Delta R_{SimRefl} T_{CA}^2 - \Delta \Delta \phi_{\max} = 0. \quad (12)$$

На рис. 4 представлены двумерные зависимости уровня отклика СФ на отраженный от ТО радиосигнал от ошибок оценки наклонной дальности ΔR_0 и радиальной скорости ΔV_x носителя РСА, рассчитанные по формулам (9) и (7) для трех базовых режимов радиолокационной съемки космического РСА, — ScanSAR, StripMap, SpotLight. Параметры радиолокационной съемки следующие:

- высота орбиты $H = 650$ км;
- наклонная дальность $R_0 = 850$ км;
- азимутальная скорость $V_x = 7500$ м/с;
- угол зондирования (относительно вертикали) $\beta = 40^\circ$;
- имитируемая дальность в DRFM $\Delta R_{SimRefl} = 10$ км;
- время синтеза апертуры антенны:
 - в режиме ScanSAR — 0,1 с;
 - в режиме StripMap — 0,4 с;
 - в режиме SpotLight — 2 с.

Из рисунка видно, что в режиме ScanSAR типовые значения ошибок дальности $\Delta R_0 = -200 \dots +200$ км и скорости $\Delta V_x = -400 \dots +400$ м/с практически не снижают отклик СФ. В режиме StripMap снижение отклика СФ имеет приемлемый уровень и в большей части анализируемого диапазона ошибок не превышает 3 дБ, и в режиме SpotLight даже при относительно небольших ошибках отклик СФ снижается существенно и в рассматриваемом диапазоне ошибок может падать на 20 дБ и более.

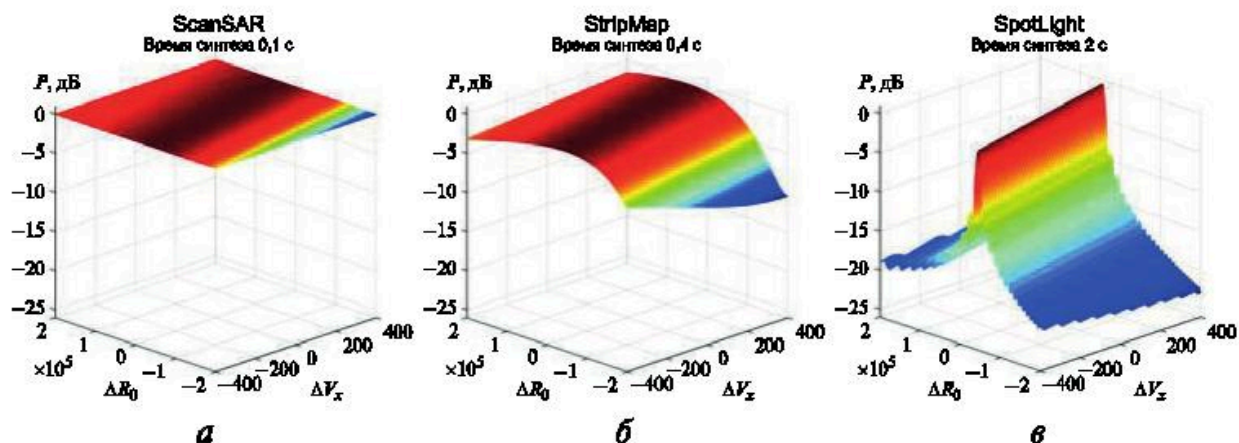


Рис. 4. Двумерные зависимости уровня отклика СФ на отраженный от ТО радиосигнал от ошибок оценки наклонной дальности ΔR_0 и радиальной скорости ΔV_x носителя космического PCA для режимов ScanSAR (а), StripMap (б), SpotLight (в)

Увеличение ошибки ΔR_0 уменьшает крутизну параболического закона $\Delta\Delta\varphi(t)$, в то время как увеличение ошибки ΔV_x увеличивает данную крутизну, поэтому график уровня отклика имеет вид гребня, что особенно наглядно видно на графике для режима SpotLight (рис. 4, в).

На рис. 5 приведены соответствующие сечения двумерных зависимостей уровня отклика СФ вдоль наклонной дальности R_0 (рис. 5, а) и вдоль азимутальной скорости V_x (рис. 5, б) для режимов ScanSAR, StripMap, SpotLight.

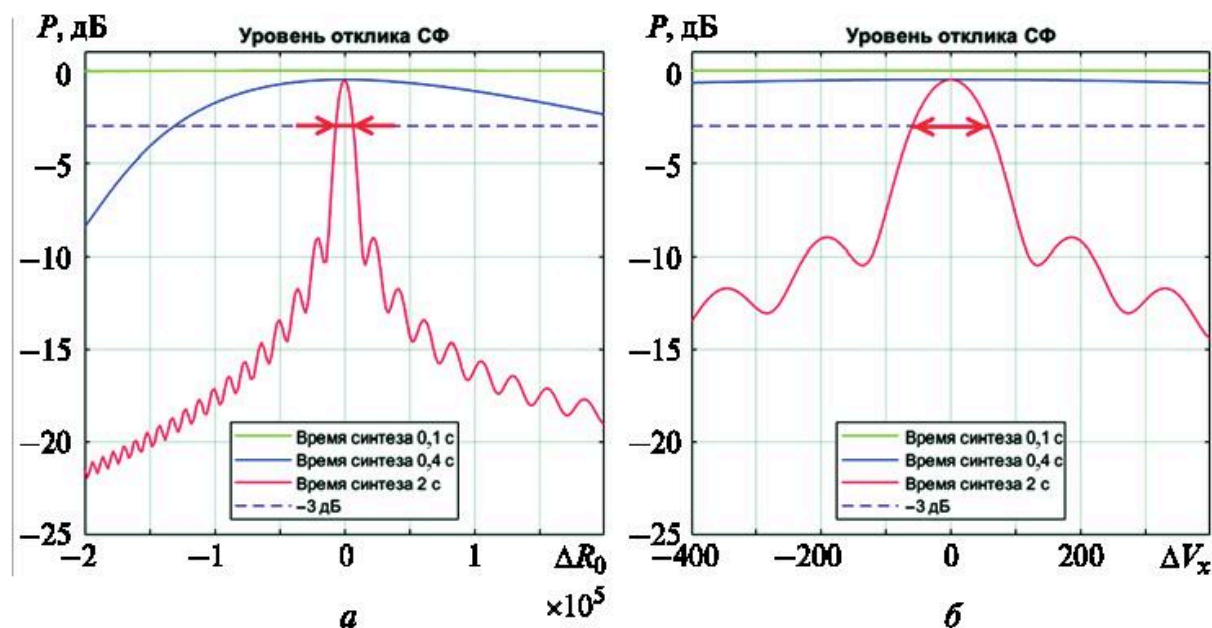


Рис. 5. Сечения двумерных зависимостей уровня отклика СФ вдоль наклонной дальности ΔR_0 (а) и вдоль радиальной скорости ΔV_x (б) для режимов ScanSAR, StripMap, SpotLight

Максимально допустимые ошибки оценки наклонной дальности ΔR_0 и азимутальной скорости ΔV_x при снижении отклика СФ не более чем на 3дБ, определенные по указанным сечениям, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Максимально допустимые ошибки оценки наклонной дальности ΔR_0 и азимутальной скорости ΔV_x при снижении отклика СФ не более чем на 3дБ

Режим	ScanSAR	StripMap	SpotLight
ΔR_0	$\pm\infty$	± 165 км	± 6 км
ΔV_x	$\pm\infty$	$\pm\infty$	± 56 м/с

Схема и параметры вычислительного эксперимента, характеристики тестируемого PCA. Для численного подтверждения аналитических выражений, описывающих зависимость снижения отклика СФ от ошибок оценки наклонной дальности ΔR_0 и азимутальной скорости ΔV_x носителя PCA, приведенных ранее, были использованы численные математические модели PCA и DRFM в системе MATLAB [14, 15], созданные на основе накопленного опыта [9–14] и модифицированные для решения рассматриваемой задачи. Так, на рис. 6 представлена схема вычислительного эксперимента, на рис. 7 — схема модели тестируемого PCA, формирующего РЛИ на основе Omega-k-алгоритма, и на рис. 8 — схема модели DRFM, формирующей искусственную карту с использованием обращенного Omega-k-алгоритма. Схема взаимодействия .m-файлов модели совместной работы PCA и DRFM в MATLAB приведена на рис. 9. Моделировался режим съемки StripMap с параметрами, аналогичными указанным в предыдущем разделе (использованными при расчете графика на рис. 4, 5).

В результате численного моделирования были рассчитаны синтетические РЛИ, формируемые на выходе PCA при имитации в DRFM нескольких точечных отражателей, размещенных в различных участках имитируемого кадра. Расчеты проводились для следующих случаев:

- отсутствия ошибок ($\Delta R_0 = 0$, $\Delta V_x = 0$);
- наличия ошибки оценки дальности ($\Delta R_0 = 600$ км, $\Delta V_x = 0$);
- наличия ошибки оценки скорости ($\Delta R_0 = 0$, $\Delta V_x = 500$ м/с).

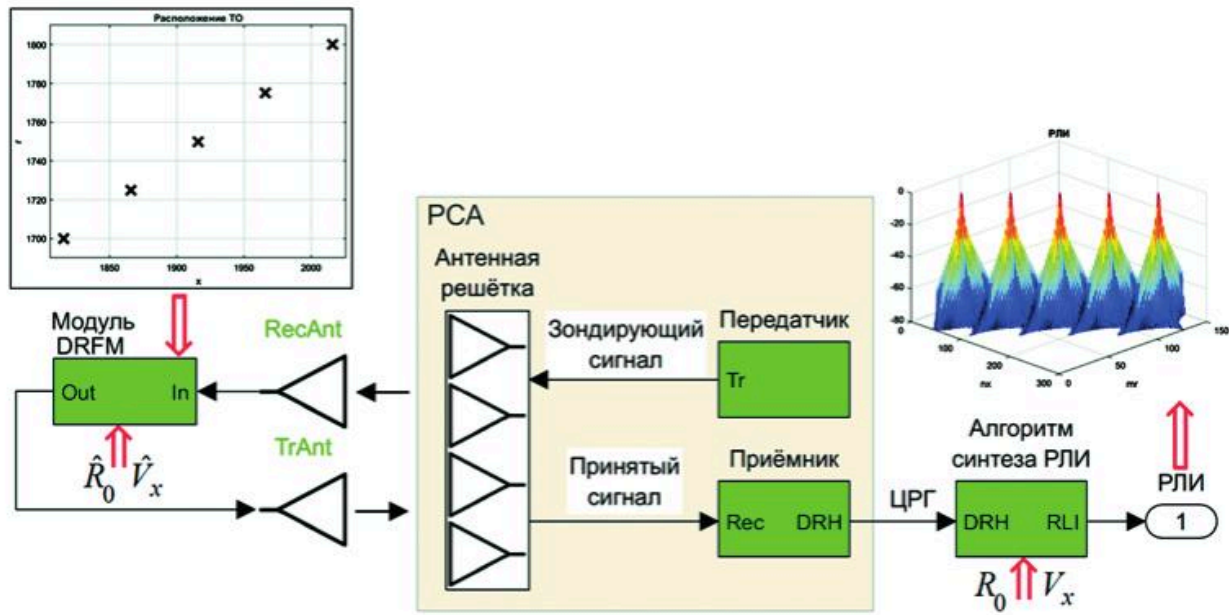


Рис. 6. Схема вычислительного эксперимента

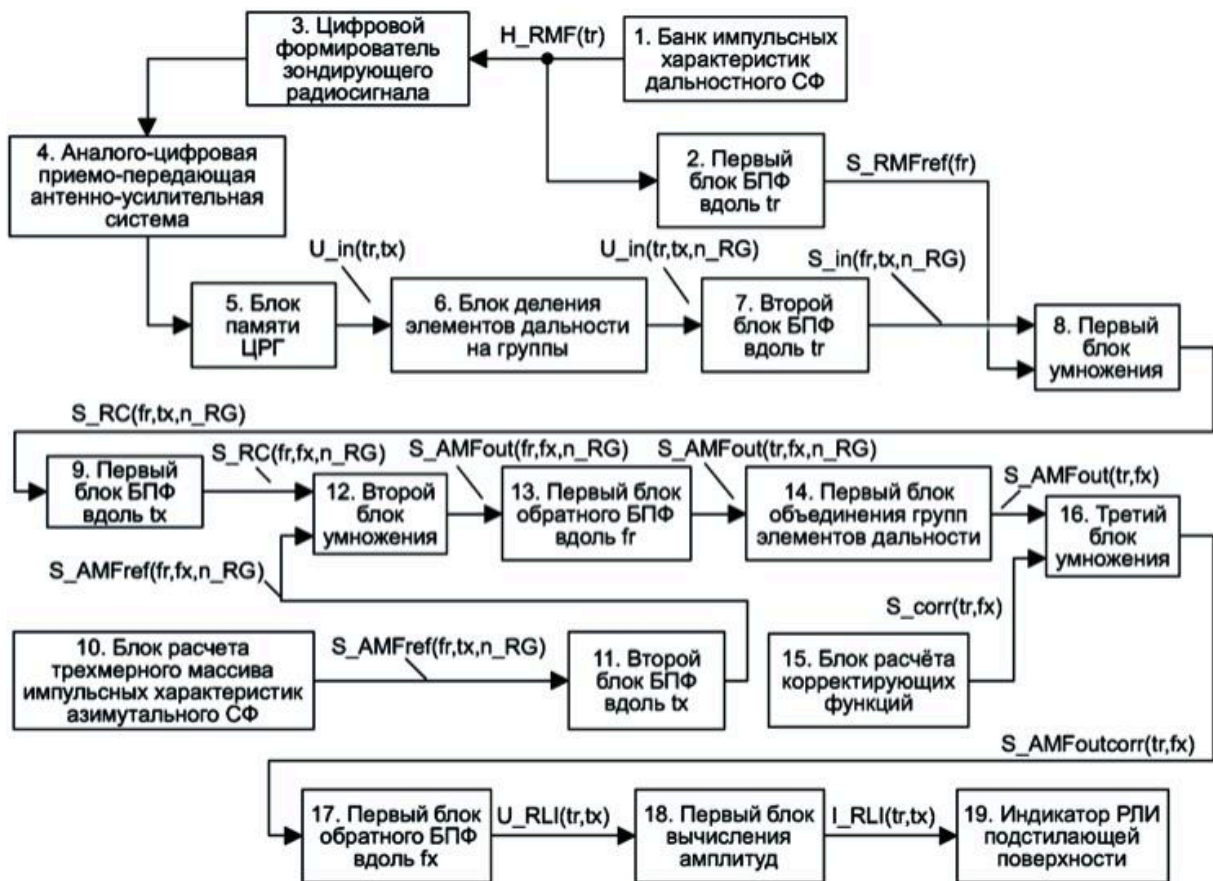


Рис. 7. Схема модели PCA на основе Омега-k-алгоритма



Рис. 8. Схема модели DRFM на основе обращенного Омега-k-алгоритма

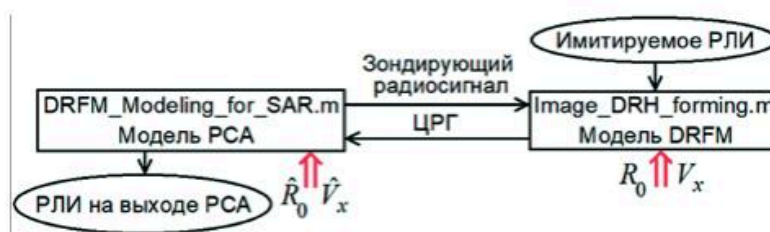


Рис. 9. Схема модели совместной работы PCA и DRFM в MATLAB

Характеристики тестируемого PCA и параметры моделирования перечислены ниже:

Высота орбиты космического аппарата-носителя PCA, км	650
Размер апертуры АФАР PCA (у.м.хаз.), м	1,472×6,446
Режим съемки	StripMap
Ширина полосы съемки по Земле, м	16 279
Протяженность полосы съемки вдоль линии пути, м	5000
Время съемки, с	116
Время синтеза апертуры, с	0,385
Разрешение PCA (накл. дальн.хаз.), м	3,6×6,0
Размеры пикселя РЛИ (накл. дальн.хаз.), м	3,0×2,7
Полоса зондирующего радиосигнала PCA, МГц	41,7
Длина M-последовательности	511
Число чередуемых M-последовательностей	48
Средняя частота повторения ЗРИ, Гц	5017
Средняя скважность зондирующего радиосигнала	9,75
Размер обрабатываемого массива данных при синтезе РЛИ	4096×4096×2

На рис. 10, *а* представлено расположение ТО в тестовом кадре; на рис. 10, *б* — РЛИ тестового кадра при отсутствии ошибок оценки дальности и скорости ($\Delta R_0 = 0$, $\Delta V_x = 0$); на рис. 10, *в* — РЛИ тестового кадра при отсутствии ошибки оценки дальности и наличии ошибки оценки скорости ($\Delta R_0 = 0$, $\Delta V_x = 500$ м/с); на рис. 10, *г* — РЛИ тестового кадра при наличии ошибки оценки дальности и отсутствии ошибки оценки скорости ($\Delta R_0 = 600$ км, $\Delta V_x = 0$).

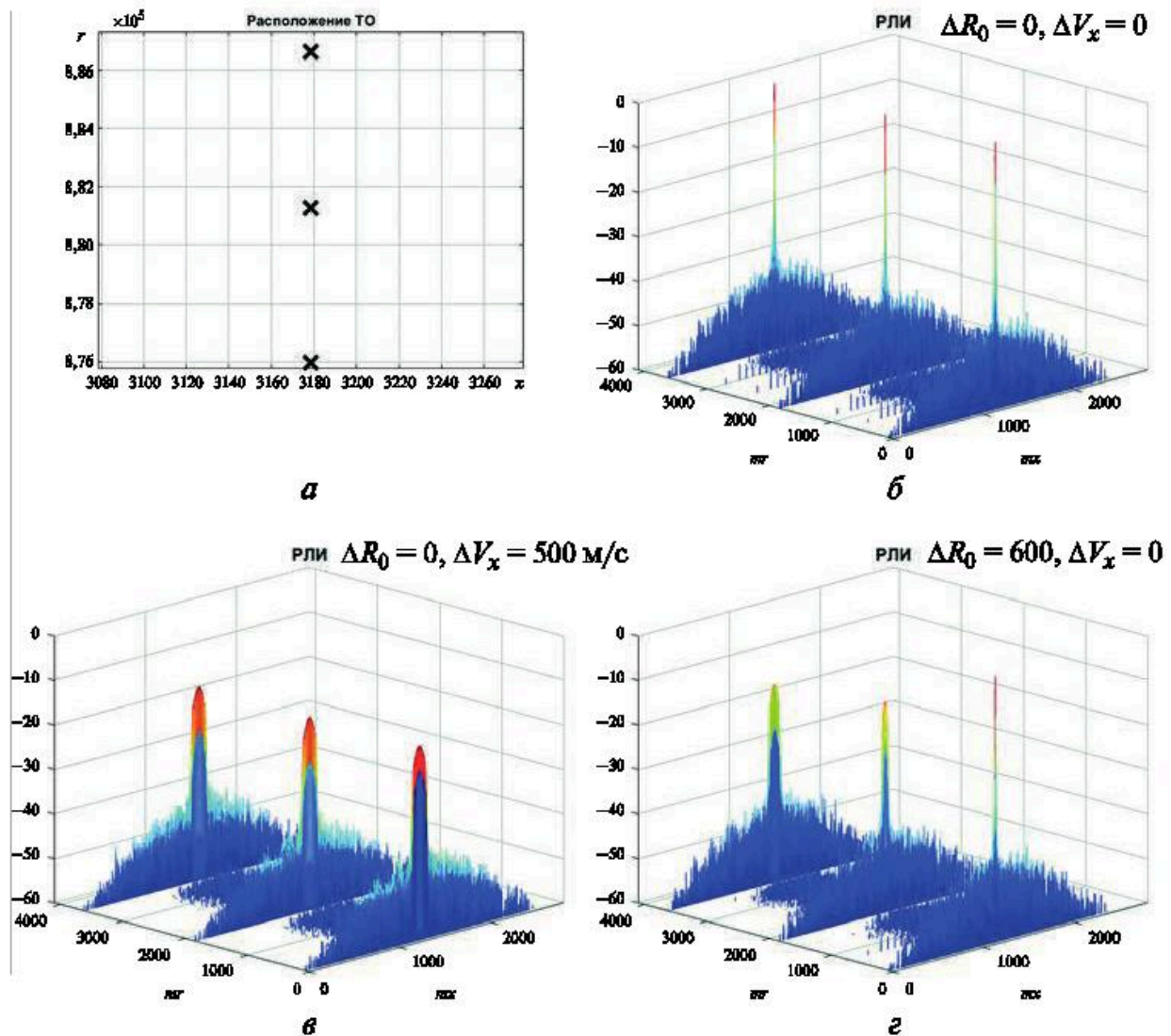


Рис. 10. Расположение ТО в тестовом кадре (*а*); РЛИ тестового кадра при отсутствии ошибок оценки дальности и скорости (*б*) ($\Delta R_0 = 0$, $\Delta V_x = 0$); РЛИ тестового кадра при отсутствии ошибки оценки дальности и наличии ошибки оценки скорости (*в*) ($\Delta R_0 = 0$, $\Delta V_x = 500$ м/с); РЛИ тестового кадра при наличии ошибки оценки дальности и отсутствии ошибки оценки скорости (*г*) ($\Delta R_0 = 600$ км, $\Delta V_x = 0$); mr — номер элемента наклонной дальности; px — номер азимутального элемента. По оси Oz отложена яркость пикселей РЛИ в дБ

Из рисунка видно, что ошибка оценки скорости приводит к одинаковым развалам откликов во всем кадре РЛИ (рис. 10, в), в то время как при наличии ошибки оценки дальности (рис. 10, г) развал отклика увеличивается с возрастанием имитируемой в DRFM дальности ТО $\Delta R_{SimRefl}$, что соответствует формуле (8).

Заключение. В результате проведенной работы получены следующие результаты.

1. Выведены аналитические соотношения для максимально допустимых ошибок оценки дальности и скорости РСА, не приводящих к существенному развалу откликов имитируемых ТО.

2. Значение фазовой ошибки $\Delta\varphi_{\max}$ на краях интервала синтеза линейно зависит от имитируемой дальности и квадратично — от времени синтеза (см. формулу (8)).

3. Снижение отклика СФ на имитируемый ТО обратно пропорционально значению ошибки фазы $\Delta\varphi_{\max}$ на краях интервала синтеза (рис. 3).

4. Уровень отклика СФ на имитируемый ТО практически обратно пропорционален имитируемой дальности ТО $\Delta R_{SimRefl}$ и квадрату времени синтеза апертуры T_{CA} (см. формулу (8) и рис. 3).

5. Увеличение ΔR_0 уменьшает крутизну параболического закона $\Delta\varphi(t)$, в то время как увеличение ΔV_x увеличивает данную крутизну, поэтому график уровня отклика имеет вид гребня (рис. 4);

6. Для космических РСА, размещенных на типовых солнечно-синхронных орбитах, практические значения ошибок установки наклонной дальности ΔR_0 и азимутальной скорости ΔV_x в DRFM: в режиме ScanSAR — не оказывают существенного влияния на отклик СФ (снижение отклика — не более десятых долей дБ), в режиме StripMap — оказывают незначительное влияние (снижение отклика — не более 3 дБ), в режиме SpotLight — могут существенно снижать и разваливать отклик СФ (снижение отклика может составлять 20...30 дБ).

7. Ошибка оценки скорости приводит к одинаковым развалам откликов во всем кадре РЛИ, в то время как при наличии ошибки оценки дальности развал отклика увеличивается с возрастанием имитируемой в DRFM дальности ТО $\Delta R_{SimRefl}$ (см. рис. 10).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zebker H.A., Held D.N., Goldstein R.M., Bickler T.C. Synthetic aperture radar target simulator. *United States Patent US4450447A*. May 22, 1984.
- [2] Zhao Z.Y., Yu. G.Z. Research on SAR Jamming Technique Based on Man-made Map. *CIE International Conference on Radar*, 2006.
- [3] Dai D., Wu X.F., Wang X., Xiao S. SAR Active-Decoys Jamming Based on DRFM. *IET International Conference on Radar Systems*, 2007.
- [4] Галашин М.Е., Лисовская Т.В., Мельников М.Ю., Кочеров А.Н., Полянский П.О. Формирование изображения ложной цели на экране радиолокаторов с синтезированной апертурой с помощью универсального устройства формирования сигнала на основе полужаказной СБИС 1879ВМ3. *Материалы конференции по беспилотным системам UVS Tech 2010*.
- [5] Валов С.В., Сиротин А.И., Щербаков С.В. Имитатор сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой. *Описание изобретения к патенту RU 2522502 C1*. 10.12.2012
- [6] Yinhui X., Dazhi Z., Tao Y., Xiaoheng X.. A Real-time SAR Echo Simulator Based on FPGA and Parallel Computing. *TELKOMNIKA*. 2015, vol.13, no. 3, pp. 806–812.
- [7] Sun Q., Shu T., Yu K.-B., Yu W. Efficient Deceptive Jamming Method of Static and Moving Targets Against SAR. *IEEE Sensors Journal*. 2018, vol. 18, is. 9, doi: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2813521>
- [8] Saeedi J. A New Hybrid Method for Synthetic Aperture Radar Deceptive Jamming. *International Journal of Microwave Engineering (JMICO)*. 2019, vol. 4, no. 1.
- [9] Горбунов Ю.Н., Сонин А.П., Хромцев А.В., Свирин Д.М. Тестирование радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны при помощи DRFM. *Журнал радиоэлектроники*. 2022, № 1. URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.1.7>
- [10] Сонин А.П. Тестирование радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны при помощи цифровой радиочастотной памяти (DRFM), формирующей искусственные карты. Тр. VIII Всероссийской научно-технической конференции «Дальняя радиолокация на службе Отечеству». Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2022. 387с.
- [11] Сонин А.П. Параллельное моделирование в MATLAB цифровой радиочастотной памяти (DRFM), формирующей искусственные карты для тестирования радиолокатора с синтезированной апертурой антенны. *Сборник трудов Международной конференции «Моделирование в инженерном деле»*. Москва, МГТУ им Н.Э. Баумана, 2023.
- [12] Сонин А.П. Влияние перестройки периода повторения зондирующих радиоимпульсов на качество радиолокационного изображения, формируемого цифровой радиочастотной памятью на выходе тестируемого радиолокатора с синтезированной апертурой антенны. *Сборник трудов X Всероссийской научно-технической конференции «Дальняя радиолокация на службе Отечеству»*. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023.
- [13] Сонин А.П., Хромцев А.В., Свирин Д.М. DRFM на основе ПЛИС Virtex-7 для тестирования радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны. *FPGA-Systems Magazine*: № BETA (state_1), 2024, с. 88.

- [14] Сонин А.П. Моделирование цифровой обработки сигналов в радиолокаторах с синтезированной апертурой антенны на множестве CUDA GPU в MATLAB. Сборник трудов VII Всероссийской научно-практической конференции «Технологии разработки и отладки сложных технических систем». Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, 457 с.
- [15] *Parallel Computing Toolbox User's Guide. R2024b*. The MathWorks, Inc., 2024, 1256 p.

Сонин Александр Петрович — канд. техн. наук, начальник лаборатории АО «НПО дальней радиолокации имени академика А.Л. Минца». e-mail: asonin@npodr.ru

The impact of range and speed estimation errors of a Synthetic Aperture Radar carrier to the quality of a Radar Image simulated by using Digital Radio-Frequency Memory

© A.P. Sonin

Long-Range Radar, JSC

The article considers the impact of range and speed estimation errors of a Synthetic Aperture Radar (SAR) carrier to the quality of the radar image, formed by Digital Radio-Frequency Memory (DRFM) at the output of this radar during its testing. The studies were carried out using numerical simulation methods in MATLAB for the joint operation of SAR and DRFM. Inverted Omega-k algorithm based DRFM, which can form a Man-Made Maps (MMMs) of the Earth's surface at the SAR output, was studied. An image containing several point reflectors in different parts of the simulated frame was used as a test image.

Keywords: *synthetic Aperture Radar (SAR), Digital Radio-Frequency Memory (DRFM), Digital Radiohologram (DRH), Radar Image, Point Reflector, Omega-k algorithm, ScanSAR, StripMap, SpotLight, MATLAB.*

Sonin A.P., Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory at Long-Range Radar, JSC.
e-mail: asonin@npodr.ru