

В.В. Павликов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРВИЧНЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СКАНИРУЮЩИХ РАДИОМЕТРАХ КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА

Исследуется возможность повышения качества первичных радиометрических изображений, формируемых с помощью сканирующих радиометрических устройств компенсационного типа, использованием весовой обработки амплитудно-фазового распределения поля в апертуре антенны оконными функциями (классическими и функциями Кравченко). Для количественной оценки подобия восстановленных и истинного изображений использованы следующие метрики: среднемодульное отклонение, SSIM, DSSIM. Обосновывается целесообразность использования в рассматриваемых задачах весовых функций Кравченко, синтезированных с использованием атомарных функций семейства f_{iN} .

Ключевые слова: функция неопределенности радиометрической системы, оптимальный алгоритм, сканирующий радиометр компенсационного типа, радиометрическое изображение.

Введение

Алгоритмически простые методы восстановления радиометрических изображений (РМИ) реализуют радиометры сканирующего типа. Оптимизация процессов обработки стохастических сигналов в таких приемниках выполнена в работах [1 – 3]. Однако в этих работах не рассмотрены вопросы имитационного моделирования РМИ, не исследованы качественные показатели формирования первичных РМИ и возможности их повышения. В статье, следуя синтезированным в [1, 2] алгоритмам, решены задачи восстановления РМИ в сканирующих радиометрах компенсационного типа и обоснована целесообразность повышения качества формирования первичных РМИ весовой обработкой амплитудно-фазового распределения (АФР) поля в апертуре антенны. Оценка качества дана на основе следующих метрик: среднемодульного отклонения, SSIM [4] и DSSIM.

Цель работы – повышение качества первичных РМИ в сканирующих радиометрах компенсационного типа применением весовой обработки АФР поля в апертуре антенны.

Оптимальный алгоритм обработки сигналов радиотеплового излучения в сканирующих радиометрических приемниках компенсационного типа

В работах [1, 2] автором решена задача оптимального оценивания РМИ (спектрально-угловой плотности мощности $V(f, \vec{\vartheta})$ или радиояркости $V(\vec{\vartheta})$) как функции направляющих косинусов $\vec{\vartheta}$ в сканирующем радиометре в текущий момент времени сканирования t и синтезирован оптимальный алгоритм без операции пространственного сверхразрешения в виде (см. выражение (5) в [1])

$$\begin{aligned} & 0,5 \int_{\vec{\vartheta}} \hat{B}(\vec{\vartheta}') \Psi_{AG}(\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}, \hat{B}(\vec{\vartheta}')) d\vec{\vartheta}' = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{K}(j2\pi f)| \int_0^t \sqrt{A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0(t))} \times \\ & \times G^{-1}(f, t, \hat{B}(\vec{\vartheta})) u(t, \vec{\vartheta}_0(t)) \exp\{-j2\pi f t\} dt \|^2 df - \\ & - 0,5 N_0 C(\vec{\vartheta}, \hat{B}(\vec{\vartheta})), \end{aligned} \quad (1)$$

где « $\hat{}$ » – знак оценки,

$$\begin{aligned} \Psi_{AG}(\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}, \hat{B}(\vec{\vartheta}')) &= 2 \int_0^t A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0(t_1)) \times \\ & \times A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0(t_1)) \Delta F(t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta})) dt_1 \end{aligned} \quad (2)$$

– радиометрический аналог функции неопределенности (ФН) (нестационарной), $A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0(t))$ – эффективная площадь антенны [5],

$$\begin{aligned} 2\Delta F(t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta})) &= \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{K}(j2\pi f)|^2 \times \\ & \times |\hat{K}_W(j2\pi f, t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta}))|^2 df \end{aligned} \quad (3)$$

– ширина полосы двухсторонней частотной характеристики входного тракта радиометра после согласованного и декоррелирующего фильтров,

$$|\hat{K}_W(j2\pi f, t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta}))|^2 = |\hat{K}(j2\pi f)|^2 G^{-2}(f, t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta})) \quad (4)$$

– квадрат модуля передаточной характеристики нестационарного декоррелирующего фильтра,

$$\begin{aligned} G(f, t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta})) &= \\ & = \frac{1}{2} \left\{ \int_{\vec{\vartheta}} \hat{B}(\vec{\vartheta}') \Psi_{AG}(\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0(t_1), \hat{B}(\vec{\vartheta}')) d\vec{\vartheta}' + N_0 \right\} \times \\ & \times |\hat{K}(j2\pi f)|^2 + N_p / 2, \end{aligned} \quad (5)$$

$$C(\vec{\vartheta}, \hat{B}(\vec{\vartheta})) = 2 \int_0^t A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0(t_1)) \Delta F(t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta})) dt_1, \quad (6)$$

$\hat{K}(j2\pi f)$ – передаточная характеристика входных цепей радиометра, $u(t, \vec{\vartheta}_0(t))$ – наблюдение на вы-

ходе преддетекторной части приемника, N_0 и N_p – спектральные плотности мощности внутренних шумов радиометра и регулирующей добавки [1], исключаяющей сингулярные решения интегральных уравнений при синтезе оптимального алгоритма.

При записи алгоритма (1) учтено, что спектральная плотность мощности регулирующей добавки существенно меньше спектральной плотности мощности внутренних шумов радиометра.

Левая часть алгоритма (1) (характеризует физическую сущность синтезированного алгоритма) – это сглаженная ФН (2) радиометра оценка радиояркости $\hat{B}(\vec{\vartheta})$. Правая часть содержит оптимальные операции, которые необходимо выполнить над принятым наблюдением $u(t, \vec{\vartheta}_0(t))$. Левая и правая части в (1) приравниваются друг к другу и равенство достигается при статистическом усреднении правой части.

Формирование первичных РМИ

Сформировать первичные РМИ согласно (1) можно двумя путями – реализовать обработку стохастических сигналов радиотеплового излучения согласно правой части с последующей процедурой усреднения (статистическое усреднение приближенно можно заменить усреднением в скользящем фильтре) или непосредственным моделированием левой части. Последний вариант более приемлем в вычислительном плане. Для его реализации требуется рассчитать ФН, которая зависит от эффективной площади антенны $A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0(t))$ и полосы частот $\Delta F(t_1, \hat{B}(\vec{\vartheta}))$. Здесь целесообразно перейти к квазиоптимальному алгоритму введя следующее предположение: пусть полоса частот преддетекторной части приемника не зависит от времени, т.е. зависит от некоторого среднего значения РМИ $\hat{B}_{\text{av}}(\vec{\vartheta})$ ($\Delta F(\hat{B}_{\text{av}}(\vec{\vartheta}))$). Тогда $|\dot{K}_W(j2\pi f, \hat{B}_{\text{av}}(\vec{\vartheta}))|^2 = |\dot{K}(j2\pi f)|^2 G^{-2}(f, \hat{B}_{\text{av}}(\vec{\vartheta}))$ и ФН (2) примет вид

$$\Psi_{AG}(\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}, \hat{B}_{\text{av}}(\vec{\vartheta}')) = 2\Delta F(\hat{B}_{\text{av}}(\vec{\vartheta})) \times \int_0^t A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0(t_1)) A_{\text{eff}}(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0(t_1)) dt_1. \quad (7)$$

Введенное предположение упрощает практическую реализацию синтезированного алгоритма (1) и проведение предварительных расчетов, но снижает точность оценивания. Физически ясно, что эти потери будут несущественны для РМИ с малым динамическим диапазоном и возрастают при его увеличении.

Из анализа (7) следует, что вид ФН зависит от эффективной площади антенны, которая, в свою очередь, зависит от АФР поля в апертуре антенны. Исследуем влияние АФР на форму ФН и результат восстановления первичного РМИ. Вначале рассмотрим равноамплитудное распределение поля в апертуре антенны. Вид ФН показан на рис. 1.

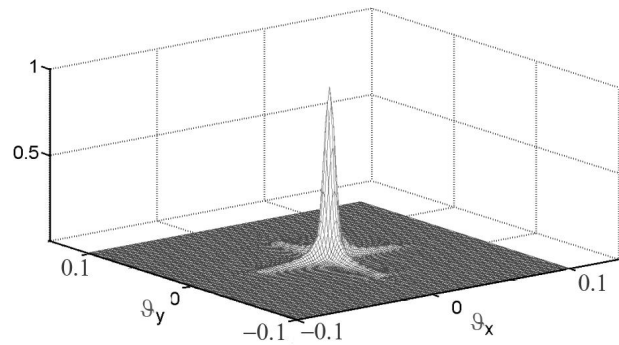


Рис. 1. ФН для равномерного АФР

На рис. 2 приведено тестовое изображение звёздного неба, подлежащее восстановлению, а на рис. 3 – восстановленное РМИ.

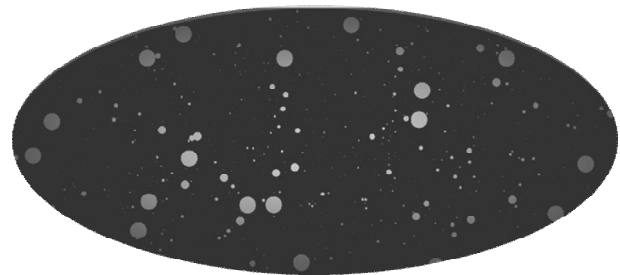


Рис. 2. Истинное РМИ звёздного неба

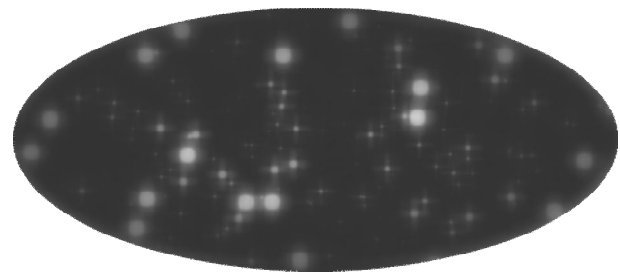


Рис. 3. Результат восстановления РМИ

Наличие высокого уровня боковых лепестков (УБЛ) ФН, показанной на рис. 1, приводит к крестообразному размытию контрастных участков РМИ. Снизить влияние боковых лепестков можно весовой обработкой АФР.

Весовые функции в задачах повышения качества первичных РМИ. Обобщенные весовые функции Кравченко

Весовые функции в теории антенн используют в целях коррекции значимости различных участков (элементов) поля, принимаемого антенной. Традиционно рассматривают окна Хемминга, Кайзера, Ханна, Чебышева, Натталла и др. Выбор окна чаще сопряжен с анализом его спектра и сравнением следующих основных характеристик: ширины главного лепестка; УБЛ; скорости спада боковых лепестков, максимальных потерь преобразования; энергетических потерь и т.д. При этом постоянно приходится решать компромиссные задачи, которые редко под-

даются оптимальному решению. Так, уменьшая УБЛ и увеличивая скорость их спада, неизбежно расширяем главный лепесток спектра окна. Несмотря на многочисленные публикации, исследователи предпочитают сами разрабатывать (эвристический синтез) окна по физически обоснованному критерию качества для конкретно решаемой задачи. Здесь важно дать исследователю инструмент – формулу, согласно которой можно синтезировать окно.

В настоящее время при решении широкого класса задач математической физики применяются атомарные функции (АФ) и синтезированные на их основе весовые функции Кравченко [6–8]. АФ [6] – это финитные бесконечно дифференцируемые функции, являющиеся решениями дифференциальных уравнений со смещённым аргументом

$$L\{f(t)\} = \lambda \sum_{k=1}^M c(k) f(at - b(k)), |a| > 1, \quad (8)$$

где $L\{\cdot\}$ – линейный дифференциальный оператор с постоянными коэффициентами. В случае $a=1$, $b(k) \equiv 0$ ($k=1, M$) (8) становится обыкновенным дифференциальным уравнением.

Рассмотрим несколько семейств АФ

$$\text{up}(t) = \int \prod_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(2^{-k+1} \pi f)}{2^{-k+1} \pi f} \exp(j2\pi f t) df, \quad t \in [-1, 1], \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{fup}_N(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\sin(\pi f)}{\pi f} \right)^N \prod_{k=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi f 2^{-k+1})}{\pi f 2^{-k+1}} \exp(j2\pi f t) df, \quad (10) \\ t &\in \left[-\frac{N+2}{2}, \frac{N+2}{2} \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_a(t) &= \int \prod_{k=1}^{\infty} \frac{\sin[2\pi f a^{-k}]}{2\pi f a^{-k}} \exp(j2\pi f t) df, \quad (11) \\ t &\in \left[-\frac{1}{a-1}, \frac{1}{a-1} \right], \quad a \geq 2. \end{aligned}$$

Обобщенный алгоритм формирования весовых функций Кравченко [6–8] представим в виде [9]

$$WF(t, \Delta, z) = \left[(1 - \Delta) \{ AF(t, a), CW(t, b) \}^q + \Delta \right]^z, \quad (12)$$

где $AF(t, a)$ – АФ, зависящая от параметра a (например, $\text{fup}_a(t)$ или $h_a(t)$), $CW(t, b)$ – классическая весовая функция, которая, в общем случае, может зависеть от параметра b , $\{AF(t, a), CW(t, b)\}$ – весовое суммирование или умножение АФ и классических весовых функций, $\Delta \in [0, 1)$ – порог, $z > 0$, $q \neq 0$ – коэффициенты.

Вид ФН для АФР, взвешенного функцией Хемминга, показан на рис. 4. На рис. 6 приведены модули разности РМИ, показанных на рис. 3 и 5, и истинного распределения радиояркости (см. рис. 2).

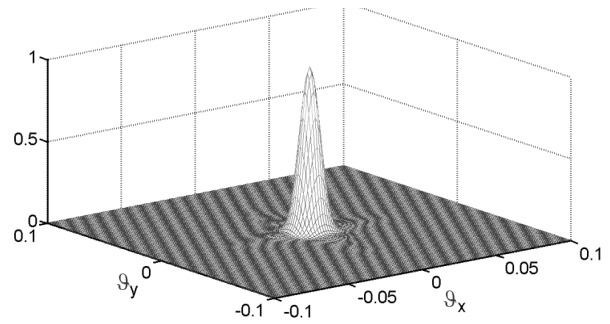


Рис. 4. Вид ФН для АФР, взвешенного функцией Хемминга

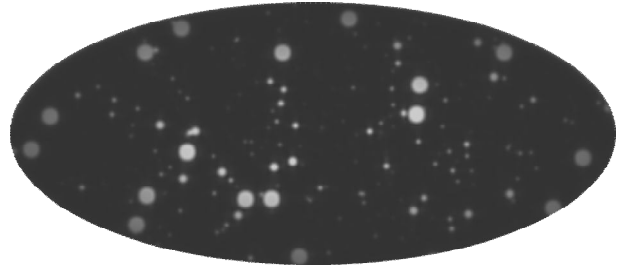
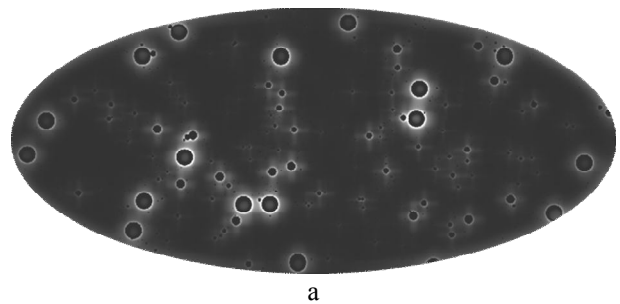
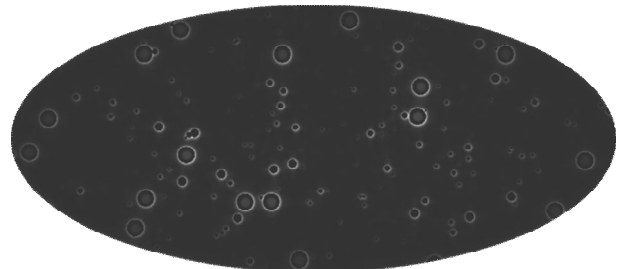


Рис. 5. Результат восстановления РМИ



а



б

Рис. 6. Модули разности восстановленных и истинного РМИ: разность между РМИ, показанными на рис. 3 и рис. 2 (а), разность между РМИ, показанными на рис. 5 и рис. 2 (б)

Из анализа ошибок восстановления, приведенных на рис. 6 следует, что более широкий главный лепесток ФН, полученной с весовой обработкой АФР функцией Хемминга, размывает линию контура несколько больше (см. рис. 6.б), чем ФН, полученная с применением равномерной АФР (см. рис. 6.а). Однако, вблизи границ в направлении боковых лепестков на РМИ, восстановленном с использованием АФР без весовой обработки, наблюдаются значительные крестообразные размывания (см. рис. 6.а).

Таблица 1

Ошибки восстановления РМИ

№	Весовая функция	СМО	SSIM	DSSIM
1	Кравченко $(1-0.01) fup_2^{0.15}(t) + 0.01$	1,37	0,87	7,99
2	Кравченко $(1-0.01) fup_2^{0.17}(t) + 0.01$	1,36	0,88	8,02
3	Кравченко $(1-0.01) fup_2^{0.2}(t) + 0.01$	1,35	0,87	7,99
4	Кравченко $(1-0.01) fup_2^{0.23}(t) + 0.01$	1,35	0,87	7,99
5	Кравченко $(1-0.01) fup_2^{0.25}(t) + 0.01$	1,36	0,87	7,85
6	Кравченко $(1-0.01) fup_3^{0.15}(t) + 0.01$	1,35	0,88	8,03
7	Кравченко $(1-0.01) fup_3^{0.17}(t) + 0.01$	1,35	0,87	7,99
8	Кравченко $(1-0.01) fup_3^{0.2}(t) + 0.01$	1,36	0,87	7,88
9	Кравченко $(1-0.01) fup_3^{0.23}(t) + 0.01$	1,38	0,87	7,74
10	Кравченко $(1-0.01) fup_3^{0.25}(t) + 0.01$	1,39	0,87	7,63
11	Кравченко $(1-0.01) fup_4^{0.15}(t) + 0.01$	1,35	0,87	7,98
12	Кравченко $(1-0.01) fup_4^{0.17}(t) + 0.01$	1,36	0,87	7,88
13	Кравченко $(1-0.01) fup_4^{0.2}(t) + 0.01$	1,38	0,87	7,70
14	Кравченко $(1-0.01) fup_4^{0.23}(t) + 0.01$	1,41	0,87	7,51
15	Кравченко $(1-0.01) fup_4^{0.25}(t) + 0.01$	1,44	0,86	7,37
16	Кравченко $(1-0.01) fup_5^{0.15}(t) + 0.01$	1,36	0,87	7,87
17	Кравченко $(1-0.01) fup_5^{0.17}(t) + 0.01$	1,38	0,87	7,73
18	Кравченко $(1-0.01) fup_5^{0.2}(t) + 0.01$	1,41	0,87	7,50
19	Кравченко $(1-0.01) fup_5^{0.23}(t) + 0.01$	1,46	0,86	7,26
20	Кравченко $(1-0.01) fup_5^{0.25}(t) + 0.01$	1,49	0,86	7,11
21	Хемминга $H(t)$	1,51	0,86	7,03
22	Ханна	1,66	0,84	6,43
23	Кайзера $K(t, \beta = 5)$	1,50	0,86	7,05
24	Гаусса $G(t, \alpha = 2, 5)$	1,63	0,85	6,57
25	Равномерная	2,18	0,79	4,82

Дадим количественную оценку потерь при восстановлении РМИ с использованием ФН для различных типов АФР. В качестве количественного критерия выберем среднемодульное отклонение, которое в дискретной форме примет следующий вид

$$C = \frac{1}{K \cdot L} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L |RMI(k,l) - \widehat{RMI}(k,l)|, \quad (13)$$

где $RMI(k,l)$ – радиометрическое изображение, $\widehat{RMI}(k,l)$ – оценка радиометрическое, $K \times L$ – размер изображения в пикселах.

Значения среднемодульных отклонений восстановленных и истинного РМИ при использовании классических весовых функций и функций Кравченко, построенных согласно (12) с применением АФ семейства fup_N , приведены в табл. 1. Кроме того целесообразно сравнить восстановленные и истинное РМИ используя индекс структурного подобия (SSIM) [4] и структурного различия (DSSIM):

– SSIM метрика

$$SSIM(RMI, \widehat{RMI}) = \frac{(2\langle RMI \rangle \langle \widehat{RMI} \rangle + c_1)(2\sigma_{RMI\widehat{RMI}} + c_2)}{(\langle RMI \rangle^2 + \langle \widehat{RMI} \rangle^2 + c_1)(\sigma_{RMI}^2 + \sigma_{\widehat{RMI}}^2 + c_2)}, \quad (14)$$

где σ_{RMI}^2 – дисперсия, $\sigma_{\widehat{RMI}}^2$ – дисперсия, $\sigma_{RMI\widehat{RMI}}$ – ковариация изображений RMI и \widehat{RMI} , $c_1 = (k_1J)^2$, $c_2 = (k_2J)^2$, J – динамический диапазон изображений, $k_1 = 0,01$, $k_2 = 0,03$, $-1 \leq SSIM(RMI, \widehat{RMI}) \leq 1$;

– DSSIM метрика

$$DSSIM(RMI, \widehat{RMI}) = \frac{1}{1 - SSIM(RMI, \widehat{RMI})}. \quad (15)$$

В табл. 1 приведены весовые функции (двадцать Кравченко и пять классических), используемые при восстановлении РМИ в сканирующем радиометре компенсационного типа.

Из анализа табл. 1 следует, что использование весовых окон Кравченко обеспечивает более качественное восстановление РМИ в сканирующих радиометрических устройствах по всем метрикам. Вид ФН для АФР, взвешенного окном Кравченко (№11 в табл. 1) $(1-0.01) fup_4^{0.15}(t) + 0.01$ показан на рис. 7.

Главный лепесток ФН, полученной взвешиванием АФР функцией Кравченко (кривая 2 на рис. 7), более локализован в пространственной области, нежели главный лепесток ФН при равномерном АФР. На рис. 8 показано РМИ, восстановленное при использовании ФН, полученной для АФР в виде функции Кравченко. Здесь же приведен модуль разности сформированного и истинного РМИ.

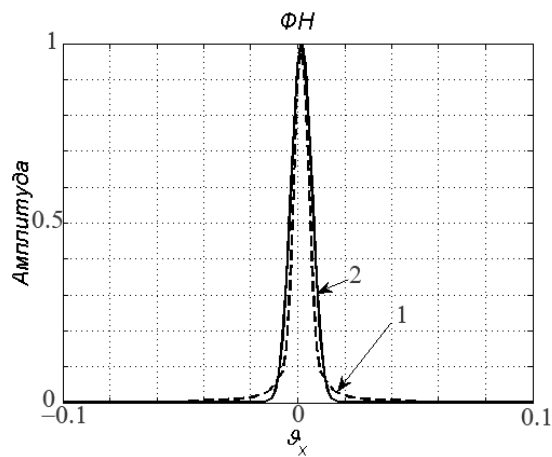


Рис. 7. Сечения ФН: для равномерной АФР (1) и АФР, взвешенной окном Кравченко $(1 - 0.01) \text{fup}_4^{0.15}(t) + 0.01$ (2)

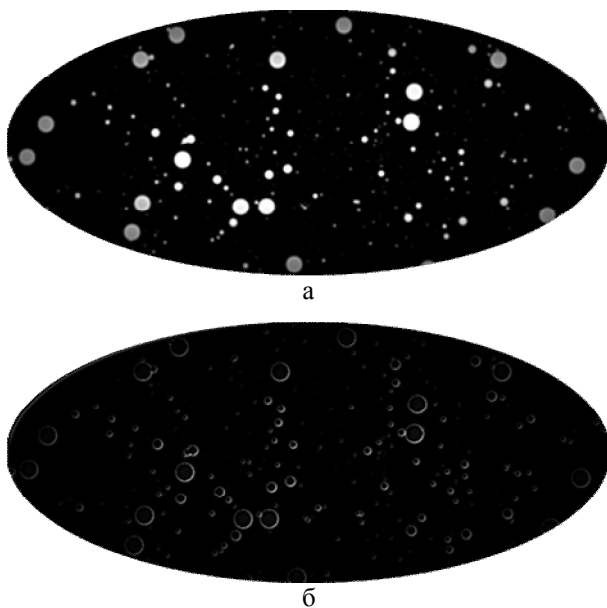


Рис. 8. Результат восстановления РМИ с использованием ФН, полученной для АФР в виде весовой функции Кравченко (а) и модуль разности этого и истинного РМИ (б)

Выводы

Впервые исследован процесс формирования РМИ в сканирующих радиометрических устройствах компенсационного типа. Показана возможность повышения качества первичных РМИ за счет

использования весовой обработки АФР поля в апертуре антенны оконными функциями (классическими и функциями Кравченко). Даны количественные оценки подобия восстановленных и истинного РМИ согласно следующим метрикам: среднемодульного отклонения, SSIM, DSSIM. Обосновывается целесообразность использования в рассматриваемых задачах весовых функций Кравченко, синтезированных согласно обобщенному алгоритму (12) с использованием атомарных функций семейства fup_N .

Список литературы

1. Павликов В.В. Статистический синтез алгоритмов восстановления радиояркого изображения в СВЧ-радиометрах сканирующего типа / В.В. Павликов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2012. – Вип. 3(14). – С. 37-41.
2. Pavlikov V.V. Optimum restoration of angular radio brightness in scanning radiometer / V.V. Pavlikov // Proc. of Conference MMET-2012, August 26-31, 2012. Kharkiv, Ukraine. – P. 333-335.
3. Волосяк В.К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко. Под ред. В.Ф. Кравченко. – М.: Физматлит, 2008. – 740 с.
4. Brunet D.E. On the mathematical properties of the structural similarity index / D. Brunet, E.R. Vrscay and Z. Wang // IEEE Transactions on Image Processing, vol. 21, no. 4, pp. 1488-1499, Apr. 2012.
5. Шифрин Я.С. Антенны / Я.С. Шифрин. – Харьков: ВИРТА им. Говорова Л.А., 1976. – 408 с.
6. Кравченко В.Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям / В.Ф. Кравченко. – М.: Радиотехника, 2003. – 512 с.
7. Kravchenko V.F. Adaptive Digital Processing of Multidimensional Signals with Applications / V.F. Kravchenko, H.M. Perez-Meana. – М.: Fizmatlit, 2009. – 360 p.
8. Кравченко В.Ф. Алгебра логики, атомарные функции и ветвления в физических приложениях / В.Ф. Кравченко, В.Л. Рвачев // – М.: Физматлит, 2006. 416 с.
9. Волосяк В.К. Весовые функции Кравченко в алгоритме модифицированного синтеза апертуры антенны / В.К. Волосяк, В.Ф. Кравченко, В.В. Павликов, академик В.И. Пустовойт // Доклады академии наук. – 2013. – Т. 449, № 4. – С. 409-413.

Поступила в редколлегию 14.03.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Зеленский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина, Харьков.

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПЕРВИННИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ У СКАНУЮЧИХ РАДІОМЕТРАХ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ТИПУ

В.В. Павліков

Досліджується можливість підвищення якості первинних радіометричних зображень, сформованих за допомогою скануючих радіометричних пристроїв компенсационного типу, за рахунок використання вагової обробки амплітудно-фазового розподілу поля в апертурі антени віконними функціями (класичними і функціями Кравченко). Для кількісної оцінки подібності відтворених і істинного зображень використані наступні метрики: середньомодульне відхилення, SSIM, DSSIM. Обґрунтовується доцільність використання в розглянутих задачах вагових функцій Кравченко, синтезованих з використанням атомарних функцій сімейства fup_N .

Ключові слова: функція невизначеності радіометричної системи, оптимальний алгоритм, скануючий радіометр компенсационного типу, радіометричне зображення.

**IMPROVEMENT OF PRIMARY RADIOMETRIC IMAGES QUALITY IN SCANNING RADIOMETERS
OF COMPENSATION TYPE**

V.V. Pavlikov

Possibility of improvement of primary radiometric images quality formed by scanning radiometric devices of compensation type with using weight processing of the field amplitude-phase distribution in the antenna aperture by window functions (classical and Kravchenko functions) is investigated. For a quantitative estimation of similarity restored and true images the following metrics are used: mean absolute error, SSIM, DSSIM. Reasonability of using Kravchenko weight functions synthesized with using atomic functions of family fup_N in the considered problems is substantiated.

Keywords: *ambiguity function of radiometric system, optimal algorithm, scanning radiometer of compensation type, radiometric image.*