

УДК 621.396:537.874.4

В. В. ПАВЛИКОВ¹, НГУЕН ВАН КИЕМ¹, Е. Н. ТИМОЩУК²¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*² *Киевская государственная академия водного транспорта им. гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Украина*

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОЦЕНКИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ С ТРЕХЭЛЕМЕНТНОЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМОЙ

Используя современные сведения о статистическом синтезе радиометрических систем (РМС), синтезирован и исследован алгоритм оптимального формирования радиометрических изображений (РМИ) с помощью трехантенной сверхширокополосной (СШП) радиометрической системы. Найдено аналитическое выражение для функции неопределенности (ФН) такой системы и приведено её моделирование для разных геометрий и использования узкополосного, многополосного и СШП входного тракта. Показано, что переход к обработке СШП и многополосных сигналов позволяет сформировать ФН с одним главным лепестком, что исключает неоднозначность восстановления РМИ.

Ключевые слова: радиометрия, сверхширокополосный радиометрический комплекс.

Введение

Радиометрические комплексы (РМК) широко применяют в дистанционном зондировании в радиоастрономии, исследовании Земли и околоземного пространства для формирования радиометрических изображений (РМИ). К таким комплексам предъявляются высокие требования к пространственной разрешающей способности и флуктуационной чувствительности. Если обеспечить высокую чувствительность, обрабатывая сверхширокополосные (СШП) радиометрические сигналы, то для формирования узконаправленных однолепестковых функций неопределенностей (ФН) необходимо использовать существенно-разреженные антенные системы. При синтезе таких систем используются новые достижения статистической теории радиометрических устройств и систем [1–4].

Продолжая исследования [5], в статье решается задача статистического синтеза СШП трехантенного РМК, обеспечивающего формирование РМИ высокого пространственного разрешения.

Формулировка задачи и начальные данные

Необходимо синтезировать алгоритм оптимального формирования РМИ путем обработки СШП радиометрических сигналов, наблюдаемых на выходах высокочастотных трактов трехэлементной антенной системы. Предполагается, что статистические характеристики сигналов и шумов известны.

Геометрия антенной системы показана на

рис. 1. Антенны A_i ($i = 1, 2, 3$), раскрывы которых ограничены областями D'_i , соединены с соответствующими высокочастотными частями приемников, частотные характеристики $\dot{K}_i(j2\pi f)$ которых, удовлетворяют условиям СШП. Высокочастотные каналы ограничивают полосу частот сигналов $s_{A_i}(t)$ на выходах антенн и вносят в наблюдения аддитивные шумы $n_i(t)$. Положение фазовых центров антенн A_i характеризуем векторами \vec{a}_i , с началом в точке с координатами $(0, 0)$. Радиус-вектор $\vec{r}'_i \in D'_i$ ($i = 1, 2, 3$) характеризует положение произвольной элементарной площадки в пределах области D'_i .

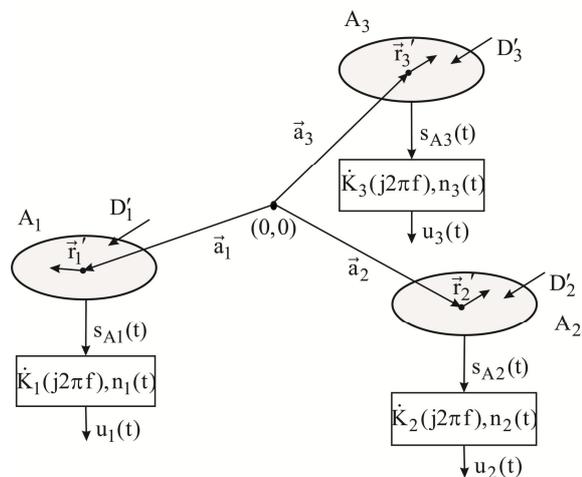


Рис. 1. Геометрия антенной системы

Исходные данные и геометрия определяют следующие модели уравнений наблюдения:

$$\vec{u}(t) = \{u_i(t)\}_{i=1}^3 = \{s_i(t) + n_i(t)\}_{i=1}^3, \quad (1)$$

где $s_i(t)$ – собственное шумовое излучение исследуемого объекта после прохождения входных цепей i -го канала приемника, $n_i(t)$ – внутренний шум приемника. Процессы $s_i(t)$, $n_i(t)$ – случайные и гауссовские с нулевым средним.

Модель полезного сигнала на выходе i -й высокочастотной части приемника запишем в виде [5]

$$s_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_f \dot{K}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \dot{K}(j2\pi f) \dot{A}(f, \vec{\vartheta}) \times \exp\{-j2\pi f(t - (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \vec{a}_i c^{-1})\} d\vec{\vartheta} df,$$

где $\dot{K}(j2\pi f)$ – частотная характеристика входных цепей приемника, $\dot{A}(f, \vec{\vartheta})$ – спектрально-угловая плотность комплексной амплитуды, для которой справедлива пространственно-частотная некоррелированность

$$\langle \dot{A}(f_1, \vec{\vartheta}_1) \dot{A}^*(f_2, \vec{\vartheta}_2) \rangle = B(f_1, \vec{\vartheta}_1) \delta(f_1 - f_2) \delta(\vec{\vartheta}_1 - \vec{\vartheta}_2),$$

$B(f_1, \vec{\vartheta}_1)$ – спектрально-угловая плотность мощности (спектральная радиояркость), $\dot{F}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0)$ – диаграмма направленности одной антенны, $\vec{\vartheta}$ – вектор направляющих косинусов, $\vec{\vartheta}_0$ – вектор направляющих косинусов для направления главного максимума диаграммы направленности антенны, f – частота, t – время,

$$C_f = \frac{f}{c} \left(\iint_{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 \leq 1} |\dot{F}(f, \vartheta_x, \vartheta_y)|^2 (1 - \vartheta_x^2 - \vartheta_y^2)^{-0.5} d\vartheta_x d\vartheta_y \right)^{-1}.$$

Матрица корреляционных функций, необходимая для решения задачи по методу максимального правдоподобия, найдена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \underline{R}(t_1 - t_2, B(f, \vec{\vartheta}')) &= \langle \vec{u}(t_1) \vec{u}^T(t_2) \rangle = \\ &= \underline{R}_s(t_1 - t_2, B(f, \vec{\vartheta}')) + \underline{R}_n(t_1 - t_2), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} R_{s,ij}(t_1 - t_2, B(f, \vec{\vartheta})) &= \langle s_i(t_1) s_j(t_2) \rangle = \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) |\dot{K}(j2\pi f)|^2 B(f, \vec{\vartheta}) \times \\ &\times \exp\{j2\pi f(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \vec{a}_{ij} c^{-1}\} d\vec{\vartheta} \exp\{-j2\pi f(t_1 - t_2)\} df, \\ & \quad i, j = 1, 2, 3, \\ \underline{R}_n(t_1 - t_2) &= \langle \vec{n}(t_1) \vec{n}^T(t_2) \rangle = \\ &= 0, 5 N_{0n} \underline{I} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 \exp\{j2\pi f(t_1 - t_2)\} df, \end{aligned}$$

где $\vec{a}_{ij} = \vec{a}_i - \vec{a}_j$ – база между i -ой и j -ой антеннами, "Т" – оператор транспонирования, \underline{I} – единичная матрица, N_{0n} – спектральная плотность мощности (СПМ) шумов.

В [5] обоснована целесообразность записи $R_{s,i=j}(t_1 - t_2, B(f, \vec{\vartheta})) = 0$.

Решение задачи

Алгоритм оптимальной оценки РМИ найдем из решения уравнения максимального правдоподобия, которое запишем в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{Spur} \int_0^{T_{\text{ob}}} \int_0^{T_{\text{ob}}} \frac{\delta \underline{R}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))}{\delta B(f, \vec{\vartheta}')} \underline{W}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}')) dt_1 dt_2 = \\ = - \int_0^{T_{\text{ob}}} \int_0^{T_{\text{ob}}} \vec{u}^T(t_1) \frac{\delta \underline{W}(t_2, t_1, B(f, \vec{\vartheta}'))}{\delta B(f, \vec{\vartheta}')} \vec{u}(t_2) dt_1 dt_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где Spur – след матрицы, T_{ob} – время наблюдения,

$\frac{\delta}{\delta B(f, \vec{\vartheta}')}$ – функциональная производная (при дифференцировании исследуем зависимость только от угловых координат и производную по частоте не вычисляем), $\underline{R}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))$ – матрица корреляционных функций наблюдений (1), $\underline{W}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))$ – матрица, обратная матрице корреляционных функций, определяемая из уравнения обращения

$$\int_0^{T_{\text{ob}}} \underline{R}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}')) \underline{W}(t_2, t_3, B(f, \vec{\vartheta}')) dt_2 = \underline{I} \delta(t_1 - t_3).$$

В спектральной области выражение (2) примет вид

$$\begin{aligned} -T_{\text{ob}} \text{Spur} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\delta \underline{G}_u(f, \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta} \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}'))}{\delta B(f, \vec{\vartheta}')} \times \right. \\ \left. \times \underline{G}_u^{-1}(f, \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta} \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}')) \right) df = \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\vec{U}_T^*(j2\pi f) \frac{\delta \underline{G}_u^{-1}(-f, \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta} \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}'))}{\delta B(f, \vec{\vartheta}')} \times \right. \\ \left. \times \vec{U}_T(j2\pi f) \right) df, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\underline{G}_u^{-1}(f, \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta} \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}'))$ – матрица, обратная матрице СПМ, определяемая из уравнения

$$\underline{G}_u(f, \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta} \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}')) \underline{G}_u^{-1}(f, \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta} \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}')) = \underline{I},$$

$\underline{\Delta} \vec{a} = \begin{vmatrix} 0 & \vec{a}_{ij} \\ \vec{a}_{ji} & 0 \end{vmatrix}$. Матрица СПМ связана с матрицей

корреляционных функций $\underline{R}(t_1 - t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))$ преобразованием Фурье

$$\begin{aligned} \underline{G}_u(f, \cdot) &= F\{\underline{R}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))\} = \\ &= \frac{1}{2} |\dot{K}|^2 \begin{vmatrix} 0 & B_{A12} & B_{A13} \\ B_{A21} & 0 & B_{A23} \\ B_{A31} & B_{A32} & 0 \end{vmatrix}, \\ \underline{G}_u^{-1}(f, \cdot) &= F\{\underline{W}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))\} = \\ &= \frac{1}{|\dot{K}|^2 \operatorname{Re} B_{A12} B_{A23} B_{A31}} \times \\ &\times \begin{vmatrix} -B_{A23} B_{A32} & B_{A13} B_{A32} & B_{A12} B_{A23} \\ B_{A23} B_{A31} & -B_{A13} B_{A31} & B_{A13} B_{A21} \\ B_{A21} B_{A32} & B_{A12} B_{A31} & -B_{A12} B_{A21} \end{vmatrix}, \end{aligned}$$

где

$$B_{Aij} = \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) B(f, \vec{\vartheta}) e^{j2\pi f \vec{\Delta} \vec{a}_{ij} c^{-1}} d\vec{\vartheta},$$

$F\{\cdot\}$ – оператор Фурье, “*” – оператор комплексного сопряжения, $A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0)$ – эффективная площадь антенны, $\vec{U}^T(j2\pi f) = \{\dot{U}_i(j2\pi f)\}_{i=1}^3$, $\dot{U}_i(\cdot) = F\{u_i(t)\}$, $i = 1, 2, 3$.

Решение уравнения (3) получено в виде

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}} \sum_{\substack{i=1 \\ j=\operatorname{mod}(i,3)+1 \\ k=\operatorname{mod}(j,3)+1}}^3 \frac{B_{Aij} B_{Ajk}}{\operatorname{Re} B_{Aij} B_{Ajk} B_{Aki}} e^{j\varphi_{ki}} df = \\ = \frac{1}{T_{\text{ob}}} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{\substack{i=1 \\ j=\operatorname{mod}(i,3)+1 \\ k=\operatorname{mod}(j,3)+1}}^3 \dot{U}_{T,k,W} \dot{U}_{T,i,W}^* e^{j\varphi_{ki}} df, \end{aligned} \quad (4)$$

где mod – деление с остатком, $\dot{U}_{T,k,W} = \sqrt{A_{\text{eff}}} B_{Aij} B_{Ajk} (|\dot{K}| \operatorname{Re} B_{Aij} B_{Ajk} B_{Aki})^{-1} \dot{U}_{T,k}$ – спектр наблюдения после обесцвечивающего фильтра. Аргументы при функциях в (4) не указаны для сокращения записи, $\varphi_{ki} = 2\pi f (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ki} c^{-1}$.

Правая часть (4) содержит все необходимые операции обработки сигналов в трехантенном СШП РМК, необходимые для формирования РМИ. Левая часть, как и в [5] – это интенсивность $\hat{I}_{A\sim}(\vec{\vartheta})$ как функция пространственных координат (направляющих косинусов).

Оптимальный алгоритм формирования РМИ

Алгоритм обработки сигналов в правой части (4) перепишем во временной области следующим образом:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{A\sim}(\vec{\vartheta}) &= \frac{1}{T_{\text{ob}}} \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{\substack{i=1 \\ j=\operatorname{mod}(i,3)+1 \\ k=\operatorname{mod}(j,3)+1}}^3 \dot{U}_{T,k,W} \dot{U}_{T,i,W}^* e^{j\varphi_{ki}} df = \\ &= \frac{1}{T_{\text{ob}}} \operatorname{Re} \sum_{\substack{i=1 \\ j=\operatorname{mod}(i,3)+1 \\ k=\operatorname{mod}(j,3)+1}}^3 \int_0^{T_{\text{ob}}} \begin{pmatrix} u_{Tk,W}(t) \times \\ \times u_{Ti,W}(t - \varphi_{ki}) \end{pmatrix} dt, \end{aligned} \quad (5)$$

где $u_{T,i,W}(t) = F\{\dot{U}_{T,i,W}\}$ – наблюдения во временной области.

На рис. 2 показана структурная схема трехантенного РМК, соответствующая алгоритму обработки сигналов (4).

Сигналы с выхода антенн A_i проходят входные тракты приемника (Вх.Тракт) с частотной характеристикой $\dot{K}(j2\pi f)$ и систему выбеливающих фильтров (Φ), работа которых предусматривает наличие априорных сведений о СПМ (из блока ДФ) и эффективной площади антенны (блок $\sqrt{A_{\text{eff}}}$). После фильтрации в один из каналов вводятся задержки (Система линейной задержки (ЛЗ)). Далее сигналы поступают на векторный перемножитель и систему интеграторов с коэффициентом усиления T_{ob}^{-1} . На выходе РМК формируется оценка интенсивности как функции угловых координат.

Функция неопределенности РМК

ФН системы найдена в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Psi(\cdot) &= \operatorname{Re} \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta}'_0 - \vec{\vartheta}_0) \times \\ &\times A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta}''_0 - \vec{\vartheta}_0) \times \\ &\times \sum_{\substack{i=1 \\ j=\operatorname{mod}(i,3)+1 \\ k=\operatorname{mod}(j,3)+1}}^3 \frac{\begin{pmatrix} e^{j2\pi f (\vec{\vartheta}'_0 - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1}} \times \\ \times e^{j2\pi f (\vec{\vartheta}''_0 - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{jk} c^{-1}} \times \\ \times e^{j2\pi f (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ki} c^{-1}} \end{pmatrix}}{\operatorname{Re} B_{Aij} B_{Ajk} B_{Aki}} df. \end{aligned}$$

На рис. 3 и 7 показаны возможные геометрии трехэлементных антенных (диаметры антенн 2 м) систем, а на рис. 4-6 и 8-10 – соответствующие им ФН, полученные моделированием:

- ФН Ψ_1 : рабочая частота $f = 1,5$ ГГц;
- ФН Ψ_2 : работа в нескольких полосах частот $[1,4-1,8]$, $[2,2-2,6]$, $[2,8-3,5]$ ГГц;
- ФН Ψ_3 : СШП диапазон частот $[1,4-3,5]$ ГГц.

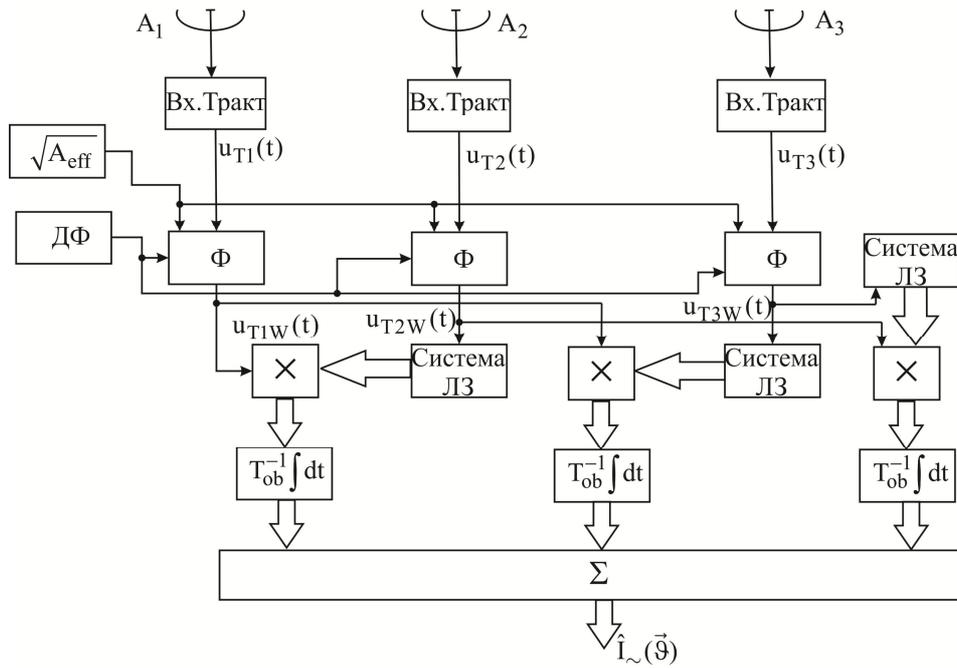


Рис. 2. Структурная схема трехантенного РМК

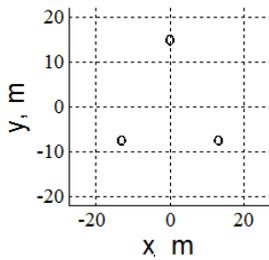


Рис. 3. Геометрия антенной решетки

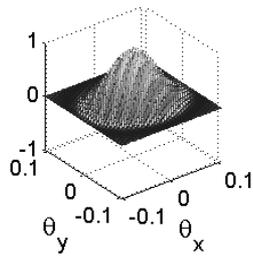


Рис. 4. ФН Ψ_1

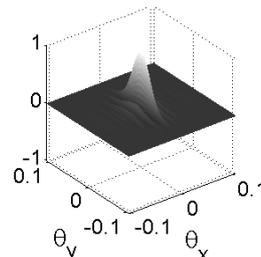


Рис. 9. ФН Ψ_2

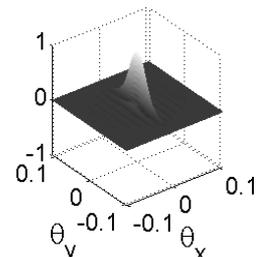


Рис. 10. ФН Ψ_3

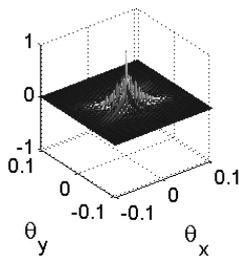


Рис. 5. ФН Ψ_2

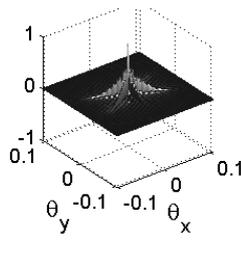


Рис. 6. ФН Ψ_3

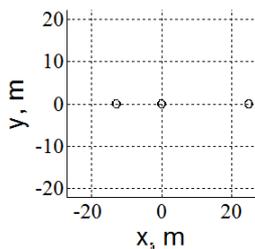


Рис. 7. Геометрия антенной решетки

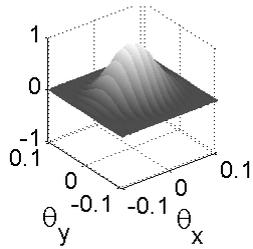


Рис. 8. ФН Ψ_1

Из анализа рис. 4–6 и 8–10 следует, что в многополосном и СШП РМК с тремя антеннами вид ФН существенно зависит от геометрии антенной системы. При линейном расположении антенн наблюдается высокое разрешение только в плоскости, ортогональной линии базы, в плоскостном расположении вычленяется узкий главный лепесток.

Выводы

Синтезирован и исследован алгоритм оптимального формирования РМИ с помощью трехантенных сверхширокополосных РМК. Получено аналитическое выражение для функции неопределенности РМК и приведен пример её моделирования. Показано, что в СШП РМК отсутствует неоднозначность угловых измерений.

Литература

1. Волосюк, В. К. *Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко ; под общ. ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с.*

2. *Статистическая теория сверхширокополосных радиометрических устройств и систем [Текст] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко, Б. Г. Кутуза, В. В. Павликов, В. И. Пустовойт // Физические основы приборостроения. – 2014. – Т. 3, № 3. – С. 5–65.*

3. *Review of modern algorithms for high resolution imaging with passive radar [Text] / V. K. Volosyuk, V. F. Kravchenko, B. G. Kutuza, and V. V. Pavlikov // Antenna theory and techniques.*

ICATT'2015 : proc. of the X Intern. conf., Apr. 21–24 2015. – Kharkiv, Ukraine. 2015. – P. 45-50.

4. *Optimal signal processing for radiometric imaging with multi-antenna & multi-band passive radars [Text] / V. V. Pavlikov, S. S. Zhyla, Nguen Van Kiem and O.V. Odokienko // Antenna theory and techniques. ICATT'2015 : proc. of the X Intern. conf., Apr. 21–24, 2015. – Kharkiv, Ukraine, 2015. – P. 179-181.*

5. *Нгуен, Ван Кiem Оптимальная оценка радиояркостности протяженного источника радиотеплового излучения в двухантенной сверхширокополосной радиометрической системе [Текст] / Нгуен Ван Кiem, О. М. Тимошук // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2015. – № 4 (74). – С. 13–18.*

Поступила в редакцию 29.10.2015, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ОЦІНКИ РАДІОМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ В НАДШИРОКОСМУГОВИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ З ТРИЕЛЕМЕНТНОЮ АНТЕННОЮ СИСТЕМОЮ

В. В. Павліков, Нгуєн Ван Кієм, О. М. Тимошук

Використовуючи сучасні відомості про статистичний синтез радіометричних систем (РМС), синтезовано і досліджено алгоритм оптимального формування радіометричних зображень (РМЗ) за допомогою триантенних надширокосмугових (НШС) радіометричних комплексів. Знайдено аналітичний вираз для функції невизначеності (ФН) такої системи і приведено її моделювання для різних геометрій при використанні вузькосмугового, багатосмугового і НШС вхідного тракту. Показано, що перехід до обробки НШС і багатосмугових сигналів дозволяє сформувати ФН з однією головною пелюсткою, що виключає неоднозначність відновлення РМЗ.

Ключові слова: радіометрія, надширокосмуговий радіометричний комплекс.

SYNTHESIS OF OPTIMAL ESTIMATION ALGORITHM OF RADIOMETRIC IMAGES IN ULTRA-WIDEBAND RADIOMETRIC COMPLEX WITH THREE-ELEMENT ANTENNA SYSTEM

V. V. Pavlikov, Nguyen Van Kiem, E. N. Tymoshchuk

Using modern statistical information on the synthesis of radiometric systems (RMS), optimal algorithm for the formation of radiometric imaging (RMI) with the three-antenna ultra-wideband (UWB) radiometric system is synthesized and investigated. Analytical expression for the system ambiguity function (AF) is derived and examples of its simulation for different geometries is shown and the use of narrow-band, multi-band, UWB of the input path. It is shown that UWB and multiband signal processing allows to form AF with one main lobe.

Keywords: radiometry, ultra-wideband radiometric complex.

Павликов Владимир Владимирович – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., заведующий каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина

Нгуен Ван Кiem – аспирант каф. проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kiemxai@gmail.com.

Тимошук Елена Николаевна – канд. экон. наук, доцент, Киевская государственная академия водного транспорта им. гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Киев, Украина