

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

*В.К. ВОЛОСЮК, В.Ф. КРАВЧЕНКО, В.В. ПАВЛИКОВ, Е.Н. ТИМОЩУК*

Посвящается глубокоуважаемому ученому и наставнику, исключительно порядочному, чуткому и толерантному Якову Соломоновичу Шифрину, ко дню его 95-летнего юбилея с сердечными пожеланиями здоровья и долгих лет жизни, быть всегда вдохновленным и вдохновлять других.

Обобщаются результаты исследований по статистической теории синтеза сверхширокополосных пространственно-распределенных радиометрических систем высокого пространственного разрешения. Рассмотрены предпосылки возможности формирования радиометрических изображений высокого разрешения и математический аппарат пространственно-временных и пространственно-частотных  $V$ -преобразований, используемый для решения задач сквозного синтеза сверхширокополосных систем. Синтезирован алгоритм оптимальной обработки сверхширокополосных пространственно-временных сигналов и исследованы его потенциальные характеристики. Разработана обобщенная структурная схема  $M$  антенной радиометрической системы и исследованы её функции неопределенности для разных геометрий антенных решеток при использовании сверхширокополосного, многополосного и узкополосного входного тракта.

*Ключевые слова:* статистическая теория радиометрических систем, системы высокого пространственного разрешения, апертурный синтез, многополосные системы.

### ВВЕДЕНИЕ

Радиометрические системы с пространственно-распределенными антенными решетками и корреляционной обработкой пространственно-временных сигналов применяются для формирования изображений в дистанционном зондировании Земли и радиоастрономии. Теоретические основы построения таких систем разработаны ещё в середине XX века, но фундаментальная значимость этой теории была осознана несколько позже в радиоастрономии [1], где проблему формирования радиометрических изображений высокого пространственного разрешения невозможно было решить без использования радиоинтерферометрических систем. В основе разрабатываемых в то время алгоритмов обработки пространственно-временных сигналов лежала теорема Ван Циттерта-Цернике [2, 3]. Выведенные на её основе алгоритмы получили название “методы апертурного синтеза”, а системы, реализующие эти методы, – системы апертурного синтеза. Наиболее точное определение систем апертурного синтеза дано в [4, с. 53; 5, с. 138] – «это неэквидистантные пространственно-распределенные антенные системы с кросскорреляционной и пространственно-спектральной обработкой сигналов, предназначенные для формирования радиометрических изображений с высоким разрешением».

Эффективность эвристических алгоритмов подтвердилась во второй половине XX века новыми результатами [6, 7], полученными в результате статистического синтеза радиометрических систем апертурного синтеза. Решенные задачи значительно развили методики расчета предельных погрешностей оценок параметров радиотеплового излучения, полученных с использованием метода апертурного синтеза.

Общим для эвристического и статистического методов синтеза оставалось решение задач с использованием квазимонохроматического приближения (КМП) [7]. В значительной мере этому способствовали узкополосная радиоэлементная база и сложности решения интегральных уравнений, содержащих произведения пространственных и временных частот (т.н. «проблема разделения пространственных и временных частот»).

Традиционный узкополосный подход применяется и в настоящее время при создании систем дистанционного зондирования Земли [8–10]. Несмотря на простоту синтеза алгоритмов и доступность узкополосной элементной базы, такое ограничение приводит к необходимости существенного усложнения антенных систем. В частности, получение однозначных (по пространственным координатам) оценок параметров объектов и сред требует создания сложных геометрий антенных решеток, обеспечивающих (при заданной рабочей длине волны) равномерное заполнение области пространственной спектральной чувствительности радиометрической системы. Последняя связана с функцией неопределенности системы и, соответственно, определяет основные характеристики направленности системы в целом.

Перспективы обработки широкополосных и сверхширокополосных (СШП) сигналов для формирования радиометрических изображений отмечены в [4–6, 11–15]. В [4, 5, 16, 17] показаны возможности упрощения геометрии антенных решеток в случае перехода к обработке СШП пространственно-временных сигналов. Постановка и решение таких задач стали возможны благодаря преодолению отмеченных выше проблем – современная промышленность производит сверхширокополосные радиоэлек-

тронные узлы и блоки, а математический аппарат  $V$ -преобразований [11–15] позволяет решать задачи сквозного синтеза сверхширокополосных систем.

Решение задач сквозного синтеза системы предполагает получение ответов на комплекс следующих взаимосвязанных вопросов [4, 11, 18–21]:

- разработка уравнений наблюдений и анализ их статистических характеристик;
- решение задачи статистического синтеза и вывод алгоритмов оптимальной и квазиоптимальной обработки сигналов с последующей их физической интерпретацией;
- разработка соответствующей алгоритму структурной схемы;
- исследование потенциальных характеристик алгоритма и системы;
- установление связей между оценками параметров радиотеплового излучения и параметрами излучающего объекта;
- поиск условий оптимального проведения эксперимента (углов визирования, частот настройки системы и т.д.).

В работе обобщаются полученные ранее и приводятся новые результаты, развивающие статистическую теорию радиометрических систем с многоэлементными антенными решетками в направлении формирования изображений высокого пространственного разрешения за счет обработки сверхширокополосных и многополосных пространственно-временных сигналов.

### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ. $V$ -ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

При решении широкого класса задач дистанционного зондирования и радиоастрономии возникает проблема применимости теоремы Ван Циттерта-Цернике, связывающей взаимную корреляционную функцию комплексно-сопряженных пространственно-временных случайных процессов (функцию взаимной когерентности) со спектральной яркостью источника излучения, совпадающей (или близкой) с математическим определением спектральной плотности, заданной теоремой Хинчина-Винера. Проблема заключается в невозможности разделения пространственных и временных частот в показателях экспонент. Только при выполнении КМП формулы, соответствующие теореме Ван Циттерта-Цернике, можно рассматривать как преобразования Фурье или Френеля. В общем случае, когда условия КМП не выполняются, связь пространственно-временных полей и их корреляционных функций с соответствующими спектральными характеристиками устанавливается согласно  $V$ -преобразованиям. Эти преобразования обобщают преобразования Фурье, Френеля, Лапласа

и Ганкеля на случай спектрального анализа широкополосных и СШП волновых полей.

Рассмотрим структуру пространственно-временного поля радиотеплового излучения вблизи антенной решетки. Для этого представим геометрию задачи в виде, показанном на рис. 1.

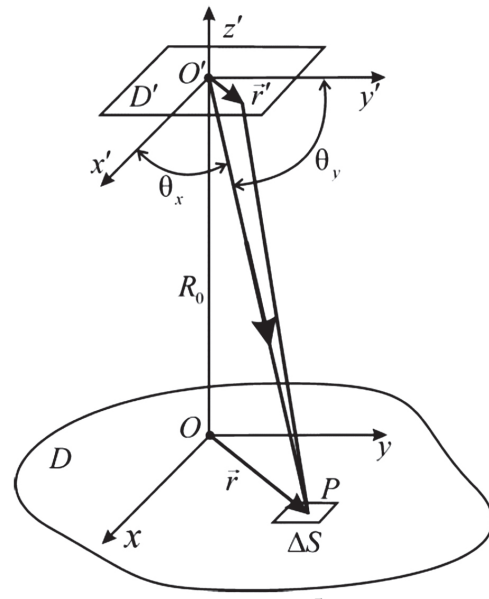


Рис. 1. Взаимное расположение области регистрации поля – апертуры антенны ( $\vec{r}' = (x', y') \in D'$ ) и элемента излучения  $\Delta S$  поверхности ( $\vec{r} = (x, y) \in D$ )

На рис. 1  $D$  – область излучения поля. Источник излучения плоский или условно приведенный к плоскости. Положение излучающих элементов характеризуется направляющими косинусами  $\vec{\vartheta} = (\vartheta_x = \cos\theta_x, \vartheta_y = \cos\theta_y)$ , а их излучающая способность – функцией

$$\dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \exp\{j2\pi f t\} d f d \vec{\vartheta}, \quad (1)$$

где  $\dot{A}(\vec{\vartheta}, f)$  – спектрально-угловая плотность комплексной амплитуды (по переменной определены так же, как и спектральная плотность в теории преобразований Фурье для функций одной переменной  $t$ ).

Поле излучения регистрируется элементами плоскости  $D'$  через некоторый промежуток времени  $t_3 = R(r, r')/c$ , обусловленный запаздыванием волн на расстоянии  $R$  при их распространении со скоростью  $c$  от элемента излучения с координатами  $\vec{r}$  до регистрирующего элемента с координатами  $\vec{r}' = (x', y') \in D'$ , т.е.

$$R(\vec{r}, \vec{r}') = \sqrt{R_0^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2}. \quad (2)$$

Если область регистрации поля  $D'$  сравнительно невелика и находится в дальней зоне, так что лучи  $O'P$  и  $\vec{r}'P$  практически параллельны (зона Фраунгофера), то

$$R[\vec{r}(\vec{\vartheta}), \vec{r}'] \approx R[\vec{r}(\vec{\vartheta}), O'] - \vec{\vartheta} \vec{r}',$$

где  $\vec{\vartheta} \vec{r}' = \vartheta_x x' + \vartheta_y y'$  – скалярное произведение векторов.

Суммарное вещественное поле, регистрируемое элементом поверхности  $D'$  в точке  $\vec{r}'$ , запишем как интегральный результат излучения всех элементов источника с координатами  $\vec{\vartheta} \in \Theta$

$$s(\vec{r}', t) = \text{Re} \int \int_{\Theta_0} R^{-1}[\vec{r}(\vec{\vartheta}), \vec{r}'] \dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \times \exp\{j2\pi f[t - R(\vec{r}, O')c^{-1} + \vec{\vartheta}\vec{r}'c^{-1}]\} df d\vec{\vartheta} \approx \text{Re} \int \int_{\Theta_0} R^{-1}[\vec{r}(\vec{\vartheta}), \vec{r}'] \dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \times \exp\{j2\pi f[t - R(\vec{r}, O')c^{-1} + \vec{\vartheta}\vec{r}'c^{-1}]\} df d\vec{\vartheta}, \quad (3)$$

где  $d\vec{\vartheta} = d\vartheta_x d\vartheta_y$ .

Множитель  $\exp\{-j2\pi fc^{-1}R(\vec{r}, O')\}$  в (3) не определен, так как расстояние  $R(\vec{r}, O')$  с точностью до длины волны неизвестно. Его можно включить в функцию  $\dot{A}(\cdot)$ , т. к. в конечном итоге обычно находят не ее комплексные значения, а модуль или средний квадрат модуля. Для упрощения множитель ослабления  $R^{-1}[\vec{r}(\vec{\vartheta}), O']$  также включаем в функцию  $\dot{A}(\cdot)$ . Тогда регистрируемое поле представим в следующем виде:

$$s(\vec{r}', t) = \text{Re} \int \int_{\Theta_0} \dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \exp\{j2\pi f[t + c^{-1}\vec{\vartheta}\vec{r}']\} df d\vec{\vartheta}. \quad (4)$$

При выполнении КМП в бесконечных пределах интегрирования (4) может быть сведено к трехмерному преобразованию Фурье. В полученном виде (4) его форма отличается от классических представлений многомерных преобразований Фурье, т.е. в виде разложений функций по комплексным экспонентам. Это отличие заключается в том, что одна из переменных  $f$  есть сомножитель при других переменных. В данном случае временные частоты  $f$  – сомножители пространственных частот  $c^{-1}\vec{r}'$ .

**Преобразования  $V_F, V_F^{-1}$ .** Как и в теории преобразований Фурье, распространим спектральную функцию  $\dot{A}(\vec{\vartheta}, f)$  в отрицательную область переменной  $f$ ,  $\dot{A}(\vec{\vartheta}, f) = \dot{A}^*(\vec{\vartheta}, -f)$ , уменьшив ее в два раза по абсолютному значению. Внутренний интеграл в (4) по этой переменной, а, следовательно, и функция  $s(\vec{r}', t)$  станут вещественными. Учитывая, что область определения функции  $\dot{A}(\cdot)$  по переменной  $\vec{\vartheta}$  есть круг  $\vec{\vartheta}_x^2 + \vec{\vartheta}_y^2 \leq 1$ , распространим формально пределы интегрирования на  $\pm\infty$ . В результате получим два взаимно обратимых преобразования  $V_F^{-1}$  и  $V_F$  [11–13]:

$$s(\vec{r}', t) = V_F^{-1}[\dot{A}(\vec{\vartheta}, f)] = \int \int_{-\infty}^{\infty} \dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \exp\{j2\pi f[t \pm c^{-1}\vec{\vartheta}\vec{r}']\} df d\vec{\vartheta}, \quad (5) f^{-2}c^2 \dot{A}(\vec{\vartheta}, f) = V_F[s(\vec{r}', t)] = \int \int_{-\infty}^{+\infty} u(\vec{r}', t) \exp\{-j2\pi f(t \pm c^{-1}\vec{\vartheta}\vec{r}')\} dt d\vec{r}'.$$

Знаки “ $\pm$ ” принципиального значения не имеют, т. к. на обратимость преобразований не влияют.

Полученная пара  $V_F, V_F^{-1}$ -преобразований, как и их разновидности [11] ( $V_{\Phi 1}, V_{\Phi 1}^{-1}, V_{\Phi 2}, V_{\Phi 2}^{-1}$ ) и модификации [11, 20] ( $V_{FL}, V_{FL}^{-1}, V_{\Phi L}, V_{\Phi L}^{-1}$ ) в технических приложениях (например, в радиоастрономии, спектроскопии, гидроакустике) используются при исследовании широкополосных и СШП пространственно-временных процессов и систем, в частности, при исследовании свойств и способов формирования изображений различных источников излучений.

## 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОЛЕЗНЫХ СИГНАЛОВ, ШУМОВ И УРАВНЕНИЙ НАБЛЮДЕНИЯ. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАБЛЮДЕНИЙ

Источник информации в радиометрических системах – пространственно-временное поле  $s(t, \vec{r}')$  (4). Для разработки моделей уравнений наблюдения необходимо определиться с антенной системой. Предположим, что антенная решетка радиометрической системы состоит из  $M$  антенн (рис. 2).

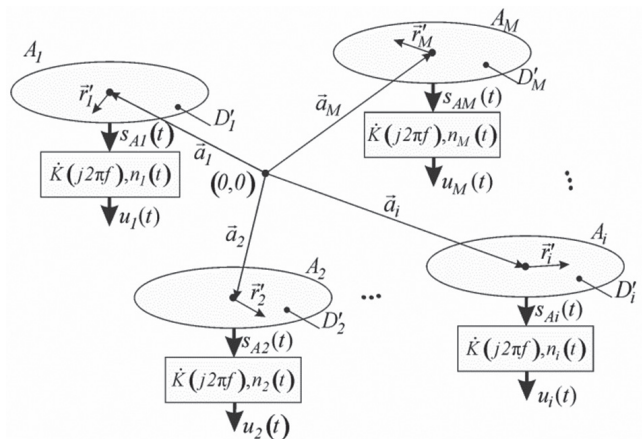


Рис. 2. Геометрия антенной решетки

Фазовый центр решетки расположен в точке  $(0,0)$ . Апертура  $i$ -й антенны  $A_i$  ( $i=1,2,..M$ ) ограничена областью  $D'_i$ , а положение её фазового центра будем характеризовать вектором  $\vec{a}_i$ . Положение точек в пределах области  $D'_i$  характеризуем радиус-вектором  $\vec{r}'_i$ .

Поле  $s(t, \vec{r}')$  на выходе каждой антенны преобразуется в сигнал  $s_{Ai}(t)$ . Воздействие  $i$ -й антенны на поле представим в виде прохождения  $s(t, \vec{r}')$  через пространственный фильтр, характеризуемый амплитудно-фазовым распределением (АФР) вида

$$i(f, \vec{\vartheta}_0, \vec{r}'_i) = I_a(f, \vec{r}'_i) \exp\left(-j2\pi f \frac{\vec{\vartheta}_0 \vec{r}'_i}{c}\right), \quad (6)$$

где экспоненциальный множитель обеспечивает фокусировку главного лепестка ДН антенны на направление, заданное вектором направ-



ляющих косинусов  $\vec{\vartheta}_0$ ,  $I_a(f, \vec{r}') = C_f I(f, \vec{r}')$  – амплитудное распределение антенны (амплитудная чувствительность точек раскрыва антенны на частоте  $f$ ),  $C_f = [\eta_A \Omega_{eff}(f)]^{-0.5} f c^{-1}$ ,  $\eta_A$  – коэффициент полезного действия антенны (в случае отсутствия омических потерь в антенне и согласованной нагрузке  $\eta_A = 1$ ),  $\Omega_{eff}(f) = \iint_{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 \leq 1} |\dot{F}(f, \vartheta_x, \vartheta_y)|^2 \frac{d\vartheta_x^2 d\vartheta_y^2}{\sqrt{1 - \vartheta_x^2 - \vartheta_y^2}}$  – эффективный телесный угол антенны. Амплитудное распределение поля в апертуре антенны  $I(f, \vec{r}')$  необходимо выбирать в виде спадающих к краям апертуры функций. В [22–26] отмечена целесообразность использования в качестве амплитудных распределений весовых функций Кравченко, разработанных на основе атомарных функций.

С выхода  $i$ -й антенны сигнал  $s_{Ai}(t)$  поступает на вход додетекторной части  $i$ -го канала приемника, характеризуемого передаточной характеристикой  $\dot{K}(j2\pi f)$ . В работе рассматриваются следующие ограничения на вид передаточной характеристики:

– передаточная характеристика удовлетворяет условию широко- или сверхширокополосности (показатель широкополосности [27]  $0,1 < \mu = \Delta F f_0^{-1} < 2$ , где  $\Delta F$ ,  $f_0$  – ширина и центральная частота рабочей полосы частот канала);

– передаточная характеристика многополосная [28–30], т.е.  $\dot{K}(j2\pi f) = \bigcup_{l=1}^L \dot{K}_l(j2\pi f)$ , где  $L$  – количество полос;

– передаточная характеристика узкополосная (показатель широкополосности  $\mu < 0,1$ ).

Кроме ограничения спектра сверхширокополосного по своей природе полезного сигнала, в додетекторной части сигнал смешивается с внутренними шумами  $n_i(t)$ .

Отмеченное выше позволяет записать модель вектора уравнения наблюдения в следующем виде:

$$\vec{u}(t) = \vec{s}(t) + \vec{n}(t) + \vec{n}_r(t), \quad (7)$$

где  $\vec{u}^T(t) = \|u_1(t), u_2(t), \dots, u_M(t)\|$ , « $T$ » – оператор транспонирования,

$\vec{s}^T(t) = \|s(t - t_3(a_1, \vec{\vartheta}_0)), \dots, s(t - t_3(a_M, \vec{\vartheta}_0))\|$  – вектор полезных сигналов на выходах  $M$  элементной антенной решетки, отличающихся на время запаздывания  $t_3(a_i, \vec{\vartheta}_0)$  относительно фазового центра решетки,  $\vec{n}^T(t) = \|n_1(t), n_2(t), \dots, n_M(t)\|$  – вектор внутренних шумов  $M$  каналов приемника,  $\vec{n}_r^T(t) = \|n_{r,1}(t), n_{r,2}(t), \dots, n_{r,M}(t)\|$  – вектор регуляризирующих добавок [11], исключающих сингулярные решения интегральных уравнений. В (7) модель полезного сигнала представим с учетом (5), (6) так

$$s(t - t_3(a_i, \vec{\vartheta}_0)) = V_F^{-1} \left[ \dot{A}(\vec{\vartheta}, f) \dot{K}(j2\pi f) I_a(f, \vec{r}_i') \times \exp\{-j2\pi f(\vec{\vartheta}_0 \vec{r}_i' + \vec{a}_i) c^{-1}\} \right], \quad (8)$$

где  $V_F^{-1}[\cdot]$  – оператор обратного преобразования Волосюка (см. (5)).

В (7)  $s_i(t)$ ,  $n_i(t)$ ,  $n_r(t)$  взаимно независимые гауссовские шумы.

Матрицу корреляционных функций наблюдений найдем в виде

$$\underline{R}(\cdot) = \langle \vec{u}(t_1) \vec{u}^T(t_2) \rangle = \underline{R}_s(\cdot) + \underline{R}_n(\cdot) + \underline{R}_r(\cdot), \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{R}_s(t_1 - t_2, B(\vec{\vartheta}')) &= \langle \vec{s}(t_1) \vec{s}^T(t_2) \rangle = \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 \exp\{j2\pi f(t_1 - t_2)\} \times \\ &\times \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff}(f, \vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0) B(\vec{\vartheta}') \dot{E}(j2\pi f, \vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta \vec{a}'}) d\vec{\vartheta}' df, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_n(t_1 - t_2) &= \langle \vec{n}(t_1) \vec{n}^T(t_2) \rangle = \\ &= 0,5 N_{0n} \underline{I} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 \exp\{j2\pi f(t_1 - t_2)\} df, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \underline{R}_r(t_1, t_2) &= \langle \vec{n}_r(t_1) \vec{n}_r^T(t_2) \rangle = \\ &= 0,5 N_{0r,a} \delta(t_1 - t_2) \underline{I} + 0,5 N_{0r,b} \delta(t_1 - t_2). \end{aligned} \quad (12)$$

В выражениях (10)–(12) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} \dot{E}(j2\pi f, \vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0, \underline{\Delta \vec{a}'}) &= \\ &= \exp \left\{ j2\pi f(\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0) \begin{bmatrix} 0 & \vec{a}'_1 - \vec{a}'_2 & \dots & \vec{a}'_1 - \vec{a}'_M \\ \vec{a}'_2 - \vec{a}'_1 & 0 & \dots & \vec{a}'_2 - \vec{a}'_M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{a}'_M - \vec{a}'_1 & \vec{a}'_M - \vec{a}'_2 & \dots & 0 \end{bmatrix} c^{-1} \right\}, \end{aligned}$$

$B(\vec{\vartheta}')$  – радиояркость (искомое РМИ),  $0,5 N_{0n}$  – двухсторонняя СПМ внутренних шумов приемника,  $0,5 N_{0r}$  – двухсторонняя СПМ регуляризирующего шума (предполагается, что  $N_{0n} \gg N_{0r}$ ),  $A_{eff}(f, \vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0)$  – эффективная площадь антенны [31],  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция,  $\underline{I}$  – единичная матрица размерности  $M \times M$ ,  $\langle \cdot \rangle$  – оператор статистического усреднения.

При выводе (10) учтены статистические свойства спектрально-угловой плотности комплексной амплитуды [6, 7, 11] радиотеплового излучения

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

где  $B(f_1, \vec{\vartheta}_1)$  – спектрально-угловая плотность мощности, рассматриваемая в работе как гиперспектральное РМИ,  $\delta(\cdot)$  – дельта-функция, « $*$ » – символ комплексного сопряжения. Далее в работе зависимостью  $B(f, \vec{\vartheta})$  от частоты пренебрежем. Это предположение не существенно, т.к. под радиометрическим изображением, формируемым оптимальным образом, будем понимать зависимость радиояркости от угловых координат, т.е.  $B(\vec{\vartheta})$ . Предположение оправдано и в силу теоремы о среднем [32].

### 3. СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОПТИМАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Постановку задачи статистического синтеза радиометрических систем формирования изображений высокого пространственного разрешения сформулируем следующим образом. По вектору наблюдений  $\vec{u}(t)$  на выходах высокочастотных частей приемника радиометрической системы, высокочастотный тракт которой задан передаточной характеристикой  $K(j2\pi f)$ , необходимо дать оптимальную оценку радиометрического изображения  $B(\vec{\vartheta})$  – усредненной по частотам радиояркости, как функции пространственных координат. Ограничения на передаточную характеристику введены в п. 2.

Априорные сведения, рассмотренные в п. 2, позволяют решить поставленную задачу методом максимального правдоподобия [33]. В [11] изложены принципы формирования функционалов правдоподобия для гауссовых коррелированных и некоррелированных случайных процессов и пространственно-временных полей. Функционал правдоподобия для стохастических моделей принимаемых сигналов запишем в виде [11]

$$p(\vec{u}(t) | B(\vec{\vartheta}')) = k(B(\vec{\vartheta}')) \times \exp\left\{-\frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \vec{u}^T(t_1) \underline{W}(t_1, t_2, B(\vec{\vartheta}')) \vec{u}(t_2) dt_1 dt_2\right\}, \quad (13)$$

где  $k(B(\vec{\vartheta}'))$  – функция, зависящая от оцениваемого параметра  $B(\vec{\vartheta}')$ ,  $\underline{W}(t_1, t_2, B(\vec{\vartheta}'))$  – матрица, обратная матрице корреляционных функций (9).

Синтез оптимального алгоритма формирования радиометрического изображения предполагает решение уравнения правдоподобия

$$\left. \frac{\delta \ln p(\vec{u}(t) | B(\vec{\vartheta}'))}{\delta B(\vec{\vartheta})} \right|_{\hat{B}(\vec{\vartheta})=B_{\text{ист}}(\vec{\vartheta})} = 0, \quad (14)$$

где  $\frac{\delta}{\delta B(\vec{\vartheta})}$  – оператор функционального дифференцирования,  $\hat{B}(\vec{\vartheta})$  – оценка радиояркости изображения,  $B_{\text{ист}}(\vec{\vartheta})$  – истинное радиоярковое изображение.

В [11] доказано, что (14) может быть представлено в следующем виде:

$$-\frac{1}{2} \text{Spur} \int_0^T \int_0^T \frac{\delta \underline{R}(t_1, t_2, B(\vec{\vartheta}'))}{\delta B(\vec{\vartheta})} \underline{W}(t_1, t_2, B(\vec{\vartheta}')) dt_1 dt_2 - \frac{1}{2} \int_0^T \int_0^T \vec{u}^T(t_1) \frac{\delta \underline{W}(t_1, t_2, B(\vec{\vartheta}'))}{\delta B(\vec{\vartheta})} \vec{u}(t_2) dt_1 dt_2 = 0, \quad (15)$$

где  $\text{Spur}$  – след матрицы.

Дальнейшее решение (15) трудоемко и требует введения дополнительных ограничений. В предположении стационарности полезных и

шумовых процессов алгоритм оптимальной обработки сигналов примет вид [5, 17, 29]

$$\hat{B}(\vec{\vartheta}_0) = \left\{ T^{-1} \sum_{i=1}^M \int_0^T u_{fd,i}^2(t) dt - P_{n\Sigma} \right\}_I + \left\{ 2T^{-1} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \int_0^T u_{sd,j}(t) \times \left[ \times u_{sd,i} [t - (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1}] dt - P_{nb} \right] \right\}_{II}, \quad (16)$$

где  $T$  – время наблюдения,  $\Delta \vec{a}_{ij} = a_i - a_j$ ,  $\hat{B}(\vec{\vartheta}_0)$  – оценка радиометрического изображения в направлении, характеризуемом вектором направляющих косинусов  $\vec{\vartheta}_0$ ,  $u_{fd,i}(t)$ ,  $u_{sd,j}(t)$  – наблюдения, прошедшие додетекторную часть приемника, а также согласованные и декоррелирующие фильтры первого и второго типов,  $P_{n\Sigma}$  – мощность внутренних шумов компенсационных приемников системы,  $P_{nb}$  – мощность внутренних шумов кросскорреляционно-компенсационных приемников радиометрической системы. Структура согласованных и декоррелирующих фильтров подробно исследована в [34]. Такие фильтры расширяют входную полосу додетекторной части приемника пропорционально отношению сигнал/шум и, как это будет показано ниже, улучшают флуктуационную чувствительность системы.

Алгоритм (16) содержит две составляющих, соответствующих двум типам обработки сигналов: компенсационную (см. скобки  $\{\}_I$  в (3)) и кросскорреляционно-компенсационную (см. скобки  $\{\}_{II}$  в (3)). Компенсационная составляющая  $\{\}_I$  алгоритма (16) содержит следующие операции: сигналы с выхода каждой  $i$ -й антенны проходят додетекторную часть, согласованный и декоррелирующий фильтры, квадратичный детектор, интегратор, усилитель в  $T^{-1}$  раз, сумматор, объединяющий оценки мощности с выходов  $M$  каналов. Компенсация мощности внутренних шумов  $P_{n\Sigma}$  выполняется на этапе калибровки системы.

Кросскорреляционно-компенсационная  $\{\}_{II}$  составляющая алгоритма (16) предполагает кросскорреляционную обработку сигналов с выходов различных пар антенн и прошедших согласованный и декоррелирующий фильтры и линии задержек, компенсирующих взаимный сдвиг фаз. Выходы всех пар корреляторов объединяются, образуя радиоинтерферометрическую систему с  $(M^2 - M)/2$  базами.

Структурная схема, удовлетворяющая алгоритму (16), показана на рис. 3. На схеме введены следующие обозначения: БУА – блок управления направлением антенн;  $A_i$  –  $i$ -я антенна; ЛЧП – линейная часть приемника (передаточная характеристика ЛЧП задана функцией  $K(j2\pi f)$ ;  $h_f(t)$ ,  $h_s(t)$  – импульсные характеристики блоков, реализующих согласованную и декоррелирующую фильтрацию первого и второго типа; КД – квадратичный детектор; ЛЗ – линия задержки;  $\times$  – ум-

ножитель;  $T^{-1} \int dt$  – интегратор с усилителем в  $T^{-1}$  раз;  $\Sigma$  – сумматор; РУ – регулятор уровня (компенсирует мощность внутренних шумов, оцененную на этапе калибровки);  $\triangleright$  – усилитель.

Приведенная схема формирует радиояркое изображение с углового направления, заданного вектором направляющих косинусов  $\vec{\vartheta}_0$ . Изображение в заданном секторе углов формируют сканированием диаграммой направленности или созданием веера лучей и многоканальной обработки.

Предельная погрешность оценки найдена в виде

$$\sigma_{B(\vec{\vartheta}_0)}^2 = T^{-1} \Psi^{-1}(\cdot) \Big|_{\vec{\vartheta}=\vec{\vartheta}_0}, \quad (17)$$

где

$$\Psi(\cdot) = 0,5 \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} df \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^4 \times \\ \times A_{eff}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) A_{eff}(f, \vec{\vartheta}^* - \vec{\vartheta}_0) \times \\ \times \exp(j2\pi f (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}^*) \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1}) \times \quad (18)$$

$$\times \left[ \left[ \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2 + \mu_{ij}^{-1}(f) \right] \int_{-\infty}^{\infty} B(\vec{\vartheta}') \times \right. \\ \left. \times A_{eff}(f, \vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0) \exp[j2\pi f (\vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1}] d\vec{\vartheta}' \right]^{-2}$$

– функция неопределенности радиометрической системы, зависящая от отношения сигнал/шум  $\mu$ , формы амплитудно-частотной характеристики рабочей полосы частот, эффективной площади антенны  $A_{eff}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0)$ , геометрии решетки, числа  $M$  антенн в решетке.

Потенциальная флуктуационная чувствительность определена согласно методике [35] в виде

$$\Delta B_{\min}(\vec{\vartheta}_0) = T^{-0,5} \Psi^{-0,5}(\cdot) \Big|_{\vec{\vartheta}=\vec{\vartheta}_0}. \quad (19)$$

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Функция неопределенности (18) радиометрической системы влияет на потенциальные характеристики (17), (19) и, соответственно, на качество формируемого радиометрического изображения. Исследование функции неопределенности требует конкретизации параметров радиометрической системы – рабочего диапазона длин волн, геометрии антенной решетки, формы апертуры каждой отдельной антенны в решетке, отношения сигнал/шум. Приведем примеры использования теоретических результатов к синтезу системы с заданными характеристиками направленности.

Пусть требуется разработать радиометрическую систему, обеспечивающую формирование РМИ с линейным пространственным разрешением не хуже  $\Delta l = 5$  км на расстоянии  $R = 750$  км. Уровень боковых лепестков функции неопределенности радиометрической системы при этом не должен превышать  $-13$  дБ.

Решим задачу несколькими способами. Вначале реализуем радиометр компенсационного типа [36] с континуальной круглой апертурой антенны, которая для частоты  $f_0 = 1.5$  ГГц должна иметь диаметр  $D \approx 30$  м. Максимум боковых лепестков функции неопределенности такой антенны  $-17$  дБ. На рис. 4, а и рис. 4, б показаны апертура и характеристика направленности радиометра компенсационного типа, пересчитанная к координатам подстилающей поверхности. На рис. 4, б так же показано сечение главного лепестка функции неопределенности по уровню половинной мощности.

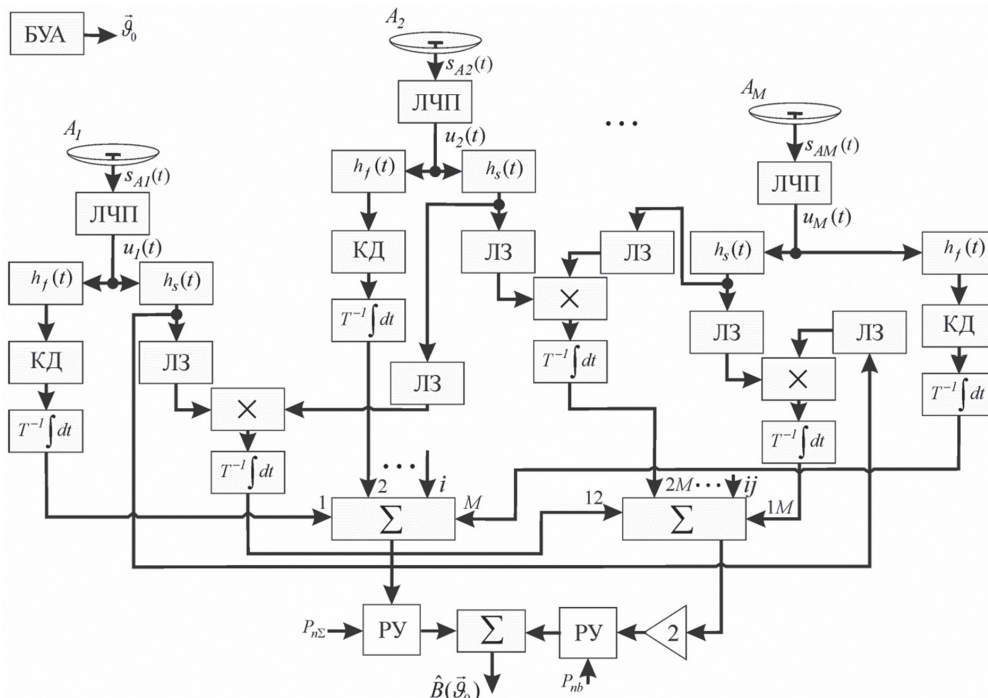


Рис. 3. Структурная схема радиометрической системы, реализующей алгоритм (16) оптимального формирования радиометрического изображения



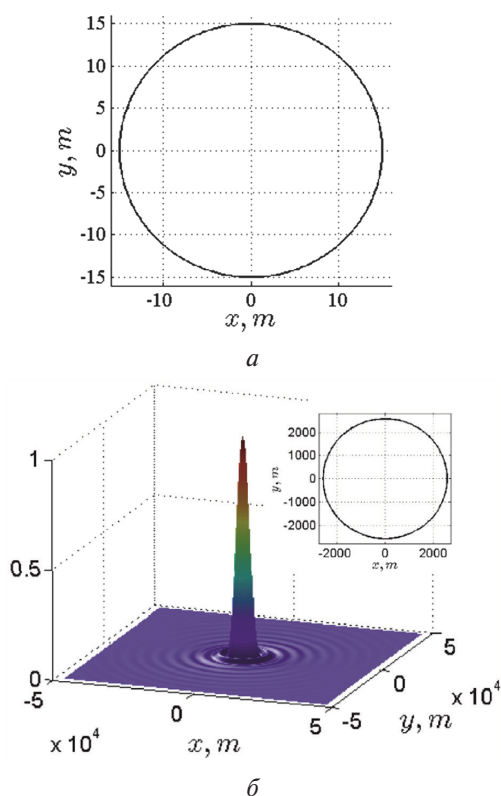


Рис. 4. Апертура антенны (а) и функция неопределенности радиометра компенсационного типа (б)

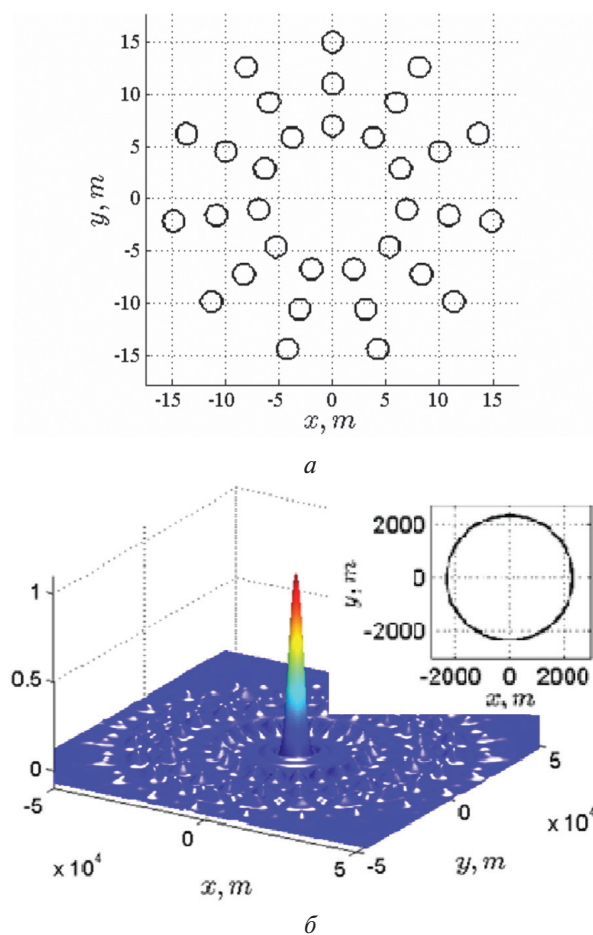


Рис. 5. Геометрия трёхкольцевой антенной решетки (а) и функция неопределенности (б) узкополосной радиометрической системы

Решить задачу можно используя синтезированный алгоритм (16) в квазимонохроматическом приближении ( $f_0 = 1.5$  ГГц). Антенная решетка и функция неопределенности такой системы показаны на рис. 5. Оптимизация геометрии решетки выходит за рамки работы, поэтому воспользуемся кольцевой геометрией решетки, предварительные расчеты направленных свойств которой выполнены в [17]. Для достижения заданного разрешения можно реализовать трехкольцевую решетку из 33 антенн (см. рис. 5, а), каждая диаметром 2м. Функция неопределенности радиометрической системы с такой антенной решеткой показана на рис. 5, б.

Недостаток рассматриваемой узкополосной радиометрической системы с трёхкольцевой решеткой – большое количество кросскорреляционных каналов.

Уменьшить число антенн и каналов обработки сигналов можно, реализовав многополосную радиометрическую систему с кольцевой антенной решеткой (рис. 6, а). Вместо трех колец решетки и обработки узкополосных сигналов целесообразно использовать однокольцевую решетку и обработку в трёх рабочих полосах, например, 1.4:1.8 ГГц, 2.2:2.6 ГГц, 2.8:3.5 ГГц. Функция неопределенности такой системы показана на рис. 6, б.

Функция неопределенности радиометрической системы с такой же антенной решеткой, но с передаточной характеристикой, удовлетворяющей условию сверхширокополосности (1.4:3.5 ГГц), показана на рис. 7.

Уровень боковых лепестков функций неопределенности, показанных на рис. 5, б и рис. 6, б, не превосходит  $-13$  дБ, а на рис. 7  $-14$  дБ.

При моделировании функций неопределенности использованы низкие отношения сигнал/шум, при которых влиянием согласованной и декоррелирующей фильтрации на обработку сигналов можно пренебречь. При высоких отношениях сигнал/шум согласованные и декоррелирующие фильтры расширяют область пространственных частот и разрешающая способность системы повышается.

Из анализа рис. 4–7 следует, что обработка полей радиотеплового излучения объектов и сред в СШП и многополосных радиометрических системах позволит уменьшить количество антенн в решетке, упростить геометрию решеток и, соответственно, уменьшить число кросскорреляционных каналов обработки пространственно-временных сигналов при сохранении однолепестковой формы функции неопределенности системы. С практической точки зрения более целесообразна многополосная реализация входных трактов, т.к. в пределах сплошной сверхширокой полосы могут наблюдаться участки с мощными помехами от активных систем радиолокации и телекоммуникаций, которые будут смещать оценки радиояркости температуры.

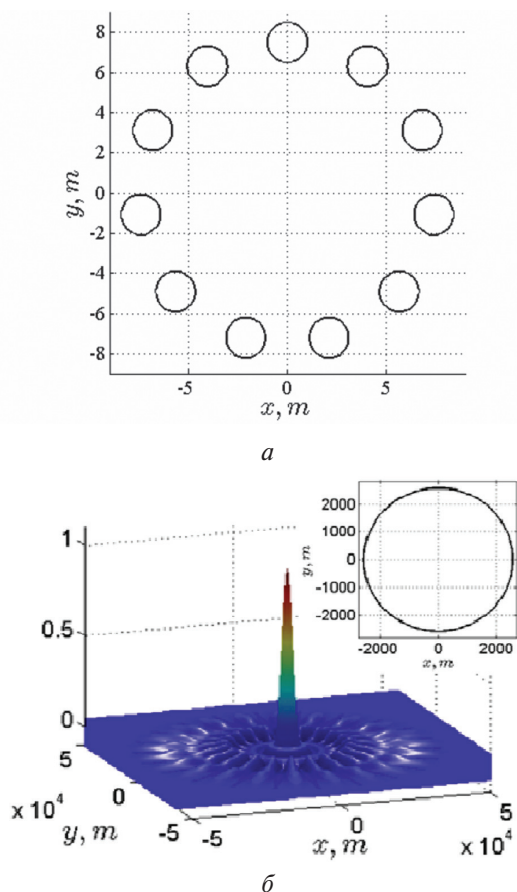


Рис. 6. Геометрия кольцевой антенной решетки (а) и функция неопределенности (б) трёхполосной радиометрической системы

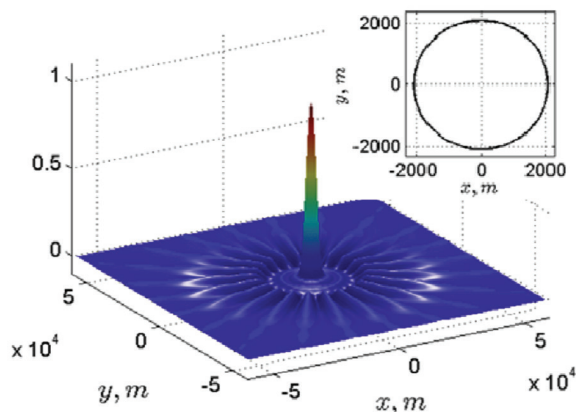


Рис. 7. Функция неопределенности сверхширокополосной радиометрической системы

## 5. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выделим перспективные направления исследований, необходимые для формирования целостной теории сверхширокополосной радиометрии.

Во введении отмечалось, что задачи сквозного синтеза радиометрических систем подразумевают и «установление связей между оценками параметров радиотеплового излучения и параметрами излучающего объекта», «поиск условий оптимального проведения эксперимента». Такие исследования предполагают [11] решение обратных задач, которые не могут быть

решены без использования электрофизических, регрессионных и др. моделей связи оценок параметров радиотеплового излучения с оценками параметров исследуемых сред. В [11, 37] приведены методики решения обратных задач при использовании различных моделей подстилающих поверхностей. Часто такие модели получены в результате решения прямых задач в узком диапазоне частот. Это ограничивает их применение для аттестации алгоритмов, предполагающих оценку параметров объектов и сред по обработке сверхширокополосных радиотепловых сигналов. Поэтому решение прямых задач для широкого диапазона частот является важным актуальным направлением исследования.

В настоящее время недостаточно исследованы вопросы оценки неточностей изготовления элементов антенных решеток, искажающих поле в апертуре антенны, на вид функций неопределенности. Решение такого класса задач может быть получено на основе статистической теории антенн, фундаментальный вклад [38, 39] в становление и развитие которой внес профессор Я. С. Шифрин.

## ВЫВОДЫ

Обобщён широкий класс задач по статистической теории синтеза и анализа сверхширокополосных и многополосных радиометрических систем с пространственно-распределенными антенными системами для формирования радиометрических изображений высокого пространственного разрешения. Приведены примеры применения теоретических результатов для решения задач разработки радиометрических систем с заданными характеристиками направленности. Отмечены перспективные направления исследований.

## Литература

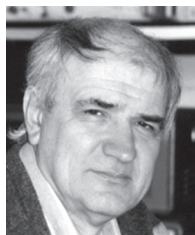
- [1] Ryle M. Radio Telescopes of Large Resolving Power / Physics, Nobel lecture. 1974. P. 188–203.
- [2] Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy, 2<sup>nd</sup> ed. New York, Wiley. 2001.
- [3] Уилсон Т.Л., Рольфс К., Хюттмейстер С. Инструменты и методы радиоастрономии : [монография] : пер. с англ. / пер. с англ. под ред. С. А. Трушкина. М.: Физматлит, 2013. — 568 с.
- [4] Волосюк В.К. Статистическая теория сверхширокополосных радиометрических устройств и систем / 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.
- [5] Павликов В. В. Алгоритм формирования радиометрических изображений в сверхширокополосных системах апертурного синтеза / В. В. Павликов // Труды 7-ой Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». 15 – 17 сентября 2014 г., Суздаль, Россия. 2014. — С. 138–142.
- [6] Караваев В. В. Статистическая теория пассивной локации / В. В. Караваев, В. В. Сазонов. М. : Радио и связь, 1987. — 240 с.



- [7] Фалькович С.Е., Пономарев В.И., Шкварко Ю.В. Оптимальный прием пространственно-временных сигналов в радиоканалах с рассеянием. М.: Радио и связь, 1989. – 296 с.
- [8] Kutuza B. G., Zagorin G. K. Two-Dimensional Synthetic Aperture Millimeter-Wave Radiometric Interferometer for Measuring Full-Component Stokes Vector of Emission from Hydrometeors / *Radio Sci.*, 2003, 38(3), 8055.
- [9] Measuring Ocean Salinity with ESA's SMOS Mission, M. Berger [et al.]. *ESA Bulletin*. 2002. No. 111, P. 113–121.
- [10] Kainulainen J., Rautiainen K., Tauriainen S., Auer T., Kettunen J., and Hallikainen M. First 2-D Interferometric Radiometer Imaging of the Earth From an Aircraft / *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*. 2007. Vol. 4. No. 2. – P. 241–245.
- [11] Волосюк В. К. Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации : монография / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко ; под ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с.
- [12] Волосюк В. К. Преобразование полей и их корреляционных функций в спектральные характеристики протяженных источников широкополосного излучения / В. К. Волосюк // *Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника*. – 1993. – Т. 36, № 6. – С. 27–30.
- [13] Волосюк В. К. Спектральные преобразования широкополосных полей и их функций когерентности / В. К. Волосюк // *Изв. высш. учеб. заведений. Радиофизика*. – 1993. – Т. 36, № 11. – С. 1061–1063.
- [14] Волосюк В. К. Спектральные преобразования широкополосных полей и их корреляционных характеристик. Приближение Френеля / В. К. Волосюк // *Изв. высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника*. – 1994. – Т. 37, № 8. – С. 58–66.
- [15] Волосюк В. К. Прямые и обратные преобразования при построении спектральных образов случайных полей / В. К. Волосюк // *Автометрия*. – 1995. – № 1. – С. 39–45.
- [16] Volosyuk V. K. Development of the theory, methods and algorithms for optimal wide- and ultrawideband spatiotemporal signal processing of radio-thermal radiation / V. K. Volosyuk, V. F. Kravchenko, V. V. Pavlikov // *Antenna theory and techniques. ICATT'2013 : proc. of the IX Intern. conf., Sept. 16–20, 2013, Odessa, Ukraine*. – [Odessa], 2013. – P. 74–79.
- [17] Pavlikov V. V. Optimal restoration of radiometric images in ultrawideband radiometric systems with multiantenna array / V. V. Pavlikov // *Antenna theory and techniques. ICATT'2013 : proc. of the IX Intern. conf., Sept. 16–20, 2013, Odessa, Ukraine*. – [Odessa], 2013. – P. 298–300.
- [18] Волосюк В. К. Новые методы оптимальной и квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигналов радиотеплового излучения в сверхширокополосных устройствах и системах / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко, В. В. Павликов, Я. С. Шифрин // *Анализ и синтез сложных систем в природе и технике : Международная научно-техн. конф. : сб. науч. труд., 16–18 декабря 2013 г., г. Воронеж / Воронежская государственная лесотехническая академия*. – Воронеж, 2013. – С. 22–28.
- [19] Развитие теории и методов оптимальной обработки пространственно-временных сигналов в активных, пассивных и комбинированных активно-пассивных РТС радиолокации и дистанционного зондирования с использованием новых весовых и WA-систем функций Кравченко / В. К. Волосюк, Ю. В. Гуляев, В. Ф. Кравченко, Б. Г. Кутуза, В. В. Павликов, В. И. Пустовойт // *Тр. Рос. науч.-техн. о-ва радиотехники, электроники и связи им. А. С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и ее применение*. – М., 2013. – Вып. 15 : *Цифровая обработка сигналов и ее применение. DSPA-2013 : докл. XV Междунар. конф., г. Москва, Россия, т. 1*. – С. 3–9.
- [20] Современные методы оптимальной обработки пространственно-временных сигналов в активных, пассивных и комбинированных активно-пассивных радиотехнических системах / В. К. Волосюк, Ю. В. Гуляев, В. Ф. Кравченко, Б. Г. Кутуза, В. В. Павликов, В. И. Пустовойт // *Радиотехника и электроника*, 2014. Т.59. № 2. – С. 109–131.
- [21] Волосюк В. К. Современная статистическая теория СШП радиометрических устройств и систем / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко, В.В. Павликов, В.И. Пустовойт // *Труды 7-й Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации»*. 15 – 17 сентября 2014 г., Суздаль, Россия. 2014. С. 10–14.
- [22] Зелкин Е. Г. Атомарные функции в задачах синтеза антенн и новые синтезированные окна / Е. Г. Зелкин, В. Ф. Кравченко // *Радиотехника и электроника*. 2001, т. 46, №8. – С. 903–931.
- [23] Кравченко В. Ф. Лекции по теории атомарных функций и некоторым их приложениям / В. Ф. Кравченко. – М. : Радиотехника, 2003. – 560 с.
- [24] Kravchenko V. F. Adaptive Digital Processing of Multidimensional Signals with Applications / V. F. Kravchenko, H. M. Perez-Meana, V. I. Ponomaryov. – М. : Fizmatlit, 2009. – 360 p.
- [25] Кравченко В. Ф. Алгебра логики, атомарные функции и вейвлеты в физических приложениях / В. Ф. Кравченко, В. Л. Рвачев. – М. : Физматлит, 2006. – 415 с.
- [26] Зелкин Е. Г. Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн / Е. Г. Зелкин, В. Ф. Кравченко, В. И. Гусевский. – М. : Сайнс-Пресс, 2005. – 512 с.
- [27] Астанин Л. Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений / Л. Ю. Астанин, А. А. Костылев. – М. : Радио и связь, 1989. – 192 с.
- [28] Павликов В. В. Статистический синтез многополосных систем апертурного синтеза / В. В. Павликов // *Физические основы приборостроения*. – 2014. – Т.3, №4. – С. 64–75.
- [29] Volosyuk V. K. Modern algorithms review for passive radar high resolution imaging / 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*. – [Kharkiv], 2015 [В печати].
- [30] Pavlikov V. V. Optimal signal processing for radiometric imaging with multi-antenna & multi-band passive radars / V. V. Pavlikov, S. S. Zhyla, and Nguen Van Kiem // *Antenna theory and techniques. ICATT'2015 : proc. of the X Intern. conf., Apr. 21–24, 2015, Kharkiv, Ukraine*. – [Kharkiv], 2015 [В печати].
- [31] Шифрин Я. С. Антенны: учеб. пособие / Я. С. Шифрин. – Харьков : Изд-во ВИРТА им. Л. А. Говорова, 1976. – 408 с.
- [32] Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Физматлит, 2001. Т. 2. – 810 с.

- [33] Фалькович С. Е. Оценка параметров сигнала / С. Е. Фалькович. — М.: Советское радио. — 1970. — 334 с.
- [34] Павликов В. В. Статистический синтез алгоритмов формирования радиометрических изображений в двухантенных сверхширокополосных системах апертурного синтеза / В. В. Павликов // Физические основы приборостроения. — 2013. — Т. 2, № 2. — С. 88–96.
- [35] Волосюк В. К. Статистический синтез одноантенных радиометрических приемников модуляционного типа / В. К. Волосюк, В. В. Павликов // Прикладная радиоэлектроника. — 2011. — Т. 10, № 3. — С. 285–294.
- [36] Павликов В. В. Статистический синтез оптимального радиометрического приемника компенсационного типа / В. В. Павликов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. — 2011. — № 4. — С. 19–24.
- [37] Мелентьев В. В. Методология спутниковой СВЧ-диагностики широтно-зональной и сезонной изменчивости мерзлых почвогрунтов и морского льда / В. В. Мелентьев, И. В. Мателенок // Лёд и снег. 2013. №1 (121). С. 73–82.
- [38] Шифрин Я. С. Вопросы статистической теории антенн. — М.: Сов. радио. — 1970. — 384 с. (перевод на англ. язык: Shifrin Y. S. Statistical Antenna Theory. — Golem Press, USA. — 1971. — 370 p.).
- [39] Шифрин Я. С. Статистическая теория антенн // Справочник по антенной технике. Т.1, под ред. Я.Н. Фельда и Е.Г. Зелкина. — М., 1997. — Гл. 9. — 57 с.

Поступила в редколлегию 20.02.2015



**Волосюк Валерий Константинович**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Научные интересы: статистическая теория радиотехнических систем, дистанционное зондирование, комплексирование активных и пассивных радиолокационных систем.



**Кравченко Виктор Филиппович**, профессор, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, главный научный сотрудник ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, профессор кафедры высшей математики ФН-1 МГТУ им. Н. Э. Баумана. Научные интересы: радиофизика, математическая физика, цифровая обработка сигналов и изображений, атомарные функции, R-функции, WA-системы функций.



**Павликов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, доцент кафедры проектирования радиоэлектронных систем летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт». Научные интересы: статистическая теория радиометрических устройств и систем.



**Тимошук Елена Николаевна**, исполняющая обязанности проректора по учебной работе, лицензионной и профориентационной деятельности, кандидат экономических наук, доцент кафедры перевозок и маркетинга Киевской государственной академии водного транспорта имени гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного. Научные интересы: системы управления транспортными потоками водного транспорта.

УДК 621.396

**Статистична теорія надширококутних просторово-розподілених радіометричних систем високої просторової роздільної здатності** / В.К. Волосюк, В.Ф. Кравченко, В.В. Павліков, О.М. Тимошук // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2015. — Том 14. — № 1. — С. 41–50.

Узагальнено результати досліджень з статистичної теорії синтезу надширококутних просторово-розподілених радіометричних систем високої просторової роздільної здатності. Розглянуто передумови можливості формування радіометричних зображень високого розрізнення і математичний апарат просторово-часових і просторово-частотних  $V$ -перетворень, який використовується для вирішення задач синтезу надширококутних систем. Синтезовано алгоритм оптимальної обробки надширококутних просторово-часових сигналів і досліджено його потенційні характеристики. Розроблено узагальнену структурну схему  $M$  антенної радіометричної системи і досліджено функції невизначеності для різних геометрій антенних решіток в ході використання надширококутного, багатосмугового і вузькосмугового вхідного тракту.

**Ключові слова:** статистична теорія радіометричних систем, системи високого просторового розрізнення, апертурний синтез, багатосмугові системи.

Іл.: 7. Бібліогр.: 39 найм.

UDC 621.396

**Statistical theory of ultrawideband spatially distributed radiometric systems with high spatial resolution** / V.K. Volosyuk, V.F. Kravchenko, V.V. Pavlikov, O.M. Tymoshchuk // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2015. — Vol. 14. — № 1. — P. 41–50.

Research results on the statistical theory of synthesis of ultrawideband spatially distributed radiometric systems with high spatial resolution are generalized. Preconditions of a possibility of radiometric imaging with high resolution and mathematical apparatus of spatial temporal and spatial frequency  $V$ -transforms, which is used for solving the problems of ultrawideband systems synthesizing are considered. The algorithm of optimal ultrawideband spatial temporal signal processing is synthesized and its potential characteristics are investigated. The generalized block diagram of  $M$  antenna radiometric system is developed and its ambiguity functions for different geometries of antenna arrays when using ultrawideband, multiband and narrowband predetection sections are investigated.

**Keywords:** statistical theory of radiometric systems, high spatial resolution systems, aperture synthesis, multiband systems.

Fig.: 7. Ref: 39 items.