

# РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СЕТИ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396

*В.К. ВОЛОСЮК, д-р техн. наук, С.С. ЖИЛА, канд. техн. наук,  
В.В. ПАВЛИКОВ, д-р техн. наук, А.Д. АБРАМОВ, канд. техн. наук, В.Г. ЯКОВЛЕВ*

## ОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ РАДИОЯРКОСТИ В ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### Введение

Радиометрические системы используют при решении задач дистанционного зондирования Земли, пассивной радиолокации, метеорологии, радионавигации и медицины. Такое широкое применение связано с высокой информативностью собственного радиотеплового излучения, энергоэффективностью и малыми массо-габаритными характеристиками аппаратуры. Простейшим устройством оценки пространственного распределения радиояркости является радиометр со сканирующей антенной, угловое разрешение которого определяется линейными размерами апертуры антенны. В практике радиометрических измерений можно добиться более высокого разрешения за счет применения пространственно-распределенных систем с нелинейной многоканальной обработкой – систем апертурного синтеза [1 – 6]. В основу разработки таких систем положена теорема Ван Циттерта – Цернике [7], связывающая угловое распределение радиояркости и функцию взаимной пространственной когерентности посредством многомерного преобразования Фурье. Алгоритм синтеза апертуры в радиометрической системе основан на корреляционной теории и не был получен из решения оптимизационной задачи статистического синтеза таких систем. Представляет интерес получить оптимальный алгоритм оценки радиояркости в пространственно-распределенных радиометрических системах методом максимального правдоподобия и разработать соответствующие технические решения для его реализации.

### Уравнение наблюдения

Сигналы, наблюдаемые с выходов линейных частей (ЛЧП) пространственно-распределенных приемников, имеют вид:

$$\vec{u}_{\Sigma}(t, \vec{r}') = \|u_{k\Sigma}(t, \vec{r}')\| = \vec{u}_s(t, \vec{r}', \vec{\lambda}) + \vec{u}_n(t, \vec{r}') + \vec{n}_p(t, \vec{r}'), \quad (1)$$

где  $\vec{u}_s(t, \vec{r}', \lambda) = \|u_{kS}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})\| = \|u_{kD}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})\| + \|u_{k\phi}(t, \vec{r}')\|$ ,  $\vec{u}_n(t, \vec{r}') = \|u_{kn}(t, \vec{r}')\|$ ,  $\vec{n}_p(t, \vec{r}') = \|n_{kp}(t, \vec{r}')\|$ ,  $k = \overline{1, K}$ ,  $\vec{r}' = (x', y') \in D'$ ,  $t \in (0, T)$ .

Все функции в (1) считаем однородными в пространстве и стационарными во времени случайными гауссовыми процессами. Индекс  $k$  означает набор независимых уравнений на разных поляризациях, частотных поддиапазонах, необходимых для оценок нескольких параметров.

Спектр (1) ограничен по частоте частотной характеристикой ЛЧП  $\dot{K}_k(j2\pi f)$ , а сектор принимаемых углов диаграммой направленности единичной антенны  $\dot{F}_A(\vec{\Theta} - \vec{\Theta}_0, f)$ . На ширину  $\dot{K}_k(j2\pi f)$  не налагаются никакие ограничения.

Принятый полезный сигнал  $u_{kS}(t, \vec{r}', \vec{\lambda})$  характеризуется спектрально-угловой плотностью комплексной амплитуды

$$\dot{A}_{kS}[\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})] = \dot{K}_k(j2\pi f) \dot{F}_A(\vec{\Theta} - \vec{\Theta}_0, f) \dot{A}_{ok}[\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})], \quad (2)$$

где  $\vec{\Theta}_0$  – направление максимума диаграммы направленности;  $\dot{A}_{ok}(\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}) = \dot{A}_{kD}(\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}) + \dot{A}_{k\Phi}(\vec{\Theta}, f)$  – спектрально-угловая плотность комплексной амплитуды на входе антенной системы, содержащая полезное  $\dot{A}_{kD}(\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda})$  и фоновое  $\dot{A}_{k\Phi}(\vec{\Theta}, f)$  излучения.

Основной оцениваемый параметр, яркость излучения, представим следующим образом:

$$B_{ks}[\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})] = |\dot{K}_k(i2\pi f)|^2 |\dot{F}_A(\vec{\Theta} - \vec{\Theta}_0, f)|^2 B_{ok}[\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})], \quad (3)$$

$$B_{ok}(\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}) = B_{kD}(\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}) + B_{k\Phi}(\vec{\Theta}, f). \quad (4)$$

Внутренние шумы приемников  $\vec{u}_n(t, \vec{r}') = \|u_{kn}(t, \vec{r}')\|$  – это дельта-коррелированные шумы на выходе ЛЧП с корреляционной функцией

$$R_{ku_n}(t_1 - t_2, \vec{r}'_1 - \vec{r}'_2) = \langle u_{kn}(t_1, \vec{r}'_1) u_{kn}(t_2, \vec{r}'_2) \rangle = 0,5 N_{0k} H_k(t_1 - t_2) \delta(\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2), \quad (5)$$

где  $H_k(t_1 - t_2) = F^{-1}[|K_k(j2\pi f)|^2]$ .

Задача восстановления пространственного распределения радиояркости относится к классу обратных задач и требует регуляризации. В качестве регуляризационной добавки в (1) вводятся белые гауссовы шумы  $\vec{n}_p(t, \vec{r}') = \|n_{kp}(t, \vec{r}')\|$  с корреляционными функциями  $R_{kp}(t_1 - t_2) = (N_{0kp}/2)\delta(t_1 - t_2)\delta(\vec{r}'_1 - \vec{r}'_2)$ .

Искомые спектральные яркости  $\vec{\lambda}(\vec{\Theta}) = B_{ks}(\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda})$  источников излучения связаны с корреляционными функциями  $R_{ku_s}(\Delta\vec{r}', \tau, \vec{\lambda})$  преобразованиями  $V_F$  и  $V_F^{-1}$  [8]:

$$f^{-2} c^2 B_{ks}[\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})] = V_F[R_{ku_s}(\Delta\vec{r}', \tau, \vec{\lambda})] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{ku_s}(\Delta\vec{r}', \tau, \vec{\lambda}) \exp\{-j2\pi f(\tau + \frac{\vec{\Theta}\Delta\vec{r}'}{c})\} d\tau d\vec{r}', \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R_{ku_s}(\Delta\vec{r}', \tau, \vec{\lambda}) &= \langle [u_{ks}(\vec{r}'_1, t_1) u_{ks}(\vec{r}'_2, t_2)] \rangle = V_F^{-1}\{B_{ks}[\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})]\} = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B_{ks}[\vec{\Theta}, f, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})] \exp\{j2\pi f(\tau + c^{-1}\vec{\Theta}\Delta\vec{r}')\} df d\vec{\Theta}. \end{aligned} \quad (7)$$

Данные преобразования, в отличие от теоремы Ван Циттерта – Цернике, не имеют ограничения на широкоплоскость сигнала и позволяют синтезировать системы, когда условие пространственно-временной узкополосности (ПВУ), или, что то же самое, условие квазимонохроматического приближения (КМП) [8, 9], не выполняется.

### Решение оптимизационной задачи

Оптимизацию алгоритмов оценки радиояркости  $\vec{\lambda}(\vec{\Theta}) = B_{ks}[\vec{\Theta}]$  выполним методом максимального правдоподобия в результате решения следующего уравнения:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \int_T \int_T \int_{D'} \int_{D'} \frac{\delta R_{k\Sigma}[t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})]}{\delta \lambda_j(\vec{\Theta})} W_{k\Sigma}[t_2, t_1, \vec{r}'_2, \vec{r}'_1, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})] dt_1 dt_2 d\vec{r}'_1 d\vec{r}'_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow \sum_{k=1}^K \int_T \int_T \int_{D'} \int_{D'} \frac{\delta W_{k\Sigma}[t_1, t_2, \vec{r}'_1, \vec{r}'_2, \vec{\lambda}(\vec{\Theta})]}{\delta \lambda_j(\vec{\Theta})} u_{k\Sigma}(t_1, \vec{r}'_1) u_{k\Sigma}(t_2, \vec{r}'_2) dt_1 dt_2 d\vec{r}'_1 d\vec{r}'_2, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\delta R_{k\Sigma}/\delta \lambda_j$ ,  $\delta W_{k\Sigma}/\delta \lambda_j$  – операторы вариационных производных,  $\Rightarrow$  – знак приравнивания. Левая часть (8) является математическим ожиданием правой.

Решение (8) имеет вид

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_2^4}{c^4} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\vec{\Theta}_1 - \vec{\Theta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}(f_2, \vec{\Theta}_2, \vec{\lambda}(\vec{\Theta}_2))} \left| \dot{\Psi}(f_1 - f_2, (f_1 \vec{\Theta}_1 - f_2 \vec{\Theta}_2) c^{-1}) \right|^2 d\vec{\Theta}_2 df_1 df_2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_1^4}{c^4} \left| \dot{K}_k(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1) \right|^2 B_{k\Sigma}^{-2}(f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1)) \left| \dot{S}_{kTD'}(j2\pi f_1 \bar{\vartheta}_1) \right|^2 df_1, \quad (9)$$

где  $|\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f_1 \bar{\vartheta}_1)|^2 - V_F$  периодограмма, усеченная интервалами наблюдения  $T$  и  $D'$ ,  $\dot{\Psi}(f_1 - f_2, (f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2) c^{-1})$  – функция неопределенности,  $B_{k\Sigma}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] = B_{ks}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})] + \frac{f^2}{c^2} \frac{N_{0k}}{2} |\dot{K}_k(j2\pi f)|^2 + \frac{f^2}{c^2} \frac{N_{0kp}}{2}$ .

Правая часть (9) показывает основные операции обработки радиотеплового излучения и структуру пространственно-распределенной радиометрической системы. Основная операция здесь – формирование  $V_F$ -периодограммы, которая заключается в фильтрации принимаемых процессов по временным частотам  $f$ , фазовой задержке каждой частотной составляющей на величину  $2\pi f \bar{\vartheta} r' / c$  и синфазном суммировании задержанных сигналов по всем элементам антенной решетки. Еще одной оптимальной операцией является адаптивная декорреляция сформированной периодограммы. Декоррелирующий фильтр содержит функцию, обратную спектральной яркости  $B_{k\Sigma}[f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta})]$ .

Усреднение декоррелированных колебаний путем их интегрирования по частотам  $f$  обеспечивает состоятельность оценок радиояркости изображений  $B_{0k}(\bar{\vartheta})$  и параметров  $\bar{\lambda}(\bar{\vartheta})$ . С одной стороны, декорреляция уменьшает радиусы корреляции усредняемых процессов, увеличивая число их независимых отсчетов в пространственно-временной области по переменной  $t$  и координатам  $\bar{r}'$ , что повышает эффективность усреднения при интегрировании возведенных в квадрат декоррелированных процессов. С другой стороны, расширение полосы декоррелирующих фильтров, характеризующихся множителем при периодограмме, обеспечивает интегрирование большего числа ее некоррелированных отсчетов в спектральной области по частотам  $f$ .

Техническая реализация алгоритма (9) на практике затруднительна. Введем ряд допущений для разработки квазиоптимальных структур радиометрических систем.

### Квазиоптимальные алгоритмы формирования оценки радиояркости

Рассмотрим более подробно функцию неопределенности:

$$\begin{aligned} \dot{\Psi}(f_1 - f_2, f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2) &= \dot{\Psi}_T(f_1 - f_2) \dot{\Psi}_{D'}(f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2) = \\ &= TX'_m Y'_m \text{sinc}[\pi(f_1 - f_2)T] \text{sinc}[\pi(f_1 \vartheta_{1x} - f_2 \vartheta_{2x})c^{-1} X'_m] \times \text{sinc}[\pi(f_1 \vartheta_{1y} - f_2 \vartheta_{2y})c^{-1} Y'_m]. \end{aligned} \quad (10)$$

Эта функция определяет совместную разрешающую способность системы по частотам  $f$  и направлениям  $\bar{\vartheta}$ . В случае приема узкополосного излучения на частоте  $f_0$  функция  $\dot{\Psi}_{D'}[f_0(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]$  соответствует диаграмме направленности раскрыва  $D'$  с постоянным в его пределах АФР. Разрешающая способность по частотам имеет порядок  $1/T$ , где  $T$  – время наблюдения. Это время может быть очень большим (сотни миллисекунд, секунды и более) и потенциальная разрешающая способность по частотам может быть очень большой.

1. *Обработка сигналов в широкополосных системах апертурного синтеза.* Для широкополосных и сверхширокополосных систем, полосы частот которых составляют от сотен мегагерц до нескольких гигагерц, множитель  $\dot{\Psi}_T(f_1 - f_2)$ , определяющий разрешающую способность по частоте, является узким и в его пределах функции  $B_{k\Sigma}(f_2, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}(\vartheta_2))$ ,  $\dot{\Psi}_{D'}(f_1 \bar{\vartheta}_1 - f_2 \bar{\vartheta}_2)$  и  $f_2^4$  практически постоянны, вынесем их за знак интеграла по  $f_2$  в точке  $f_1$ . Тогда система уравнений (9) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_1^4}{c^4} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}(f_1, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_2))} |\dot{\Psi}_{D'}[f_1(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]|^2 d\bar{\vartheta}_2 df_1 \Rightarrow \\ \Rightarrow & \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f_1^4}{c^4} \frac{|\dot{K}_k(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}^2(f, \bar{\vartheta}_1, \lambda(\bar{\vartheta}_1))} |\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f_1 \bar{\vartheta}_1)|^2 df_1 = \frac{1}{T} Y_{\text{блкс}}(\bar{\vartheta}_1). \end{aligned} \quad (11)$$

Множитель

$$\frac{f_1^4}{c^4} \frac{|\dot{K}(j2\pi f_1) \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_1)|^2}{B_{k\Sigma}^2(f, \bar{\vartheta}_1, \lambda(\bar{\vartheta}_1))} = |\dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \lambda(\bar{\vartheta}_1)]|^2$$

отвечает за пространственно-временную декорреляцию наблюдаемого процесса. Декорреляция является адаптивной, т. к. зависит от величин оцениваемых параметров  $\bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1)$ . Выбрав некоторое среднее значение  $\bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_1) \approx \bar{\lambda}_0$ , т.е. исключив адаптацию, умножив числитель и знаменатель в левой части системы (11) на  $B_{k\Sigma}(f_1, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}_0)$ , получим

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{+\infty} B_{0k}[f_0, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_2)] \Psi_{kw}(\bar{\vartheta}_1, \bar{\vartheta}_2) d\bar{\vartheta}_2 \Rightarrow \\ \Rightarrow & \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0]|^2 |\dot{S}_{kTD'}(j2\pi f, \bar{\vartheta}_1)|^2 df - \Sigma B = \frac{1}{T} \int_0^T |u_{kD'_w}(t, \bar{\vartheta})|^2 dt - \Sigma B, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\begin{aligned} \Sigma B = B_{wn_k} + B_{wn_{kp}} &= \frac{N_{0k}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f^2}{c^2} |\dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0]|^2 |\dot{K}_k(j2\pi f)|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{\Psi}_{D'}[f(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]|^2 d\bar{\vartheta}_2 df + \\ &+ \frac{N_{0kp}}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f^2}{c^2} |\dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0]|^2 \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{\Psi}_{D'}[f(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]|^2 d\bar{\vartheta}_2 df, \\ u_{kD'_w}(t, \bar{\vartheta}) &= \int_{D'} u_{kw}(t - \bar{\vartheta} \bar{r}' c^{-1}, \bar{r}') d\bar{r}', \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} u_{kw}(t - \bar{\vartheta} \bar{r}' c^{-1}, \bar{r}') &= \int_T h_{kw}(t - \tau) u_{k\Sigma}(\tau - \bar{\vartheta} \bar{r}' c^{-1}, \bar{r}') d\tau, \\ h_{kw}(t) &= F^{-1} \{ \dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0] \}. \end{aligned} \quad (14)$$

Суть алгоритма (12) заключается в следующем:

- 1) задержка колебаний  $u_{k\Sigma}(t, \bar{r}')$  в каждом элементе антенной системы с координатами  $\bar{r}'$  и формирование синфазных (в соответствии с наклоном фронта поля  $u_{ks}(t, \bar{r}')$ ) колебаний  $u_{k\Sigma}(\tau - \bar{\vartheta} \bar{r}' c^{-1})$  для каждого направления  $\bar{\vartheta}$ ;
- 2) декорреляция колебания  $u_{k\Sigma}(\tau - \bar{\vartheta} \bar{r}' c^{-1})$  в фильтре с импульсной характеристикой  $h_{kw}(t)$ ;
- 3) синфазное интегрирование задержанных и декоррелированных колебаний (для дискретных АР – сложение) и формирование сигналов  $u_{kD'_w}(t, \bar{\vartheta})$ ;
- 4) формирование сигналов, пропорциональных средней мощности синфазно проинтегрированных колебаний, полученных для каждого направления  $\bar{\vartheta}$  в отдельности;
- 5) устранение смещения на величину  $\Sigma B$ .

Полученным алгоритмическим операциям соответствует структурная схема на рис. 1.

В левой части системы уравнений показан физический смысл формирования оценки радиояркости – свертка истинной радиояркости с функцией неопределенности. Функция

$\Psi_{kw}(\bar{\vartheta}_1, \bar{\vartheta}_2)$  сглаживает по переменной  $\bar{\vartheta}$  функции  $B_{0k}(\bar{\vartheta})$  и  $\lambda(\bar{\vartheta})$ , а также определяет качество и, прежде всего, разрешающую способность воспроизведения спектральной яркости  $B_{0k}(\bar{\vartheta})$ .

Следует отметить, что классической является функция неопределенности Вудворта, определяющая совместную разрешающую способность радиолокатора по дальности и скорости и связанные с ними длительность импульса и ширину спектра, находящиеся между собой в обратной зависимости. Такая функция неопределенности похожа по своему физическому смыслу на соотношение неопределенности Гейзенберга в квантовой механике. Но в последнее время часто функциями неопределенности стали называть аппаратные функции, определяющие разрешающие способности систем и по пространственным, в частности угловым, координатам, что, возможно, не совсем корректно. Для функций, характеризующих разрешающую способность по многим переменным (по дальности, скорости, угловым координатам и др.), вероятно, такое определение может быть приемлемым.

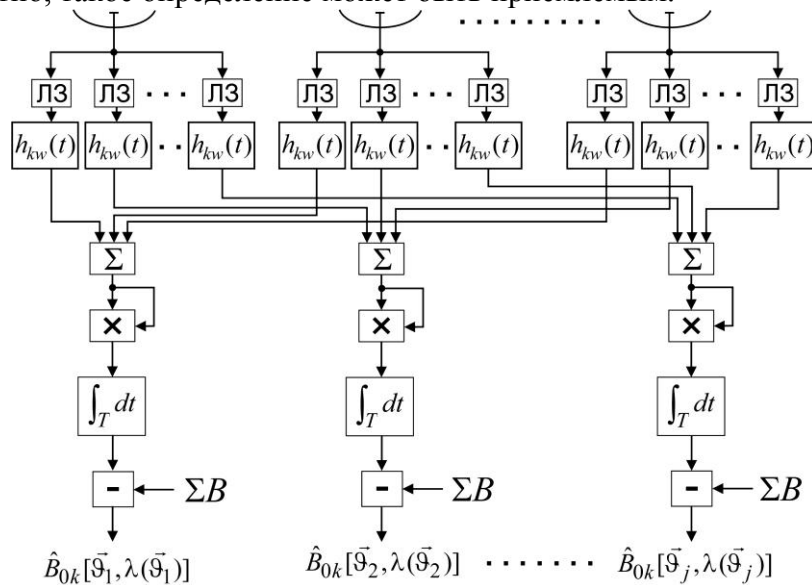


Рис. 1. Структурная схема формирования радиояркого изображения в пространственно-распределенных радиометрических системах

2. *Обработка сигналов в узкополосных системах апертурного синтеза.* Если в заданной полосе частот  $\dot{\Psi}_D[f(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2) \approx \dot{\Psi}_D[f_0(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_2)]$  и  $\dot{F}_A(\bar{\vartheta}_2 - \bar{\vartheta}_0, f) \approx \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_2 - \bar{\vartheta}_0, f_0)$ , то, вынося за знак интеграла по переменной  $f$  эти множители в (12), приходим к упрощенной системе оценок радиояркости  $\hat{B}_{0k}[f_0, \bar{\vartheta}_2, \hat{\lambda}(\bar{\vartheta}_2)]$  и параметров  $\hat{\lambda}(\bar{\vartheta}_2)$ :

$$\hat{B}_{0k}[f_0, \bar{\vartheta}_2, \hat{\lambda}(\bar{\vartheta}_2)] = \int_{-\infty}^{+\infty} B_{0k}[f_0, \bar{\vartheta}_2, \hat{\lambda}(\bar{\vartheta}_2)] |\dot{\Psi}_D[f_0(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_2)]|^2 d\bar{\vartheta}_2 \approx \frac{\int_0^T |u_{1kD_w}(t, \bar{\vartheta})|^2 dt}{T \Delta F_{kw}(\bar{\vartheta}, \bar{\lambda}_0) |\dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f_0)|^2} - \Sigma B1, \quad (15)$$

где

$$\Delta F_{kw}(\bar{\vartheta}, \bar{\lambda}_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{L}_{k1}[j2\pi f, \bar{\vartheta}, \bar{\lambda}_0]|^2 |\dot{K}(j2\pi f)|^2 df = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f^4}{c^4} \frac{|\dot{K}(j2\pi f)|^4}{B_{k\Sigma}^2(f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0)} df, \quad (16)$$

$$\left| \dot{L}_{k1}[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0] \right|^2 = \frac{\left| \dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0] \right|^2}{\left| \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f) \right|^2} = \frac{f^4}{c^4} \frac{\left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2}{B_{k\Sigma}^2(f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0)}. \quad (17)$$

Смещение оценок радиояркостей  $\Sigma B1$  вычисляется в (12) с указанными выше упрощениями по тем же формулам, что и  $B_{wnk}, B_{wnkp}$ , а  $u1_{kD'_w}(t)$  определяется выражениями, аналогичными (13), (14) с заменой  $\dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0]$  на  $\dot{L}_{k1}[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0]$ . В алгоритме (12) функция неопределенности  $\dot{\Psi}_{D'}[f_0(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_2)]$  – обычная (в отличие от заданной формулой (10) функции сверхширокополосной системы).

В алгоритме (15) можно ограничиться формированием правой части, что позволит получить оценку яркости с разрешением, определяемым ядром  $\left| \dot{\Psi}_{D'}[f_0(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_2)] \right|^2$ . Однако можно и продолжить задачу извлечения функции  $B_{ok}[f_0, \bar{\vartheta}_2, \bar{\lambda}(\bar{\vartheta}_2)]$  из-под знака интеграла известными методами решения некорректных обратных задач [10, 11]. Деление в (15) на функцию  $\left| \dot{F}_A(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0, f) \right|^2$  практически является корректным, т. к. будучи диаграммой направленности элементарного излучателя в антенной решетке, эта функция широкая и обычно содержит все исследуемое изображение в пределах своего главного лепестка, где практически отсутствуют ее нулевые значения.

Основная последовательность операций, определяющая алгоритмическую структуру квазиоптимальной радиометрической системы, включает в себя задержку колебаний в различных точках раскрыва в соответствии с наклоном фронта падающего поля, обеспечивающую их синфазность для каждого направления  $\bar{\vartheta}$ ; суммирование; декорреляцию; формирование сигналов, пропорциональных средней мощности декоррелированных колебаний; решение системы нелинейных уравнений (15) или без извлечения из-под знака интеграла искомым функций, или как интегральных уравнений с соответствующими их обращениями.

Внешне структурная схема радиометрической системы, соответствующая алгоритму (15), мало чем отличается от схемы, показанной на рис. 1. В ней необходимо заменить фильтры  $\dot{L}_k[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0]$  на фильтры  $\dot{L}_{k1}[j2\pi f, \bar{\vartheta}_1, \bar{\lambda}_0]$  и блоки  $\left| \dot{L}_{k1}(\bar{\vartheta}) \right|^2$  на блоки  $\left| \dot{F}_A(\bar{\vartheta}_1 - \bar{\vartheta}_0, f) \right|^2$ .

## Выводы

Синтезирован оптимальный по критерию максимума правдоподобия алгоритм оценки распределения радиояркости по угловым координатам в многоканальных пространственно-распределенных радиометрических системах. Основной операцией является формирование  $V_F$ -периодограммы, которая заключается в фильтрации принимаемых процессов по временным частотам  $f$ , фазовой задержке каждой частотной составляющей на величину  $2\pi f \bar{\vartheta} \bar{r}' / c$  и синфазном суммировании задержанных сигналов по всем элементам антенной решетки.

Введен ряд допущений и разработаны структурные схемы пространственно-распределенных радиометрических систем при широкополосной и узкополосной обработке сигналов. В отличие от существующих схем, предложена операция декорреляции принятых колебаний в инверсном фильтре, увеличивающая число некоррелированных отсчетов при оценке радиояркости исследуемых объектов и повышающая точность этой оценки.

**Список литературы:** 1. *Караваев, В. В.* Основы теории синтезированных антенн / В. В. Караваев, В. В. Сазонов. – М.: Сов. радио, 1974. – 168 с. 2. *Томпсон, А. Р.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии: монография / А. Р. Томпсон, Д. М. Моран, Д. У. Свенсон; пер. с англ. под ред. А. И. Матвеевко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с. 3. *Есепкина, Н. А.* Радиотелескопы и радиометры / Н. А. Есепкина,

Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский. – М. : Наука, 1973. – 416 с. 4. *Христиансен, У.* Радиотелескопы / У. Христиансен, И. Хегбом ; пер. с англ. под ред. А. А. Пистолькорса. – М. : Мир, 1988. – 304 с. 5. *Уилсон, Т. Л.* Инструменты и методы радиоастрономии : монография / Т. Л. Уилсон, К. Рольфс, С. Хюттемейстер ; пер. с англ. под ред. С. А. Трушкина. – М. : Физматлит, 2013. – 568 с. 6. *Ван Схонвелд, К.* Построение изображений в астрономии по функциям когерентности / К. Ван Схонвелд ; пер. с англ. под ред. Л. Р. Когана, В. И. Костенко. – М. : Мир, 1982. – 318 с. 7. *Борн М.* Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф ; пер. с англ. – М. : Наука. 1973. 720 с. 8. *Волосяк, В. К.* Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации : монография / В. К. Волосяк, В. Ф. Кравченко ; под ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с. 9. *Фалькович, С. Е.* Основы статистической теории радиотехнических систем : учеб. пособие / С. Е. Фалькович, П. Ю. Костенко. – Харьков : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2005. – 390 с. 10. *Василенко, Г. И.* Восстановление изображений / Г. И. Василенко, А. М. Тараторин. – М. : Радио и связь, 1986. – 304 с. 11. *Тихонов, А. Н.* Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсенин. – М. : Наука, 1986. – 285 с.

*Национальный аэрокосмический университет  
имени Н.Е. Жуковского «ХАИ»*

*Поступила в редколлегию 03.10.2017*