

УДК 621.396:537.874.4

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*

ОПТИМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА РАДИОЯРКОСТИ ПРОТЯЖЕННОГО ИСТОЧНИКА РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХАНТЕННОЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Синтезирован и исследован алгоритм оптимального формирования радиометрических изображений (РМИ) с помощью двухантенной сверхширокополосной (СШП) радиометрической системы. Найдено аналитическое выражение для функции неопределенности (ФН) такой системы и приведены примеры её моделирования. Показано, что переход к обработке СШП и многочастотных сигналов позволяет сформировать ФН с одним главным лепестком, что исключает неоднозначность восстановления РМИ. Найдено выражение для предельной погрешности оценки РМИ и установлено, что расширение рабочей полосы частот приемника позволяет повысить точность оценивания.

Ключевые слова: радиометрия, сверхширокополосная радиометрическая система.

Введение

Многоантенные радиометрические системы (РМС) с корреляционной обработкой сигналов широко применяются для решения задач дистанционного зондирования Земли [1–5] и космических объектов [6, 7]. Для обеспечения высокого пространственного разрешения и однозначности угловых измерений с помощью узкополосных РМС требуется большое число независимых пар интерферометров. В [8, 9] синтезированы оптимальные алгоритмы обработки сигналов в сверхширокополосных (СШП) РМС, из анализа которых следует, что переход к СШП системам позволяет сформировать однолепестковые характеристики направленности с небольшим числом антенн. При синтезе СШП РМС в [8, 9] вводился ряд ограничений на вид радиояркости, как функции частоты и угловых координат. В частности предполагалось, что спектральная радиояркость не изменяется по частоте в пределах рабочих частот СШП приемников или такое изменение компенсируется выбором соответствующих амплитудно-частотных характеристик. Кроме этого, предполагалось, что необходимо обрабатывать кросскорреляционные и автокорреляционные функции сигналов различных антенн, что не принципиально для восстановления «тонкой структуры» в пределах диаграммы направленности одиночной антенны радиометрических изображений (РМИ).

В статье решается задача статистического синтеза СШП двухантенной РМС формирования РМИ без введения ограничений на вид радиояркости и с

исключением обработки автокорреляционных сигналов.

Постановка задачи и исходные данные

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

Геометрия задачи показана на рис. 1. Антенны A_i ($i = 1, 2$), раскрыты 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 $s_{Ai}(t)$ 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 $\vec{r}'_i \in D'_i$ ($i = 1, 2$) характеризует положение произвольной элементарной площадки в пределах области D'_i относительно фазового центра i -й антенны, расположенного в точке, в которой находится конец вектора \vec{a}_i .

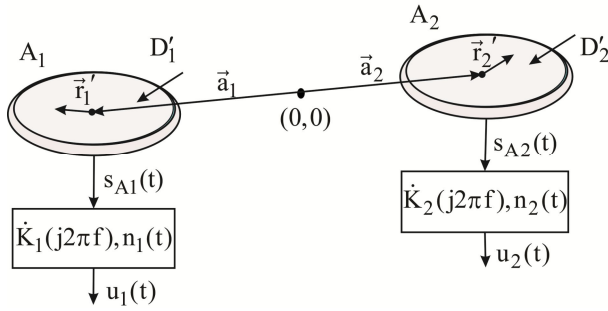


Рис. 1. Геометрия антенной системы

Исходные данные и геометрия определяют следующие модели уравнений наблюдения на выходах высокочастотных частей радиометра:

$$\vec{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(t) + n_1(t) \\ s_2(t) + n_2(t) \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Входящие в (1) процессы случайные и гауссовские. Здесь $s_i(t)$ – собственное шумовое излучение исследуемого объекта после прохождения входных цепей i -приемника. Процесс $n_i(t)$ – внутренний шум приемника.

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

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

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,

$$C_f = \frac{f}{\iint_{\vartheta_x^2 + \vartheta_y^2 \leq 1} c |\dot{F}(f, \vartheta_x, \vartheta_y)|^2 (1 - \vartheta_x^2 - \vartheta_y^2)^{-0,5} d\vartheta_x d\vartheta_y}.$$

Вся статистика наблюдений содержится в их корреляционных функциях, которые найдем 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

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

$$\underline{R}_n(t_1 - t_2) = \langle \vec{n}(t_1) \vec{n}^T(t_2) \rangle =$$

$$= 0,5 N_{0n} \underline{I} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 \exp\{j2\pi f(t_1 - t_2)\} df,$$

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

Как отмечалось во введении, в автокорреляционных функциях отсутствует информация о «тонкой структуре» РМИ, поэтому эти составляющие можно исключить, т.е. принять $R_{s,i=j}(t_1 - t_2, B(f, \vec{\vartheta})) = 0$.

Решение задачи

Алгоритм оптимальной оценки РМИ (интегральной по частотам радиояркости, т.е. интенсивности) найдем из решения уравнения максимального правдоподобия, которое запишем в следующем виде [1]:

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

где Spur – след матрицы, $T_{\text{об}}$ – время наблюдения,

$\frac{\delta}{\delta B(f, \vec{\vartheta})}$ – функциональная производная,

$\underline{R}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))$ – матрица корреляционных функций наблюдений (1), $\underline{W}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}'))$ – матрица, обратная матрице корреляционных функций, определяемая из уравнения обращения

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

В спектральной области выражение (2) примет вид

$$-T_{\text{ob}} \text{Spur} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\delta \underline{G}_u(f, \vec{\vartheta}_0, \Delta \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}'))}{\delta B(f, \vec{\vartheta}')} \times \right) df =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\vec{U}_T^* (j2\pi f) \frac{\delta \underline{G}_u^{-1}(-f, \vec{\vartheta}_0, \Delta \vec{a}, B(f, \vec{\vartheta}'))}{\delta B(f, \vec{\vartheta}')} \times \right) df,$$

$$\times \vec{U}_T(j2\pi f)$$
(3)

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

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

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

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

$$\underline{G}_u(f, \cdot) = F \left\{ \underline{R}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}')) \right\} = \frac{1}{2} |\dot{K}|^2 \begin{pmatrix} 0 & B_{A+} \\ B_{A-} & 0 \end{pmatrix},$$

$$\underline{G}_u^{-1}(f, \cdot) = F \left\{ \underline{W}(t_1, t_2, B(f, \vec{\vartheta}')) \right\} = \frac{1}{|\dot{K}|^2} \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ B_{A-} & 0 \\ 2 & 0 \\ B_{A+} & 0 \end{pmatrix},$$

где

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

$$i, j = 1, 2,$$

$F\{\cdot\}$ – оператор Фурье, "*" – оператор

комплексного сопряжения, $A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0)$ – эффективная площадь антенны,

$$\vec{U}^T(j2\pi f) = \left\| \dot{U}_1(j2\pi f) \quad \dot{U}_2(j2\pi f) \right\|, \quad \dot{U}_i(\cdot) = F\{u_i(t)\},$$

$i = 1, 2$.

Решение уравнения (3) получено в виде

$$\sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{A_{\text{eff}}(\cdot)}{B_{Aij}^2} \int_{-\infty}^{\infty} \left(A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) B(f, \vec{\vartheta}) \times \right) d\vec{\vartheta} \times \right) df =$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{A_{\text{eff}}(\cdot)}{|\dot{K}|^2 B_{Aij}^2} \dot{U}_{T,i}(\cdot) \dot{U}_{T,j}^*(\cdot) \times \right) df,$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{A_{\text{eff}}(\cdot)}{|\dot{K}|^2 B_{Aij}^2} \dot{U}_{T,i}(\cdot) \dot{U}_{T,j}^*(\cdot) \times \right) df,$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{A_{\text{eff}}(\cdot)}{|\dot{K}|^2 B_{Aij}^2} \dot{U}_{T,i}(\cdot) \dot{U}_{T,j}^*(\cdot) \times \right) df,$$
(4)

где $B_{Aij} = B_{A+}, B_{Aji} = B_{A-}$.

Правая часть (4) содержит все необходимые операции обработки сигналов в двухантенной СШП РМС, необходимые для формирования РМИ. Левая часть – физическая сущность РМИ – это интенсивность как функция пространственных координат (направляющих косинусов), которую можно переписать следующим образом:

$$\hat{I}_{A\sim}(\vec{\vartheta}) =$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^2 F_{2D, f \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1}}^{-1} \left\{ F_{2D, \vec{\vartheta}}^{-1} \left\{ A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0) \times \right\} \right\} =$$

$$= \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^2 V_F^{-1} \left\{ \frac{A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta}' - \vec{\vartheta}_0) A_{\text{eff}}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) B(f, \vec{\vartheta})}{B_{Aij}^2} \right\},$$
(5)

где $F_{2D}^{-1}\{\cdot\}$ – оператор двумерного обратного преобразования Фурье, $V_F^{-1}\{\cdot\}$ – оператор обратного преобразования Волосюка [1].

Исследование алгоритма обработки сигналов

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

$$\hat{I}_{A\sim}(\vec{\vartheta}) = \frac{1}{2T_{\text{ob}}} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{A_{\text{eff}}^{0,5} \dot{U}_{T,i} A_{\text{eff}}^{0,5} \dot{U}_{T,j}^*}{|\dot{K}| B_{Aij} |\dot{K}| B_{Aij}} \times \right) df =$$

$$= \frac{1}{2T_{\text{ob}}} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\dot{U}_{T,i,W} \dot{U}_{T,j,W}^*}{\times e^{j2\pi f (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1}}} \right) df =$$

$$= \frac{1}{T_{\text{ob}}} \int_0^{T_{\text{ob}}} \left(\begin{matrix} u_{T,1,W}(t) \times \\ \times u_{T,2,W}(t - 2\pi f (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1}) \end{matrix} \right) dt,$$
(6)

где $\dot{U}_{T,i,W}$ – спектр i -го наблюдения после прохождения выбеливающего $|\dot{K}|^{-2} B_{A+}^{-1}$ фильтра, $u_{T,i,W}(t) = F\{\dot{U}_{T,i,W}\}$ – наблюдения во временной области.

На рис. 2 показана структурная схема двухантенной РМС, соответствующей алгоритму обработки сигналов (6).

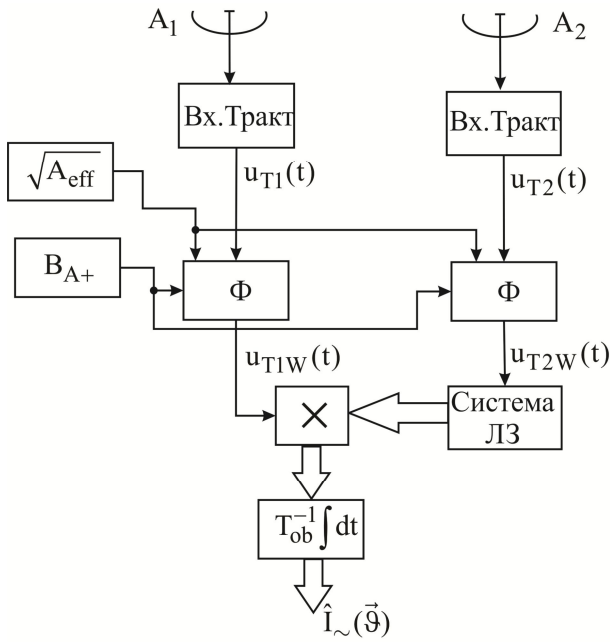


Рис. 2. Структурная схема двухантенной РМС

Схема работает следующим образом. Сигналы с выхода антенн проходят входные тракты приемника (Вх.Тракт) с частотной характеристикой $K(j2\pi f)$. Там же к сигналам добавляются шумы. Далее сигналы поступают на систему выбеливающих фильтров (Ф), работа которых предусматривает наличие априорных сведений о СПМ (B_{A+}) и эффективной площади антенны ($\sqrt{A_{eff}}$). После фильтрации в один из каналов вводятся задержки (Система линейной задержки (ЛЗ)). Такие задержки обеспечивают фокусировку антенной системы на различные угловые направления. Далее сигналы поступают на векторный перемножитель и систему интеграторов с коэффициентом усиления T_{ob}^{-1} . На выходе такой РМС формируется оценка РМИ - интенсивность радиотеплового излучения, как функция угловых координат.

Исследование функции неопределенности

Функция неопределенности (ФН) системы найдена в следующем виде:

$$\Psi(\cdot) = \frac{1}{2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A_{eff}(f, \vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0)}{B_{Aij}^2} A_{eff}(f, 0) \times \int_{\mathcal{X}} j2\pi f (\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) \Delta \vec{a}_{ij} c^{-1} df.$$

На рис. 3- 9 показана геометрия двухантенной РМС и ее ФН для параметров системы, приведенных в табл. 1. При построении ФН выбеливающие

фильтры не использованы, так как на практике более целесообразно их исключить из обработки из-за сложности технической реализации и необходимости располагать априорной информацией о соотношении сигнал/шум.

Таблица 1
Параметры РМС, использованные при моделировании ФН, приведены на рис. 4-9

| Обозначение ФН | Диаметры антенн | Фазовые центры отдельных антенн в антенной решетке, м | Диапазон рабочих частот, ГГц |
|----------------|-----------------|---|------------------------------|
| Ψ_1 | 2 | 30 | 1,5 |
| Ψ_2 | 2 | 30 | [1,4-1,8; 2,2-2,6; 2,8-3,5] |
| Ψ_3 | 2 | 30 | СШП [1,4-3,5] |

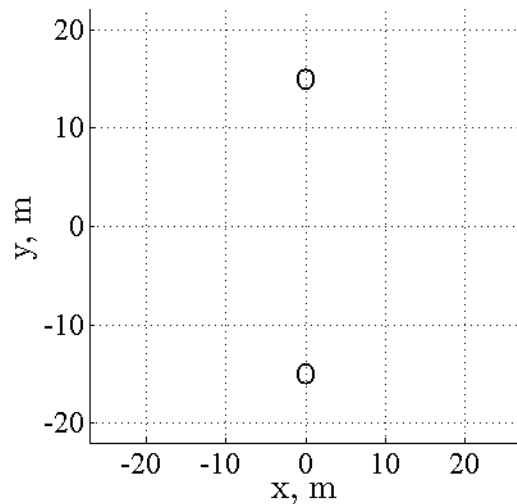


Рис. 3. Геометрия антенной решетки

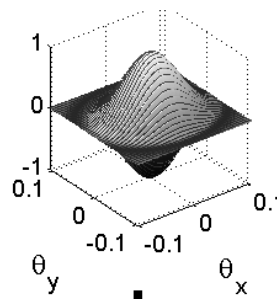


Рис. 4. Трехмерный вид Ψ_1

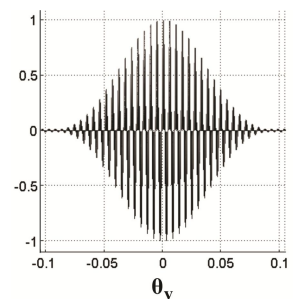


Рис. 5. Проекция Ψ_1 на плоскость $\theta_y 0z$

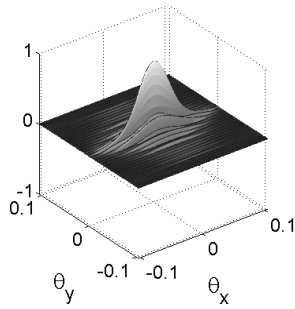


Рис. 6. Трехмерный вид Ψ_2

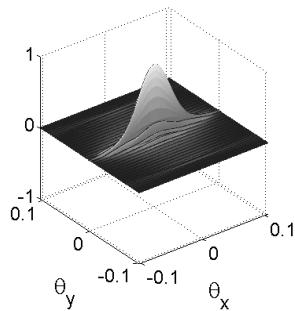


Рис. 8. Трехмерный вид Ψ_3

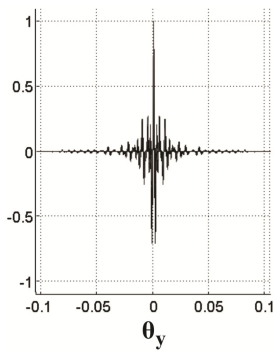


Рис. 7. Проекция Ψ_2 на плоскость $\theta_y 0z$

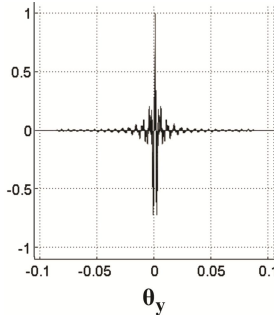


Рис. 9. Проекция Ψ_3 на плоскость $\theta_y 0z$

Из анализа рис. 4–9 следует, что в многополосных и СШП РМС с двумя антеннами в плоскости базы наблюдается один главный лепесток, т.е. отсутствует неоднозначность угловых измерений.

Предельная погрешность формирования РМИ

Предельная погрешность найдена в виде:

$$\sigma^2(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0) = \left[0,5 T_{ob} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{A_{eff}^2}{(B_{Aij})^2} e^{j4\pi f(\vec{\vartheta} - \vec{\vartheta}_0)\Delta \vec{a}_{ij}c^{-1}} df \right]^{-1}$$

Из этого выражения следует, что при увеличении времени наблюдения и эффективной площади антенн точность формирования РМИ увеличивается.

Выводы

Синтезирован и исследован алгоритм оптимального формирования РМИ с помощью двухантенной сверхширокополосной радиометрической системы. Найдено аналитическое выражение для функции неопределенности такой системы и приве-

ден пример её моделирования. Показано, что в СШП РМС отсутствует неоднозначность угловых измерений. Расширение полосы рабочих частот снижает предельную погрешность формирования РМИ.

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. Метод оптимального 3D-картографирования пространственно-протяженных объектов многопозиционными радиометрическими системами [Текст] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко, Ву Та Кыонг, В. В. Павликов // Труды 8-ой Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации», 20 – 23 сентября 2015 г. – Суздаль, Россия, 2015. – С. 23–30.
3. Алгоритм обработки сверхширокополосных пространственно-временных радиометрических сигналов для оптимального оценивания дальности до участка пространственно-протяженного объекта [Текст] / В. К. Волосюк, В. Ф. Кравченко, Ву Та Кыонг, В. В. Павликов // Физические основы приборостроения. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 42–55.
4. Optimal algorithm for 3D imaging of spatially extended object [Text] / V. K. Volosyuk, V. V. Pavlikov, Vu Ta Cuong and O. M. Tymoshchuk // Antenna theory and techniques. ICATT'2015 : proc. of the X Intern. conf., Apr. 21–24 2015. – Kharkiv, Ukraine, 2015. – P. 182–184.
5. Measuring Ocean Salinity with ESA's SMOS Mission [Text] / M. Berger [et al.] // ESA Bulletin. – 2002. – № 111. – P. 113–121.
6. Уилсон, Т. Л. Инструменты и методы радиоастрономии [Текст] / Т. Л. Уилсон, К. Рольфс, С. Хюттмейстер ; пер. с англ. под ред. С. А. Трушкина. – М. : Физматлит, 2013. – 568 с.
7. Томпсон, А. Р. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии [Текст] / А. Р. Томпсон, Д. М. Моран, Д. В. Свенсон ; пер. под ред. Л. И. Матвеевко. – М. : Физматлит, 2003. – 624 с.
8. 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.
9. 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.

Поступила в редакцію 29.10.2015, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015

**ОПТИМАЛЬНА ОЦІНКА РАДІОЯСКРАВОСТІ ПРОТЯЖНОГО ДЖЕРЕЛА
РАДІОТЕПЛОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ В ДВОАНТЕННІЙ НАДШИРОКОСМУГОВІЙ
РАДІОМЕТРИЧНІЙ СИСТЕМІ**

Нгуєн Ван Кієм, О. М. Тимошук

Синтезовано і досліджено алгоритм оптимального формування радіометричних зображень (РМЗ) за допомогою двоантенної надширокосмугової (НШС) радіометричної системи. Знайдено аналітичний вираз для функції невизначеності (ФН) такої системи і наведено приклади її моделювання. Показано, що перехід до обробки НШС і багатосмугових сигналів дозволяє сформувати ФН з однією головною пелюсткою, що виключає неоднозначність відновлення РМЗ. Знайдено вираз для граничної похибки оцінки РМЗ і встановлено, що розширення робочої смуги частот приймача дозволяє підвищити точність оцінювання.

Ключові слова: радіометрія, надширокосмугова радіометрична система.

**RADIOBRIGHTNESS OPTIMAL ESTIMATION OF EXTENDED SOURCES OF RADIO THERMAL
RADIATION IN TWO ANTENNA ULTRA-WIDEBAND RADIOMETRIC SYSTEM**

Nguyen Van Kiem, E. N. Tymoshchuk

Optimal algorithm of radiometric imaging (RMI) with the two-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 is shown. It is shown that UWB and multiband signal processing allows to form AF with one main lobe. Expression for the limit error of RMI estimation is found. It is stated that the receiver bandwidth widening improves the accuracy of estimation.

Keywords: radiometry, ultra-wideband radiometric system.

Нгуєн Ван Кієм – аспірант каф. проектування радіоелектронних систем летательних апаратів, Національний аерокосмічний університет ім. Н. Е. Жуковського «Харьковский авиационный институт», Харьков, Україна, e-mail: kiemxai@gmail.com.

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