

УДК 621.396.96.095

Е. Н. ТИМОЩУК*Киевская государственная академия водного транспорта
имени гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Украина***ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХАНТЕННЫХ
СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗА**

Системы апертурного синтеза используются для получения радиометрических изображений (РМИ) высокого пространственного разрешения. Базовой ячейкой такой системы является двухантенный радиоинтерферометр. Алгоритмы оптимального и квазиоптимального восстановления РМИ с использованием такого радиоинтерферометра при обработке сверхширокополосных пространственно-временных сигналов известны. В то же время вопросы точности оценивания РМИ и потенциальной флуктуационной чувствительности таких систем не исследованы. В статье впервые получены и исследованы аналитические выражения для предельной погрешности оценивания РМИ и потенциальной флуктуационной чувствительности двухантенной сверхширокополосной системы апертурного синтеза.

Ключевые слова: *двухантенная сверхширокополосная система апертурного синтеза, радиометрическое изображение, предельная погрешность оценивания радиометрического изображения, потенциальная флуктуационная чувствительность*

Введение

Радиометрические системы апертурного синтеза [1] применяют для восстановления радиометрических изображений (РМИ) в дистанционном зондировании, радиоастрономии, пассивной радиолокации, метеорологии и медицине. Задача статистического синтеза таких систем решены в [2, 3]. При этом, в [2] рассматривается гипотетическая непрерывная регистрирующая среда и синтезируется обобщенный алгоритм обработки пространственно-временного поля, из которого, при введении допущений на дискретно-непрерывную структуру антенной системы, можно разработать систему апертурного синтеза. В работе [3] задача синтеза алгоритмов оптимальной и квазиоптимальной обработки сигналов с целью восстановления РМИ сразу решается для двухантенного сверхширокополосного (СШП) радиометра. Там же анализируется функция неопределенности (ФН) такой системы. Однако вопросы количественной оценки качества восстановления РМИ и систем, реализующих эти алгоритмы, требуют дальнейшего исследования.

Целью данной работы является определение потенциальных характеристик (предельной погрешности оценивания РМИ и потенциальная флуктуационной чувствительности) двухантенной СШП системы апертурного синтеза.

**Исходные данные: оптимальный
алгоритм обработки сигналов
и ФН двухантенной СШП системы**

В работе [3] решена задача синтеза алгоритма обработки СШП сигналов радиотеплового излучения, принятого двумя разнесенными антеннами (двухэлементной антенной решеткой (АР)), позволяющего на заданном интервале наблюдения $(0, T)$ дать оптимальную оценку РМИ $B(\bar{\vartheta})$ – угловой плотности мощности радиотеплового излучения. Оптимальный алгоритм получен в виде

$$\int_{-\infty}^{\infty} B(\bar{\vartheta}^n) \psi_{\text{opt}}(\bar{\vartheta}, \bar{\vartheta}^n, \bar{\vartheta}_0, \bar{f}'_j, \bar{f}'_j, \mu_{ij}, \Delta F) d\bar{\vartheta}^n = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}_{\text{Wadd}}(j2\pi f) \dot{U}_{T,1}(j2\pi f)|^2 + \\ + |\dot{K}_{\text{Wadd}}(j2\pi f) \dot{U}_{T,2}(j2\pi f)|^2 df - \\ - \left\{ N_{0n} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 + N_{0ra} + N_{0rb} \right\} \Delta F_{\text{Wadd}}(B) \end{array} \right\} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \dot{U}_{T,1}^*(j2\pi f) e^{j2\pi f(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) \Delta \bar{r}_{i2} c^{-1}} \times \right. \\
 & \times \dot{K}_{Wmult,12}^*(j2\pi f) \dot{U}_{T,2}(j2\pi f) \dot{K}_{Wmult,21}(j2\pi f) + \\
 & \quad \left. + \dot{U}_{T,1}(j2\pi f) e^{-j2\pi f(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) \Delta \bar{r}_{i2} c^{-1}} \times \right. \\
 & \times \dot{K}_{Wmult,12}(j2\pi f) \dot{U}_{T,2}^*(j2\pi f) \dot{K}_{Wmult,21}^*(j2\pi f) \left. \right\} df - \\
 & - N_{0rb} \Delta F_{Wmult}(B), \tag{1}
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 & |\dot{K}_{Wadd}(j2\pi f)| = \\
 & = \frac{\sqrt{A_{eff}(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0)}}{\left| \dot{K}(j2\pi f) \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff}(f, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) B(\bar{\vartheta}') d\bar{\vartheta}' \left[1 + \mu_{1i}^{-1}(f) \right] \right|}, \tag{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \dot{K}_{Wmult,ij}(j2\pi f) = \\
 & = \frac{\sqrt{A_{eff}(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0)}}{\left(\left| \dot{K}(j2\pi f) \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff}(f, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) B(\bar{\vartheta}') \times \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. \times e^{j2\pi f(\bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) \Delta \bar{r}_{ij} c^{-1}} d\bar{\vartheta}' \left[1 + \mu_{1i}^{-1}(f) \right] \right| \right)} \tag{3}
 \end{aligned}$$

– передаточные характеристики адаптивных (зависят от соотношения сигнал/шум $\mu_{ij}(f)$) декоррелирующих фильтров, $\dot{K}(j2\pi f)$ – передаточная характеристика i -го канала ($i = 1, 2$) линейной части приемника (ЛЧП), T – время наблюдения, \bar{r}_i – вектор, характеризующий положение фазового центра i -й антенны в АР, $\Delta \bar{r}_{ij} = \bar{r}_i - \bar{r}_j$,

$$\Delta F_{Wadd(mult)}(B) = \int_{-\infty}^{\infty} \left| \dot{K}_{Wadd(mult)}(j2\pi f) \right|^2 df \tag{4}$$

– ширина полосы частот входных цепей радиометра после обеляющих фильтров, зависящая от оценки РМИ и величины сигнал/шум

$$\begin{aligned}
 & \mu_{ij}(f) = \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2 \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff}(f, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) \times \\
 & \quad \times B(\bar{\vartheta}') e^{j2\pi f(\bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) \Delta \bar{r}_{ij} c^{-1}} d\bar{\vartheta}' \times \\
 & \quad \times \left(N_{0n} \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2 \delta_{ij} + N_{0ra} \delta_{ij} + N_{0rb} \right)^{-1}, \tag{5}
 \end{aligned}$$

$$\dot{U}_{T,i}(j2\pi f) = \int_0^T u_i(t) e^{-j2\pi f t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} u_{T,i}(t) e^{-j2\pi f t} dt,$$

$$u_i(t) = s_i(t) + n_i(t) + n_{r,i}(t) \tag{6}$$

– уравнение наблюдения в i -м канале, $s_i(t)$ – полезный сигнал, $n_i(t)$ – внутренние шумы приемника, $n_{r,i}(t)$ – регуляризирующая добавка, исключаяющая сингулярные решения интегральных уравнений,

$$A_{eff}(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) = \eta_A c^2 f^{-2} \left| \dot{F}_N(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) \right|^2$$

– эффективная площадь антенны. Здесь η_A – коэффициент полезного действия антенны, $\left| \dot{F}_N(f, \bar{\vartheta}) \right|^2 = \left| \dot{F}(f, \bar{\vartheta}) \right|^2 \Omega_{eff}^{-1}(f)$ – нормированная диаграмма направленности антенны по мощности, $\Omega_{eff}(f) = \int \left| \dot{F}(f, \bar{\vartheta}) \right|^2 d\bar{\vartheta}$ – эффективный телесный угол СШП антенны. Процессы $s_i(t)$, $n_i(t)$, $n_{r,i}(t) = n_{ra,i}(t) + n_{rb}(t)$ – это взаимно независимые белые гауссовские шумы с нулевым средним и спектральными плотностями мощности (СПМ)

$$\begin{aligned}
 & 0,5 \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2 \int_{-\infty}^{\infty} A_{eff}(f, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) B(\bar{\vartheta}') \times \\
 & \quad \times e^{j2\pi f(\bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) \Delta \bar{r}_{ij} c^{-1}} d\bar{\vartheta}',
 \end{aligned}$$

$$0,5 N_{0n} \delta_{ij} \left| \dot{K}(j2\pi f) \right|^2, \quad 0,5 N_{0ra} \delta_{ij}, \quad 0,5 N_{0rb},$$

где $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j, \\ 0 & i \neq j \end{cases}$ – символ Кронекера.

Левая часть (1) содержит информацию о физической сущности восстанавливаемого РМИ, а правая – непосредственно алгоритм оптимальной обработки сигналов (определяет структурную схему системы).

Функция неопределенности, входящая в левую часть (1), имеет вид [3]

$$\begin{aligned} & \Psi_{\text{opt}}(\bar{\vartheta}, \bar{\vartheta}'', \bar{\vartheta}_0, \bar{r}'_i, \bar{r}'_j, \mu_{ij}, \Delta F) = \\ & = \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 A_{\text{eff}}(f, \bar{\vartheta}'' - \bar{\vartheta}_0) |\dot{K}_{\text{Wadd}}(j2\pi f)|^2 df + \\ & + \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 A_{\text{eff}}(f, \bar{\vartheta}'' - \bar{\vartheta}_0) \dot{K}_{\text{Wmult},ij}^2(j2\pi f) \times \\ & \quad \times e^{j2\pi f(\bar{\vartheta}' + \bar{\vartheta} - 2\bar{\vartheta}_0)\Delta\bar{r}'_2 c^{-1}} df. \end{aligned} \quad (7)$$

Предельная погрешность оценивания РМИ

Предельную погрешность найдем обращением элемента матрицы Фишера

$$\Phi_{B(\bar{\vartheta})} = - \left\langle \frac{\delta^2 \ln p[u(t) | B(\bar{\vartheta})]}{\delta B^2(\bar{\vartheta})} \right\rangle,$$

где $\langle \cdot \rangle$ – знак статистического усреднения.

Первая производная логарифма функционала правдоподобия $p[u(t) | B(\bar{\vartheta})]$ найдена в виде [3]

$$\begin{aligned} \frac{\delta \ln p[u(t) | B(\bar{\vartheta})]}{\delta B(\bar{\vartheta})} &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \int_0^T \int_0^T \frac{\delta R_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} \times \\ & \times W_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}')) dt_1 dt_2 - \\ & - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \int_0^T \int_0^T \frac{\delta W_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} u_i(t_1) u_j(t_2) dt_1 dt_2, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\frac{\delta}{\delta B(\bar{\vartheta})}$ – знак вариационной производной по функции $B(\bar{\vartheta})$, $R_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}'))$ – взаимная корреляционная функция наблюдений, определяемая уравнением

$$\begin{aligned} R_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}')) &= \langle u_i(t_1) u_j(t_2) \rangle = \\ & = 0,5 \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 e^{j2\pi f(t_1-t_2)} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}}(f, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) B(\bar{\vartheta}') e^{j2\pi f(\bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0)\Delta\bar{r}'_j c^{-1}} d\bar{\vartheta}' df + \\ & + 0,5 N_{0n} \delta_{ij} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{K}(j2\pi f)|^2 e^{j2\pi f(t_1-t_2)} df + \\ & + 0,5 N_{0ra} \delta_{ij} \delta(t_1 - t_2) + 0,5 N_{0rb} \delta(t_1 - t_2), \end{aligned} \quad (9)$$

$\delta(t_1 - t_2)$ – дельта-функция, $W_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}'))$ – функция, обратная взаимной корреляционной функции, определяемая из уравнения обращения

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^T \int_0^T R_{ik}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}')) W_{kj}(t_2, t_3, B(\bar{\vartheta}')) dt_2 &= \\ & = \delta_{ij} \delta(t_1 - t_3). \end{aligned} \quad (10)$$

Вычисляя повторно вариационную производную от (8) и выполняя операцию статистического усреднения, получим

$$\begin{aligned} \Phi_{B(\bar{\vartheta})} &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \int_0^T \int_0^T \frac{\delta R_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} \times \\ & \times \frac{\delta W_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} dt_1 dt_2. \end{aligned} \quad (11)$$

Согласно (10) вид функций $W_{ij}(t_1, t_2, B(\bar{\vartheta}'))$ удается найти только в простейших случаях. Поэтому дальнейшее решение получим в частотной области, предположив, что все процессы в наблюдении (6) стационарны. Найдем вид (11) в частотной области. Для этого перейдем в (11) к разностному аргументу $\tau = t_1 - t_2$ и, учитывая, что время наблюдения существенно превосходит время корреляции процессов ($T \gg \tau$), получим

$$\Phi_{B(\bar{\vartheta})} = -\frac{T}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\delta R_{ij}(\tau, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} \frac{\delta W_{ij}(\tau, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} d\tau. \quad (12)$$

Это выражение в частотной области примет вид

$$\Phi_{B(\bar{\vartheta})} = -\frac{T}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\delta G_{ij}(f, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} \frac{\delta G_{ij}^{-1}(f, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} df, \quad (13)$$

где $G_{ij}(f, B(\bar{\vartheta}')) = F\{R_{ij}(\tau, B(\bar{\vartheta}'))\}$,

$G_{ij}^{-1}(f, B(\bar{\vartheta}')) = F\{W_{ij}(\tau, B(\bar{\vartheta}'))\}$ – СПМ, полученные применением преобразования Фурье к функциям $R_{ij}(\tau, B(\bar{\vartheta}'))$ и $W_{ij}(\tau, B(\bar{\vartheta}'))$,

$F\{\cdot\}$ – оператор прямого преобразования Фурье.

Найдем вариационные производные, входящие в (13), в виде

$$\frac{\delta G_{ij}(f, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} = 0,5 |K(j2\pi f)|^2 A_{\text{eff}}(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) \times \exp(j2\pi f(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0)\Delta\bar{r}'_j c^{-1}), \quad (14)$$

$$\frac{\delta G_{ij}^{-1}(f, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} = -\frac{\delta G_{ij}(f, B(\bar{\vartheta}'))}{\delta B(\bar{\vartheta})} \frac{1}{G_{ij}^2(f, B(\bar{\vartheta}'))}. \quad (15)$$

Подставив (14), (15) в (13), получим

$$\begin{aligned} \Phi_{B(\bar{\vartheta})} &= \frac{T}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}}^2(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) \times \\ &\times \exp(j4\pi f(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0)\Delta\bar{r}'_j c^{-1}) \times \\ &\times \left[\int_{-\infty}^{\infty} \left[A_{\text{eff}}(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) B(\bar{\vartheta}') \times \right. \right. \\ &\times \left. \exp(j2\pi f(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0)\Delta\bar{r}'_j c^{-1}) \right] d\bar{\vartheta}' \times \\ &\times \left[1 + \mu_{ij}^{-1}(f) \right]^{-2} df. \end{aligned} \quad (16)$$

Подставляя (2), (3) в (7), а затем в (16), получим

$$\Phi_{B(\bar{\vartheta})} = T \Psi_{\text{opt}}(\bar{\vartheta} = \bar{\vartheta}'', \bar{\vartheta}_0, A_{\text{eff}}, \bar{r}'_i, \bar{r}'_j, \mu_{ij}, \Delta F), \quad (17)$$

где $\Psi_{\text{opt}}(\bar{\vartheta} = \bar{\vartheta}'', \cdot)$ – ФН (7), вычисленная в точках $\bar{\vartheta} = \bar{\vartheta}''$.

Тогда предельная погрешность оценки РМИ имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_{B(\bar{\vartheta})}^2 &= \Phi_{B(\bar{\vartheta})}^{-1} = \\ &= T^{-1} \Psi_{\text{opt}}^{-1}(\bar{\vartheta} = \bar{\vartheta}'', \bar{\vartheta}_0, A_{\text{eff}}, \bar{r}'_i, \bar{r}'_j, \mu_{ij}, \Delta F) \end{aligned} \quad (18)$$

и зависит от соотношения сигнал/шум, полосы частот линейной части приемника после декоррелирующего фильтра, базы АР, эффективной площади антенны и времени наблюдения.

Потенциальная флуктуационная чувствительность

Воспользовавшись методикой, изложенной в [4, 5], определим потенциальную флуктуационную чувствительность системы, реализующей оптимальный алгоритм (1), в виде

$$\begin{aligned} \delta B_{\text{min}} &= \sigma_{B(\bar{\vartheta})} = \Phi_{B(\bar{\vartheta})}^{-0,5} = \\ &= T^{-0,5} \Psi_{\text{opt}}^{-0,5}(\bar{\vartheta} = \bar{\vartheta}'', \bar{\vartheta}_0, A_{\text{eff}}, \bar{r}'_i, \bar{r}'_j, \mu_{ij}, \Delta F) = \\ &= \left\{ T \int_{-\infty}^{\infty} \left[A_{\text{eff}}^2(f, \bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0) \left[1 + \mu_{i1}^{-1}(f) \right]^{-2} \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}}(f, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) B(\bar{\vartheta}') d\bar{\vartheta}' \right]^{-2} df + \right. \\ &\left. + T \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} A_{\text{eff}}(f, \bar{\vartheta}' - \bar{\vartheta}_0) B(\bar{\vartheta}') \times \right. \right. \\ &\times \left. \left. \exp(j4\pi f(\bar{\vartheta} - \bar{\vartheta}_0)\Delta\bar{r}'_2 c^{-1}) d\bar{\vartheta}' \right]^{-2} \times \left. \left. \left[1 + \mu_{i2}^{-1}(f) \right]^{-2} \right] df \right\}^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (19)$$

Из анализа (19) следует, что для минимизации δB_{min} необходимо увеличивать время наблюдения и отношение сигнал/шум. Кроме того, из (19) следует, что флуктуационная чувствительность зависит от вида функции неопределенности. Так система более чувствительна к сигналам, приходящим с угловых координат, на которые направлен максимум функции неопределенности системы. Поэтому для повышения флуктуационной чувствительности в заданном направлении требуется расширять рабочую полосу частот, увеличивать время наблюдения, увеличивать эффективную площадь антенны и сужать функцию неопределенности системы.

Рассмотрим (19). Пусть даны две зеркальные антенны, диаметр каждой из которых 0,5 м (база 5 м). Температура объекта 300 К. Полоса рабочих

частот системы 1–5 ГГц. Отношение сигнал/шум равно 1. Выполнив расчеты согласно (19), получим $\delta B_{\min} \approx 2,7 \cdot 10^{-24}$ (соответствует приросту температуры на $\sim 0,01$ К).

Заключение

Впервые исследованы потенциальные характеристики двухантенной СШП системы апертурного синтеза. Найдены выражения для предельных погрешностей оценивания РМИ и потенциальной флуктуационной чувствительности. Показано, что обе характеристики зависят от соотношения сигнал/шум, времени наблюдения, полосы рабочих частот приемника.

Литература

1. Wilson, T. L. *Interferometers and Aperture Synthesis [Text] / T. L. Wilson, K. Rohlf, S. Hüttemeister // Tools of Radio Astronomy. – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 237-288. DOI: 10.1007/978-3-642-39950-3_9.*
2. Волосяк, В. К. *Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации [Текст] : монография / В. К. Волосяк, В. Ф. Кравченко ; под общ. ред. В. Ф. Кравченко. – М. : Физматлит, 2008. – 704 с.*
3. Павликов, В. В. *Статистический синтез алгоритмов формирования радиометрических изображений в двухантенных сверхширокополосных системах апертурного синтеза [Текст] / В. В. Павликов // Физические основы приборостроения. – 2013. – Т. 2, № 2. – С. 88–96.*
4. Волосяк, В. К. *Статистический синтез одноантенных радиометрических приемников модуляционного типа [Текст] / В. К. Волосяк, В. В. Павликов // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Т. 10, № 3. – С. 285-294.*

5. Волосяк, В. К. *Определение чувствительности компенсационного радиометра [Текст] / В. К. Волосяк, В. В. Павликов, С. С. Жила // Радиоэлектронные и компьютерные системы. – 2012. – № 1 (53). – С. 11-21.*

References

1. Wilson, T. L., Hüttemeister, S., Rohlf, K. *Interferometers and Aperture Synthesis. Tools of Radio Astronomy. Springer Berlin Heidelberg Publ., 2013, pp. 237-288. DOI: 10.1007/978-3-642-39950-3_9.*
2. Volosyuk, V. K., Kravchenko, V. F. *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii [Statistical Theory of Radio Engineering Systems of Remote Sensing and Radar]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 704 p.*
3. Pavlikov, V. V. *Statisticheskiy sintez algoritmov formirovaniya radiometricheskikh izobrazheniy v dvukhantennykh sverkhshirokopolosnykh sistemakh aperturnogo sinteza [Statistical synthesis of algorithms for radiometric imaging by the two-antenna ultrawideband aperture synthesis systems]. Fizicheskie osnovy priborostroeniya - Physical Bases of Instrumentation, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 88–96.*
4. Volosyuk, V. K., Pavlikov, V. V. *Statisticheskiy sintez odnoantennykh radiometricheskikh priemnikov modulyatsionnogo tipa [Statistical synthesis of one-antenna chopper radiometers]. Prikladnaya radioelektronika - Applied radioelectronics, 2011, vol. 10, no. 3, pp. 285-294.*
5. Volosyuk, V. K., Pavlikov, V. V., Zhyla, S. S. *Opredelenie chuvstvitel'nosti kompensatsionnogo radiometra [Determination of the compensation radiometer sensitivity]. Radioelektronnye i komp'yuternye sistemy – Radioelectronic and computer systems, 2012, no. 1 (53), pp. 11-21.*

Поступила в редакцию 04.07.2016, рассмотрена на редколлегии 16.09.2016

ПОТЕНЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОАНТЕННИХ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИСТЕМ АПЕРТУРНОГО СИНТЕЗУ

О. М. Тимошук

Системи апертурного синтезу використовуються для формування радіометричних зображень (РМЗ) високого просторового розрізнення. Базовим елементом такої системи є двоантенний радіоінтерферометр. Алгоритми оптимального і квазіоптимального відновлення РМЗ з використанням такого радіоінтерферометра при обробці надширококустових просторово-часових сигналів відомі. У той же час питання точності оцінювання РМЗ і потенційної флуктуаційної чутливості таких систем не досліджені. У статті вперше отримано і

досліджено аналітичні вирази для граничної похибки оцінювання РМЗ і потенційної флуктуаційної чутливості двоантенної надширококугової системи апертурного синтезу, яка забезпечує високе просторове розрізнення по кутовим координатам.

Ключеві слова: двоантенна надширококугова система апертурного синтезу, радіометричне зображення, гранична похибка оцінювання радіометричного зображення, потенційна флуктуаційна чутливість.

POTENTIAL CHARACTERISTICS OF TWO ANTENNAS UWB APERTURE SYNTHESIS SYSTEMS

O. M. Tymoshchuk

For radiometric imaging (RMI) with high spatial resolution are used aperture synthesis systems. The basis cell of such system is the two-antennas radio interferometer. Optimal and quasioptimal algorithms for passive radar imaging by it radio interferometer with ultrawideband spatio-temporal signal processing are known. At the same time questions the limit estimation error of the RMI and the potential fluctuation sensitivity of such systems are not investigated. In the article for the first time the analytical expressions for the limit estimation error of RMI and the potential fluctuation sensitivity of two-antenna UWB aperture synthesis system that provides a high spatial resolution of the angular coordinates are obtained and investigated.

Key words: two-antenna ultrawideband aperture synthesis systems, passive radar image, limit estimation error of a passive radar image, potential fluctuation sensitivity.

Тимошук Елена Николаевна – канд. экон. наук, доцент, и.о. директора Института водного транспорта в Киевской государственной академии водного транспорта имени гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Киев, Украина, e-mail: omtymoshchuk@gmail.com.

Tymoshchuk Olena Mykolaivna – Candidate of Economic Sciences, Assistant Professor, Acting Director of the Institute of Water Transport in Kyiv State Academy of Water Transport named after Hetman Petro Konashevich Sagaidachny, Kiev, Ukraine, e-mail: omtymoshchuk@gmail.com.