

УДК 621.396.962

И.В. БУНЯЕВА¹, А.П. ВЕРЕЩАК²

¹ *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина*

² *ОАО “АО НИИРИ”, Украина*

РАДИОМЕТР С ПРОДОЛЬНОМ СИНТЕЗОМ АПЕРТУРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Рассмотрена задача продольного синтеза апертуры в пассивной радиометрии при дистанционном зондировании Земли с аэрокосмических носителей. В качестве приемной антенны используется двухэлементный интерферометр, база которого ориентирована специальным образом относительно вектора скорости платформы. В статье получены: алгоритм оптимальной обработки сигналов, выражения для функции неопределенности и чувствительности такой системы. Возможности системы демонстрируются на иллюстративных примерах.

радиометр, интерферометр, функция неопределенности, чувствительность, разрешающая способность

Введение

В последние годы специалистами активно обсуждаются возможности использования методов радиоастрономии [1] для задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с аэрокосмических носителей [2 – 10]. При этом наиболее эффективными оказываются методы обработки радиотепловых сигналов, учитывающие взаимное перемещение измерительной системы и поверхности Земли [4, 5, 8, 9].

Говоря об использовании методов радиоастрономии в задачах ДЗЗ, необходимо учитывать несколько аспектов. Прежде всего, в отличие от радиоастрономии, имеющей дело с объектами малой угловой протяженности, в задачах ДЗЗ наблюдаемые объекты (поверхность Земли) существенно протяжены. При этом воспроизведению подлежат не только высокие пространственные частоты, но и весь спектр пространственных частот излучения участков зондируемой поверхности Земли. Во-вторых, взаимное перемещение платформы с инструментом и наблюдаемой поверхности при ДЗЗ является линейным и нелинейным (за счет вращения Земли) при радиоастрономических наблюдениях. Наконец, в-третьих, алгоритмы обработки радио-

астрономических наблюдений зачастую получены на основе интуитивных, эвристических подходов и ориентированы на использование длительных (часы, сутки) интервалов наблюдения [1].

В отличие от задач активной локации, в пассивной радиометрии синтез апертуры возможен как вдоль траектории полета платформы, так и в поперечном направлении (двумерный синтез). Кроме того, синтез возможен только при использовании в качестве антенн антенных решеток, а геометрические размеры синтезируемого раскрытия не могут превышать максимального размера баз в антенной решетке – происходит только “заполнение” дискретного раскрытия (точнее, области определения функции пространственной корреляции) [4]. Алгоритмы обработки оказываются проще в случае, если задачи синтеза апертуры (диаграммообразования) в продольном и поперечном направлениях факторизованы, разделены. Экономные (в плане сложности обработки) методы формирования диаграмм направленности в поперечном полете направлении хорошо изучены [2 – 4]. Первая радиометрическая система с синтезом апертуры вдоль траектории полета была запатентована в 1991 г. [8, 9]. Система использовала двухэлементный интерферометр с базой, ориенти-

рованной вдоль вектора скорости платформы. Аналогичный интерферометр, но с вертикальным расположением базы, рассмотрен в [5]. Общим недостатком обеих систем является низкое качество формируемого радиояркого изображения, обусловленное высоким уровнем боковых лепестков аппаратной функции (функции неопределенности) системы. Этому недостатка лишена радиометрическая система, использующая сильно разреженную линейную антенную решетку (4 – 5 элементов), ориентированную вдоль вектора скорости платформы [4], однако обработка принимаемых сигналов в такой системе оказывается сложнее.

В настоящей статье в предположении, что разрешение в поперечном направлении обеспечивается одним из известных методов, рассмотрена задача продольного синтеза апертуры в пассивной радиометрии. В качестве приемной антенны используется двухэлементный интерферометр, база которого ориентирована относительно вектора скорости платформы. В статье получены алгоритм оптимальной обработки сигналов, функция неопределенности и чувствительность такой системы. Возможности системы демонстрируются на иллюстративных примерах.

Постановка задачи. Геометрия задачи изображена на рис. 1. Для упрощения, без потери общности, Земля предполагается плоской. Излучающая поверхность S с элементом $\Delta S = \Delta x \Delta y$ параллельна плоскости xoy . В плоскости xoz находятся две антенны, размещенные на платформе (искусственном спутнике Земли) с высотой орбиты $z = h$, перемещающейся с постоянной скоростью V вдоль оси x . Положение фазовых центров антенн 1 и 2 определяется векторами $\bar{R}_1(t) = \bar{V}t - \bar{D}/2$ и $\bar{R}_2(t) = \bar{V}t + \bar{D}/2$, где $\bar{D} = (D \cos \alpha, 0, D \sin \alpha)$ – вектор базы интерферометра.

Координата излучающего элемента ΔS задана вектором \bar{R} ($\bar{R}_S = (x, y)$ в плоскости S).

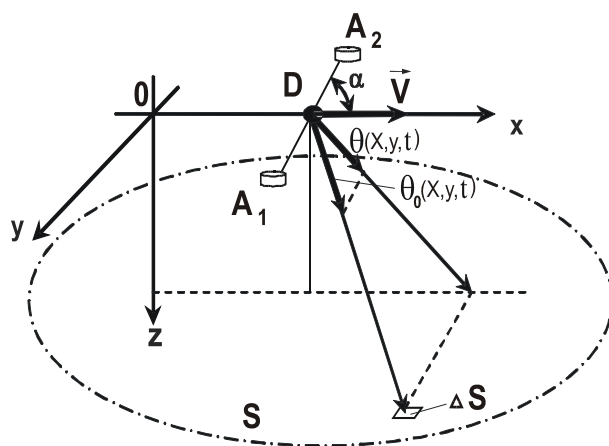


Рис. 1. Геометрия задачи

Положение центра O_1 интерферометра относительно элемента ΔS определяется вектором $\bar{R}_0(t) = \bar{R} - \bar{V}t$, а направление на ΔS – единичным вектором

$$\bar{\theta}_0(x, y, t) = \bar{R}_0(x, y, t) / R_0(x, y, t),$$

или его проекцией

$$\bar{\theta}(x, y, t) = (\theta_x(x, y, t), \theta_z(x, y, t))$$

на плоскость xoz . При этом

$$\theta_x(x, y, t) = \frac{x - vt}{\sqrt{(x - vt)^2 + y^2 + h^2}}, \quad (1)$$

$$\theta_z(x, y, t) = \frac{h}{\sqrt{(x - vt)^2 + y^2 + h^2}}. \quad (2)$$

Антенны имеют одинаковые нормированные диаграммы направленности $F(x, y, t)$ по полю

$$F(x, y) = \exp \left[- \left(\frac{(x - vt)^2}{2X^2} + \frac{y^2}{2Y^2} \right) \right], \quad (3)$$

ориентированные своими максимумами в надир, а приемные устройства – одинаковые частотные характеристики $H(f)$:

$$H(f) = \begin{cases} 1/2, & \text{if } |f - f_0| \leq F; \\ 0, & \text{if } |f - f_0| > F \end{cases}$$

с центральной частотой f_0 и эквивалентной шумовой полосой $2F$. В (1), (2) x и y – ширина по половинной мощности диаграммы направленности по соответствующим осям. Обычно $x = y$, при этом

поле зрения интерферометра – круг радиусом $x/2$.

Излучение поверхности S будем характеризовать спектрально-пространственной плотностью $\dot{A}(x, y, f)$ комплексных амплитуд радиоизлучения в точке $R(t) = (vt, 0, 0)$, являющейся нормальным случайным полем с нулевым средним и корреляционной функцией

$$\left\langle \dot{A}(x_1, y_1, f_1) \cdot \dot{A}^*(x_2, y_2, f_2) \right\rangle = \frac{B(x_1, y_1)}{4\pi(h^2 + x_1^2 + y_1^2)} \times \delta(x_1 - x_2) \delta(y_1 - y_2) \delta(f_1 - f_2). \quad (4)$$

Функция $B(x_1, y_1)$ имеет смысл спектрально-пространственной плотности потока мощности (радиояркости) радиоизлучения, восходящего от точки с координатами (x, y) поверхности S , величину которой в пределах полосы пропускания радиометрической системы положим постоянной.

Сигнал $\dot{S}_i(t)$, принимаемый в дальней зоне i -м элементом антенны от поверхности S , определяется соотношением:

$$\dot{S}_i(t) = \sqrt{G_0} \int_F \int_S F(x, y, t) \cdot \dot{A}(x, y, f) H(f) \times \exp\left\{-j2\pi f \left[t - (i - 3/2)\bar{D} \cdot \bar{\theta}(x, y, t) / c\right]\right\} df dx dy, \quad (5)$$

где $i = 1, 2$, c – скорость света, G_0 – коэффициент усиления элемента антенной решетки по мощности.

Будем полагать, что длина базы интерферометра такова, что всегда выполняется условие пространственно-временной узкополосности принимаемых колебаний ($D/c \ll 1/2F$).

При этом временные сдвиги в (5) могут быть заменены фазовыми и выражение (5) примет следующий вид:

$$\dot{S}_i(t) = \sqrt{G_0} \int_F \int_S F(x, y, t) \cdot \dot{A}(x, y, f) H(f) e^{-j2\pi ft} \times \exp\left\{j2\pi(i - 3/2)\bar{D} \cdot \bar{\theta}(x, y, t) / \lambda_0\right\} df dx dy, \quad (6)$$

$i = 1, 2.$

Прием сигналов $\dot{S}_i(t)$ осуществляется на фон нормальных помех $\dot{n}_i(t)$, обусловленных фоновым излучением поверхности, а также пересчитанными

на выход элемента решетки тепловыми шумами приемного устройства. При этом $\langle \dot{n}_i(t) \rangle = 0$, $i = 1, 2$, а

$$\left\langle \dot{n}_i(t_1) \cdot \dot{n}_k^*(t_2) \right\rangle = N_0 \delta_{ik} \rho(t_1 - t_2), \quad i, k = 1, 2, \quad (7)$$

где N_0 – спектральная плотность мощности тепловых шумов приемников;

$$\rho(\tau) = R(\tau) \cos(2\pi f_0 \tau) \quad - \quad \text{автокорреляционная}$$

функция шумов, определяемая частотной характеристикой $H(f)$ приемников;

δ_{ik} – символ Кронекера.

Отметим, что автокорреляционная функция полезных сигналов на выходах приемных каналов будет точно такой же. При этом

$$R(\tau) = \text{Sinc}(2\pi F\tau), \quad (8)$$

где $\text{Sinc}(x) = \sin(x)/x$.

На вход устройства обработки поступают колебания

$$U_i(t) = \dot{S}_i(t) + n_i(t), \quad i = 1, 2. \quad (9)$$

Требуется по реализациям $\dot{U}_i(t)$, $i = 1, 2$ сформировать на интервале наблюдения $t \in T$ оценку $\hat{B}(x, y)$ распределения радиояркости излучения поверхности S и определить ее характеристики.

Алгоритм обработки

Легко показать [13], что при выбранной модели полезных сигналов и помех, оценка максимального правдоподобия радиояркости $\hat{B}(x, y)$ определяется соотношением:

$$\hat{B}(x, y) = \text{Re} \left\{ \int_T \tilde{U}_1(t) \tilde{U}_2^*(t) \exp\left\{j2\pi \bar{D} \bar{\lambda} \cdot \bar{\theta}(x, y, t)\right\} dt \right\}. \quad (10)$$

Здесь $\tilde{U}_i(t)$ – колебание $\dot{U}_i(t)$, прошедшее через полосовой фильтр соответствующего приемника, $\bar{D} \bar{\lambda} = \bar{D} / \lambda_0$ – относительный (отнесенный к длине волны принимаемого излучения) вектор базы.

Длительность интервала времени T не превы-

шает величины x/v – времени пролета платформой поля зрения интерферометра.

Учитывая далее, что развертка изображения вдоль оси x осуществляется за счет движения спутников, получим рабочий алгоритм обработки принимаемых колебаний:

$$\hat{B}(x, y) = \operatorname{Re} \left\{ \int_{x/v-T/2}^{x/v+T/2} \tilde{U}_1(t) \tilde{U}_2^*(t) \exp \{ j 2 \pi \bar{D}_\lambda \cdot \bar{\theta}(x, y, t) \} dt \right\}, \quad (11)$$

$$|y| \leq Y/2.$$

При этом к моменту времени $t = x/v + T/2$ завершается формирование оценки радиояркости для точки с координатами (x, y) .

Качество решения

Найдем статистические характеристики функции $\hat{B}(x, y)$ (выходного эффекта радиометрической системы). Для этого выделим его сигнальную $B_s(x, y)$ и помеховую $B_n(x, y)$ составляющие.

В первую очередь найдем характеристики сигнальной составляющей

$$\hat{B}_s(x, y) = \operatorname{Re} \left\{ \int_{x/v-T/2}^{x/v+T/2} \dot{S}_1(t) \dot{S}_2^*(t) \exp \{ j 2 \pi \bar{D}_\lambda \cdot \bar{\theta}(x, y, t) \} dt \right\}. \quad (12)$$

Математическое ожидание случайной функции $B_s(x, y)$, распределенной по нормальному закону, при $2FT \gg 1$, с учетом (4) и (6), оказывается пропорциональным свертке радиояркости $B(x, y)$ с функцией неопределенности $\Psi(x_1, y_1; x, y)$ системы

$$\langle B_s(x, y) \rangle = \frac{G_0 2 \cdot 2FT}{4\pi} \times \int_S \frac{B(x_1, y_1)}{h^2 + x_1^2 + y_1^2} \Psi(x_1, y_1; x, y) dx_1 dy_1. \quad (13)$$

При этом функция неопределенности (нормированная реакция радиометра на точечный источник излучения) описывается соотношением

$$\Psi(x_1, y_1; x, y) = \int_{x/v-T/2}^{x/v+T/2} F^2(x_1, y_1, t) \times \cos \{ 2 \pi \bar{D}_\lambda \cdot [\bar{\theta}(x_1, y_1, t) - \bar{\theta}(x, y, t)] \} dt. \quad (14)$$

На рис. 2 приведено тело неопределенности, построенное в соответствии с (14) при $x_1 = y_1 = 0$ для следующих значений параметров радиометрической системы: $h = 750$ км; $v = 7,5$ км/с; $x = y = 1000$ км; $\alpha = 45^\circ$; $D_\lambda = 25$.

На рис. 3 показан центральный фрагмент тела неопределенности. Видно, что рассматриваемый интерферометр обеспечивает хорошую разрешающую способность в направлении вектора скорости платформы (вдоль оси x). В поперечном направлении изображение точечного излучателя сильно размыто. Это означает, что в этом направлении разрешение должно обеспечиваться, как это уже отмечалось выше, другими средствами.

В качестве примера рассмотрим интерферометр, на концах базы которого установлены линейные антенны (антенные решетки), обеспечивающие формирование элемента разрешения в поперечном полету направлении.

Практически это может быть многолучевая антенная решетка, типа рассмотренной в [3], формирующая веер перекрывающихся на уровне -3 дБ диаграмм направленности вида:

$$F_l(x, y, t) = \exp \left[- \frac{(x - vt)^2 h^2}{2(X)^2 (h^2 + y^2)} \right] \exp \left[- \frac{(y - l\Delta y)^2}{2\Delta y^2} \right],$$

$$\ell = -\vec{L}, \vec{L}. \quad (15)$$

Тело неопределенности соответствующей системы (рис. 4) будет содержать один узкий выброс и описываться соотношением:

$$\Psi(x_1, y_1; x, y) = \int_{x/v-T/2}^{x/v+T/2} F_0^2(x_1, y - y_l, t) \times \cos \{ 2 \pi \bar{D}_\lambda \cdot [\bar{\theta}(x_1, y_l, t) - \bar{\theta}(x, y, t)] \} dt, \quad (16)$$

$$(|y|, |y_l|) \leq Y/2.$$

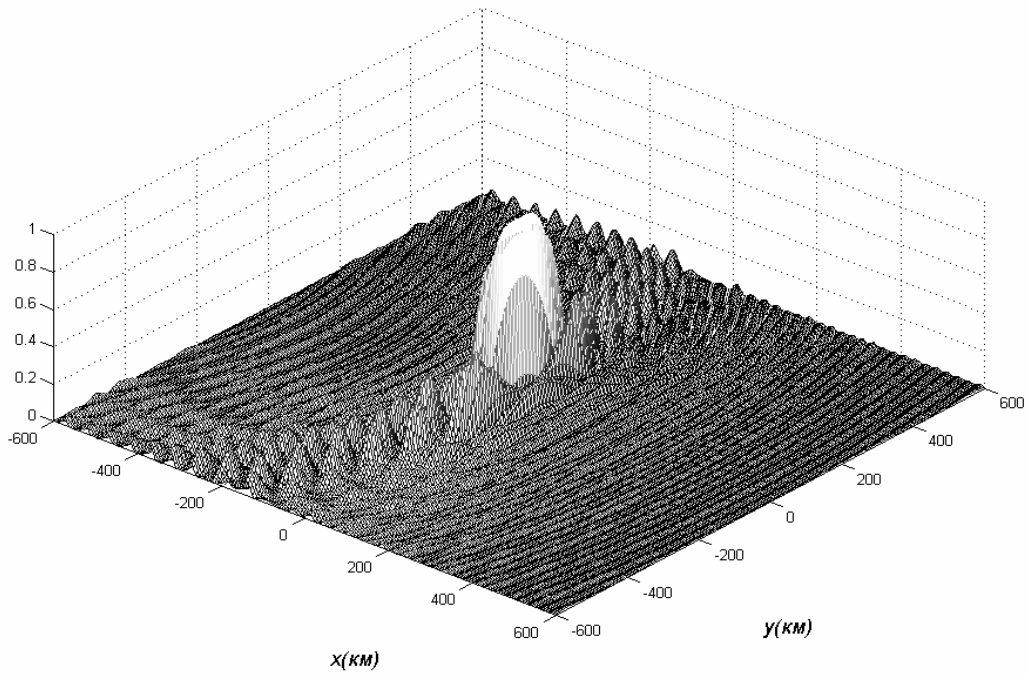


Рис. 2. Тело неопределенности, формируемое интерферометром

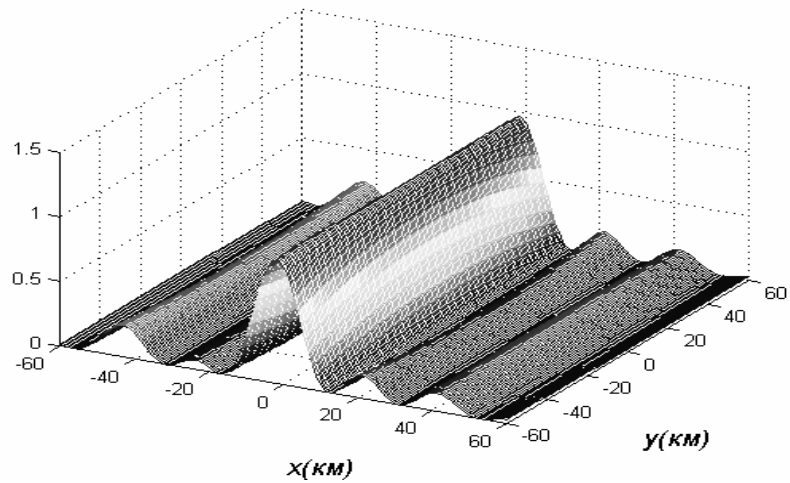


Рис. 3. Центральный фрагмент тела неопределенности

Учитывая сказанное, выражение (12) можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \langle Z_S(x, y) \rangle &\approx 2 \cdot 2FT \frac{G_0 \tilde{B}(x, y) \Delta x \Delta y}{4\pi(h^2 + x^2 + y^2)} \approx \\ &\approx 2 \cdot 2FT \tilde{B}(x, y) \frac{\Delta x}{X}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $\tilde{B}(x, y)$ – усредненная на элементе разрешения радиояркость, и, кроме того, учтено, что коэффици-

ент усиления антенны связан с сечением $\Delta y \times x$ ее диаграммы направленности (16) на расстоянии $\sqrt{h^2 + x^2 + y^2}$ от нее соотношением:

$$G_0 = \frac{4\pi(h^2 + x^2 + y^2)}{\Delta y \cdot X}.$$

Это значит, что математическое ожидание выходного эффекта радиометрической системы про-

порционально распределению радиояркости излучающей поверхности, сглаженному аппаратной функцией системы.

Учитывая малость отношения сигнал/шум на выходе одного элемента интерферометра, в помеховой составляющей будем с достаточной для практики точностью учитывать только слагаемое, содержащее произведение $\dot{n}_1(t) \cdot \dot{n}_2^*(t)$, тогда

$$B_n(x, y) \approx \operatorname{Re} \left[\int_{x/v-T}^{x/v} \dot{n}_1(t) \cdot \dot{n}_2^*(t) \exp \{ j 2\pi \bar{D}_\lambda \cdot \bar{\theta}(x, y, t) \} dt \right] \quad (18)$$

Нормальная случайная функция $B_n(x, y)$ имеет нулевое математическое ожидание и корреляцион-

ную функцию, равную

$$\begin{aligned} \langle B_n(x_1, y_1) \cdot B_n(x_2, y_2) \rangle = \\ = N_0^2 2 \cdot 2FT \int_{x/v-T/2}^{x/v+T/2} F_0^2(x_1, y_2 - y_1, t) \times \\ \times \cos \{ 2\pi \bar{D}_\lambda \cdot [\bar{\theta}(x_1, y_1, t) - \bar{\theta}(x_2, y_2, t)] \} dt. \end{aligned} \quad (19)$$

Отношение сигнал/шум μ на выходе радиометрической системы [2, 4] принято характеризовать отношением математического ожидания сигнальной составляющей к среднему квадратичному значению помеховой составляющей, т.е.

$$\mu = \frac{\langle B_S(x, y) \rangle}{\sqrt{\langle B_n^2 \rangle}} = \frac{B(x, y)}{N_0} \sqrt{2 \cdot 2FT} \cdot \frac{\Delta x}{X}. \quad (20)$$

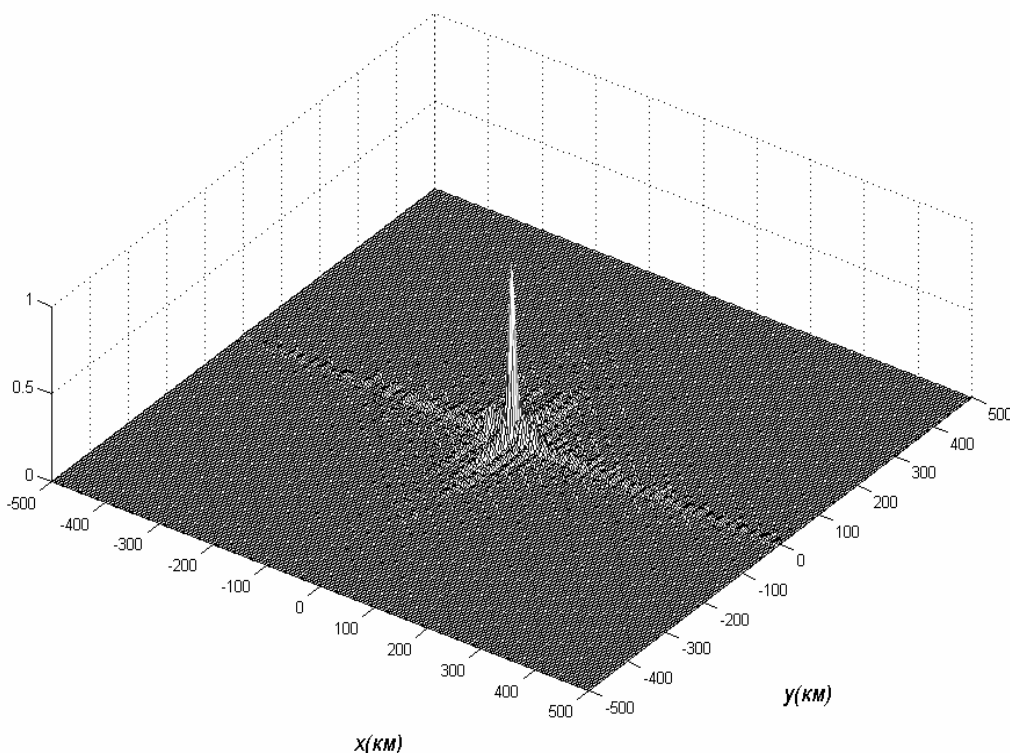


Рис. 4. Тело неопределенности, формируемое интерферометром с антенными решетками

Чувствительность радиометрической системы

Чувствительность ΔT радиометрической системы принято [2] характеризовать величиной измеряемой радиояркости, выражаемой в радиоярост-

ной температуре, при которой отношение сигнал/шум μ на выходе системы равно единице. В соответствии с (19):

$$\Delta T = \frac{T_s}{\sqrt{2FT}} \frac{X}{\sqrt{2\Delta x}}, \quad (21)$$

где $T_s = N_0 / k$ – шумовая температура системы;

k – постоянная Больцмана.

Сомножитель $T_s / \sqrt{2FT}$ совпадает с выражением для чувствительности типового радиометра с апертурной (сплошной) антенной [2].

Второй сомножитель в (21), равный отношению ширины полосы обзора к ширине интервала разрешения, характеризует ухудшение чувствительности рассматриваемой радиометрической системы по отношению к типовой (при равных временах накопления). Причиной этого эффекта является уменьшение «заполнения» диаграммы направленности антенны излучением пикселя в $\Delta x / X$ раз по сравнению со сканирующим радиометром, где угловой размер пикселя радиоизображения поверхности совпадает с шириной диаграммы направленности антенны.

«Соотношение неопределенности» рассматриваемой радиометрической системы на основании (21) при $T = x/V, \Delta x = \Delta y$ имеет следующий вид:

$$\Delta T \Delta x \geq T_s \sqrt{\frac{Xy}{2 \cdot 2F}}. \quad (22)$$

В качестве практического примера определим основные характеристики радиометра-интерферометра высокого разрешения L-диапазона, предназначенного для определения влажности почвы и солености океана.

В качестве исходных данных примем проектные характеристики системы SMOS европейского космического агентства [7]:

- ширина полосы обзора $Y = 1000$ км;
- разрешающая способность на краю полосы обзора $\Delta S = 50 \times 50$ км²;
- радиометрическая чувствительность $\Delta T = 1$ К;
- шумовая температура системы $T_s = 250$ К;
- полоса частот приемного тракта $2F = 19$ ММГц;
- несущая частота $f_0 = 1,43$ ГГц;
- высота орбиты спутника $h = 750$ км;
- скорость движения спутника $V = 7,5$ км/с.

Используя полученные выше соотношения, находим:

- длина антенны (перпендикулярно вектору скорости) $L_y = \lambda R / \Delta y = 3,78$ м;
- ширина антенны $L_x = \lambda h / X = 0,1575$ м;
- длина базы интерферометра $D = \lambda R / \Delta x = 3,78$ м;
- длительность интервала обработки $T = x/V \cong 13$ с;
- чувствительность радиометра $\Delta T = 0,07$ К.

Здесь $R = (h^2 + Y^2 / 4)^{0,5}$ – расстояние от центра базы до края полосы обзора.

Имеющийся в данном случае запас по чувствительности может быть использован для уменьшения числа элементов в антенных решетках интерферометра.

Обсуждение результатов

Проведенное рассмотрение показывает принципиальную возможность создания на основе простейшего интерферометра радиометрических систем исследования природных ресурсов Земли из космоса с высокой разрешающей способностью и чувствительностью. При этом требуемые характеристики радиометрических систем достигаются с помощью антенн с небольшой физической площадью и, следовательно, с приемлемой для использования на ИСЗ массой.

Радиометрические системы, реализующие полученные выше алгоритмы, позволяют реализовать высокую разрешающую способность в традиционных диапазонах длин волн (миллиметровых и сантиметровых), а также создавать радиометрические системы в еще неосвоенных дециметровом и метровом диапазонах.

Заключение

Определены потенциальные возможности (разрешающая способность и чувствительность) радиометрических систем на основе простейших интер-

ферометров с синтезом апертуры и их связь с параметрами систем. Получены простые в реализации алгоритмы обработки сигналов в таких системах.

На примере радиометрической системы L-диапазона показано, что основное достоинство радиометров-интерферометров с продольным синтезом апертуры состоит в том, что они обеспечивают необходимые пространственное разрешение и чувствительность антенными системами с малой физической поверхностью – порядка единиц процентов от площади антенны эквивалентного по характеристикам типового радиометра при сопоставимой сложности аппаратуры обработки.

Литература

1. Thompson A.R., Moran J.M., Swenson G.W. Interferometry and synthesis in radio astronomy. – Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1994. – P. 236-248.
2. Ruf C.S., Swift C.T. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth // IEEE Trans. GRS. – 1998. – Vol. 26. – P. 597-611.
3. Le Vine D.M., Kao M. Initial results in the development of a synthetic aperture microwave radiometer // IEEE Trans. GRS. – 1990. – Vol. 28. – P. 614-619.
4. Пискорж В.В., Кирилюк В.М., Верещак А.П. Радиометрические системы с синтезированием апертуры для исследования природных ресурсов Земли из космоса // Космічна наука і технологія. – 1995. – № 2. – С. 15-23.
5. Komiyama K. High resolution imaging by super synthesis (SSR) for the passive microwave remote sensing of the earth // Electronic Letters. – 1996. – Vol. 27. – P. 389-390.
6. Laursen B. The TUD synthetic aperture radiometer demonstrate model // Proceeding of the Remote Sensing of the Environments. – Rome, Feb., 1994. – 5 p.
7. Martin-Neira M. Integration of MIRAS breadboard and future activities // Proceedings of IGARSS'96. – 1996. – 3 p.
8. Edelsohn C. RADSAR (RADiometric SAR) experimental results // Proceeding of IGARSS'98. – 1998. – 5 p.
9. Фалькович С.Е., Волосяк В.К., Горбуненко О.А. Радиотехнические системы дистанционного зондирования: Учебн. пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2002. – 157 с.
10. Dong X.L., Wu J., Jiang J.S. The signal analysis and imaging of synthetic aperture radiometer // Proceedings of IGARSS,98. – 1998. – 4 p.
11. Jackson T.J., Le Vine D.M., Swift C.T., Schmugge T.J., Schiebe F.R. Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita'92 // Remote sensing of Environment. – 1992. – Vol. 53. – P. 438-447.
12. Le Vine D.M. Passive microwave remote sensing with the synthetic aperture radiometer ESTAR during the southern great plane experiments // Proceeding of IGRASS'98. – 1998. – 5 p.
13. 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.

Поступила в редакцию 27.12.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосяк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.