

**В. В. Кудряшев, К. А. Лукин, В. П. Паламарчук, П. Л. Выплавин**  
*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины*  
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
E-mail: [Lukin.Konstantin@Gmail.com](mailto:Lukin.Konstantin@Gmail.com)

## **ФОРМИРОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ 8-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН С ПОМОЩЬЮ НАЗЕМНОГО ШУМОВОГО РАДАРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ**

Радиометрический мониторинг позволяет получать уникальную информацию об излучении объектов. При этом для исследования не требуется формировать и излучать зондирующий сигнал. Известные конструкции радиометров не позволяют получить разрешение по двум координатам при использовании широко направленных антенн. Рассматривается принцип формирования радиометрических изображений на малых расстояниях с разрешением по направлениям дальность–азимут. Для этого используется схема интерференционного радиометра и принцип синтеза апертуры. Описывается предлагаемый способ формирования радиометрических изображений, приводятся результаты его экспериментального исследования с помощью аппаратуры 8-мм шумового наземного радара с синтезированием апертуры. Получены радиометрические изображения тестового объекта, подтверждена возможность регистрации радиотеплового излучения с помощью изучаемой аппаратуры. Результаты могут быть использованы для обнаружения скрытых объектов для обеспечения безопасности. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 28 назв.

**Ключевые слова:** интерферометрический радиометр, пассивный радар с синтезированной апертурой антенн.

Для получения двумерных изображений удаленных объектов по их собственному излучению успешно используют интерферометрические системы, принцип работы которых основан на измерении разности фаз регистрируемого излучения от источника до двух и более приемных антенн [1–8]. Этот подход получил всестороннее развитие в радиоастрономии для улучшения углового разрешения радиотелескопов [9–10]. В миллиметровом диапазоне длин волн для получения изображений широко используется многоканальный прием с помощью одномерной решетки ориентированной в одном из направлений и механическое (или частотное) сканирование в перпендикулярном ему направлении [11–13]. Дальнейшее развитие этого подхода состоит в реализации идей двумерного синтеза апертур, что дало возможность получать когерентные радиометрические изображения в плоскости поперечной к направлению приема излучения, содержащие информацию не только об амплитуде (яркости) каждого пикселя изображения, но и о его относительной фазе [14–20]. Получение радиометрических изображений в плоскости азимут–дальность изучалось в работе [2], в которой была рассмотрена принципиальная возможность получения радиометрического изображения путем совместного использования отклика радиоинтерферометра и информации об угле приема узконаправленной антенной, установленной на один из приемников радиоинтерферометра. Каждый пиксель такого изображения получается как фокусирование области равной разности фаз принимаемого сигнала (отклика радиоинтерферометра) узкой диаграммой одной из приемных антенн интерферометра. Однако в [2] не изучены факторы, ограничивающие измеряемые разности фаз, не показаны особенности реализации радиоинтерферометра с

цифровой обработкой сигналов в частотной области [21, 22], а также не рассматривалась возможность получения когерентных радиометрических изображений с помощью совместного использования принципов радиоинтерферометрии и синтеза апертур приемных антенн. Кроме того, не рассматривались особенности формирования когерентных радиометрических изображений при дискретном сканировании приемной антенны.

Целью работы является обоснование принципа формирования когерентных радиометрических изображений в плоскости азимут–дальность с использованием антенн с синтезированием диаграммы направленности (АСДН) [23, 24] и его реализация в наземном шумовом радаре (НШР) с АСДН [25–27], модифицированном для работы в режиме радиоинтерферометра с АСДН.

**1. Формирование когерентных радиометрических изображений с использованием аппаратуры НШР с АСДН.** Предлагаемый подход к формированию когерентных радиометрических изображений состоит в использовании радиоинтерферометра, одна из приемных антенн которого перемещается для синтеза апертуры. Такая схема позволяет разрешать объекты в плоскости азимут–наклонная дальность и формировать когерентные радиометрические изображения. Предполагается, что каждый точечный источник излучения зоны обзора неподвижен за время перемещения антенны. Информация о положении такого объекта относительно приемных антенн позволяет учитывать разность фаз принимаемого сигнала, что определяет опорную функцию в каждом положении антенны. Выполнение свертки выходного сигнала радиоинтерферометра с опорной функцией позволяет сформировать двумерное радиометрическое изображение и улучшить пространственную разрешающую спо-

способность радиоинтерферометра. В работе изучена возможность формирования когерентных радиометрических изображений с помощью такого подхода на малых дальностях.

На каждом интервале времени радиометрического измерения  $t \in [0; T]$ , где  $T$  – время наблюдения, приемные антенны радиоинтерферометра неподвижны. Перемещение одной из антенн производится между измерениями. Такое перемещение осуществляет антенна АСДН [23, 24], которая реализует пошаговое смещение приемной антенны радиоинтерферометра. Объекты зоны обзора радиоинтерферометра неподвижны в течение радиометрических измерений и сканирования АСДН.

Сигнал, излучаемый точечным объектом с координатами  $(x, y)$ , поступает в приемные пункты радиоинтерферометра с относительным запаздыванием  $\Delta\tau(x, y) = \frac{\Delta l(x, y)}{c}$ , где  $\Delta l(x, y) = l_1(x, y) - l_2(x, y)$  – разность наклонных дальностей (разность хода) от объекта до первой и второй приемных антенн, соответственно [2]. В каждом положении  $a$  щели на АСДН относительное запаздывание  $\Delta\tau(x, y)$  равно

$$\Delta\tau_a(x, y) = \frac{\Delta l_a(x, y)}{c}. \quad (1)$$

В случае изотропных приемных антенн разность хода  $\Delta l(x, y)$  ограничена расстоянием между ними – базой радиоинтерферометра  $l_B$ :  $\Delta l \in [-l_B; l_B]$ .

Оценка взаимной корреляционной функции  $R_a(\tau, T)$  между опорным сигналом на выходе первого радиоприемного устройства  $S_1(t)$  и сигналом на выходе второго радиоприемного устройства  $S_2(t + \Delta\tau(x, y))$  [2] в каждом положении  $a$  приемной щели на АСДН равна

$$\hat{R}_a(\tau, T) = \frac{1}{T} \int_0^T S_{1,a}^*(t) S_{2,a}(t + \Delta\tau(x, y) - \tau) dt, \quad (2)$$

где  $\tau$  – задержка сигнала, вводимая для компенсации  $\Delta\tau_a(x, y)$ , причем  $\tau \in \left[-\frac{l_B}{c}; \frac{l_B}{c}\right]$ ;  $T$  – время

усреднения;  $t \in [0; T]$  – время каждого радиометрического измерения; символ \* означает комплексное сопряжение.

Сжатие сигнала по разности хода представляет собой оценку взаимных корреляционных функций  $R_a(\tau, T)$  для необходимых значений относительного запаздывания сигнала в каждом положении антенны на апертуре АСДН. При перемещении приемной антенны вдоль апертуры

АСДН длина  $l_a$  распространения сигнала  $S_2(t + \Delta\tau(x, y))$  в волноводе АСДН изменяется. При оценке соответствующего изменения набега фазы принимаемого сигнала  $\varphi_a$  следует учитывать дисперсию его фазовой скорости. Этот набег удобно вычислять в частотной области для каждой спектральной составляющей, который для используемого основного типа волны равен [28]

$$\varphi_a(\lambda_i) = 2\pi l_a \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\lambda_i^2} - \frac{1}{(2p)^2}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_i = \frac{c}{f_i}$  – длина волны для данной частоты  $f_i$

радиоспектра в свободном пространстве;  $\varepsilon, \mu$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды заполнения АСДН (воздуха);  $p$  – размер широкой стенки волновода АСДН.

Для повышения эффективности вычисления взаимной корреляционной функции мы пользуемся известным быстрым алгоритмом, включающем в себя вычисление дискретных спектров сигналов, их произведение и выполнение обратного преобразования Фурье результата. Такая оценка взаимной корреляционной функции (2) с учетом набегов фазы в волноводе (3) имеет вид

$$\hat{R}_a(\tau) = \sum_{i=1}^{N_f} S_{1,a}^*(f_i) S_{2,a}(f_i) e^{-j\varphi_a(f_i)} e^{j2\pi f_i \tau}, \quad (4)$$

где  $i$  – номер частотной составляющей,  $N_f$  – число частотных составляющих в дискретном спектре,  $f_i$  – частоты фурье-спектров принимаемых сигналов, ограниченные полосой пропускания радиоприемных устройств  $f_i \in [f_{\min}; f_{\max}]$ ;  $f_{\min}, f_{\max}$  – минимальная и максимальная частоты приемного тракта НШР, соответственно;  $S_{1,a}(f_i), S_{2,a}(f_i)$  – фурье-спектры принимаемых сигналов.

Для фокусирования радиоинтерферометра с АСДН на каждый пиксель радиоизображения используются сигналы, сжатые по разности хода. Когерентное радиометрическое изображение  $I(x, y)$  формируется с использованием значений относительного запаздывания  $\Delta\tau_a(x, y)$  для каждого пикселя  $(x, y)$

$$I(x, y) = \sum_{a=1}^{N_a} \hat{R}_a(\Delta\tau_a(x, y)) e^{-j2\pi f_c \Delta\tau_a(x, y)}, \quad (5)$$

где  $N_a$  – количество положений  $a$  приемных антенн на апертуре АСДН;  $f_c$  – центральная частота радиоспектра.

Формирование когерентных радиометрических изображений предусматривает согласованную фильтрацию принятых сигналов в виде (4) и их накопление с учетом фазы распространения до каждого пикселя радиоизображения в каждом положении антенны (5).

**2. Описание оборудования.** Когерентные радиоизображения сформированы с помощью аппаратуры НШР с АСДН [23–27], который был модифицирован для работы в радиометрическом режиме. Основными элементами радиоинтерферометра являются: антенная система, радиоприемные устройства, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и программно-математическое обеспечение (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема наземного радиоинтерферометра с антеннами с синтезированной диаграммой направленности 8-мм диапазона длин волн

При создании антенной системы использовался оригинальный подход, основанный на принципах одномерной антенной решетки и синтеза апертуры [23, 24]. Вдоль апертуры каждой антенны длиной 0,7 м проведен волновод, широкая стенка которого вскрыта. Данная стенка накрыта медной лентой, в которой прорезана полу-волновая щель. Для осуществления максимальной эффективности приема на расстоянии четверти длины волны от щели установлен короткозамыкающий поршень. Сканирование, необходимое для синтеза апертуры антенн, реализовано синхронным перемещением ленты со щелью вдоль прецизионных направляющих с помощью шаговых двигателей. Положение антенн контролируется датчиком угла поворота.

Радиоприемные устройства построены по супергетеродинной схеме. Между КВЧ-элементами радиоприемных устройств установлены фазовые вентили. Для усиления выходного сигнала

антенны и предварительно усиления сигнала на промежуточной частоте (ПЧ) использованы малошумящие усилители. Сигнал приемных антенн усиливается, фильтруется и преобразуется на ПЧ. Основное усиление сигнала равно  $\sim 70$  дБ на ПЧ. Сигнал ПЧ подается на входы двухканального АЦП с частотой дискретизации 1 ГГц. Для снижения взаимного просачивания сигналов приемные устройства установлены в отдельных закрытых металлических корпусах. Элементы схем радиоприемных устройств собраны в виде отдельных экранированных узлов и блоков.

Коэффициент усиления радиоинтерферометра измерен с помощью генератора качающейся частоты Р2-65, аттенюатора ДЗ-36А и измерителей мощности. Коэффициент усиления радиоинтерферометра достигает 97 дБ (рис. 2).

Для обеспечения идентичности частотных диапазонов радиоприемных устройств, входной фильтр одного из них был доработан. Неоднородность амплитудно-частотных характеристик радиоприемных устройств в диапазоне  $36,0 \div 36,5$  ГГц не превышает 3 дБ (рис. 2).

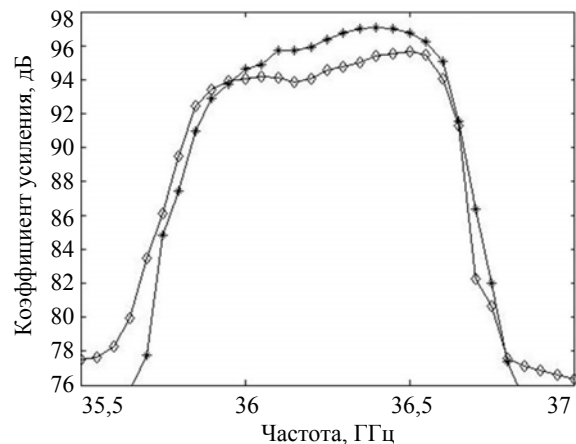


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики радиоприемных устройств радиоинтерферометра: звездочками обозначены измеренные значения коэффициента усиления первого радиоприемного устройства, ромбами – второго

Собственные шумы радиоинтерферометра регистрировались при закрытых железными пластинами антенных входах. Коэффициент шума радиоприемных устройств радиоинтерферометра не более 3, что соответствует шумовой температуре до 600 К. Время усреднения взаимной спектральной плотности собственных шумов радиоинтерферометра (рис. 3) равно 4,2 мс. Затухание в области низких частот обусловлено наличием фильтра с полосой пропускания до 5 МГц. Данный фильтр установлен на входе усилителя ПЧ. Неравномерность спектров в области частот больше 250 МГц вызвана взаимным просачиванием в каналах АЦП. Паразитные составляющие

с дискретностью 125 МГц обусловлены шумами цифровых цепей АЦП. Данные составляющие режектируются при формировании радиометрических изображений.

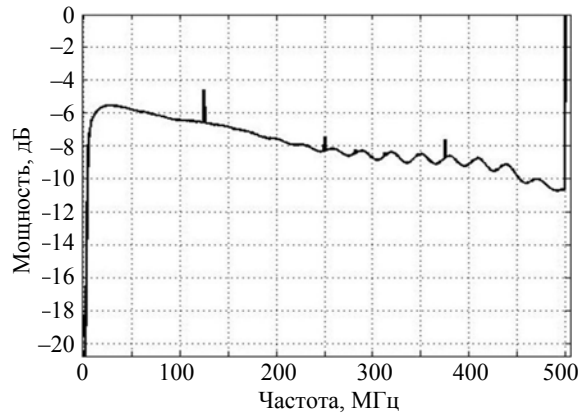


Рис. 3. Взаимная спектральная плотность выходного сигнала наземного радиointерферометра с антеннами с синтезированной диаграммой направленности 8-мм диапазона длин волн

Динамический диапазон АЦП (GaGe *CompuScope CS82G-1GHz-8M*) с эффективной разрядностью 7 бит равен 42 дБ. При этом цена младшего разряда, находящегося в шумах АЦП, равна примерно 4 мВ, что соответствует  $8 \cdot 10^{-17}$  Вт на входе радиоприемных устройств. Уровень сигнала, соответствующий второму разряду АЦП, –  $2,4 \cdot 10^{-16}$  Вт. Мощность сигнала, соответствующая динамическому диапазону АЦП, изменяется в пределах  $8 \cdot 10^{-17} \div 1,3 \cdot 10^{-12}$  Вт.

Схема преобразователя частоты включает генератор опорной частоты, схему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), умножитель частоты (на 4) и смесители. Температурный режим кварцевого генератора опорной частоты (9 ГГц) стабилизирован. Частота генератора задана высокочастотным резонатором. Данная схема построения исключает просачивание сигналов несущей частоты в соседнее радиоприемное устройство по цепи гетеродина. Основные характеристики наземного радиointерферометра с АСДН [23–27] приведены в таблице.

Основные характеристики наземного радиointерферометра с АСДН 8-мм диапазона длин волн

Диапазон рабочих частот, ГГц	36,0±36,5
Частота дискретизации АЦП, ГГц	1,0
Ширина спектра мощности, ГГц	≤ 0,5
Вид используемого сигнала	Шум
Полуширина диаграммы направленности щели по углу места и азимуту, °, соответственно	20 и 80°
Длина антенны с синтезированием диаграммы направленности, м	0,7

**3. Описание эксперимента.** Целью эксперимента является формирование когерентных радиометрических изображений с помощью аппаратуры наземного радиointерферометра с АСДН 8-мм диапазона длин волн.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории. В качестве радиометрического объекта использован генератор шума (ГШ), выполненный на лавинно-пролетном диоде. Выходная мощность ГШ измерена в полосе частот радиointерферометра с помощью ваттметра поглощаемой мощности МЗ-51 и равна 36 мВт. В ходе работы мощность ГШ ослаблялась с помощью поляризационных аттенюаторов ДЗ-36А. При формировании радиометрических изображений в режиме радиointерферометра [2] для передачи и приема сигналов использованы неподвижные рупорные антенны с размерами 3,6×4,2 мм.

Формирование радиометрического изображения местоположения точечного объекта в плоскости азимут–наклонная дальность с помощью радиointерферометра предусматривает оценку взаимной корреляционной функции  $\hat{R}(\Delta\tau(x, y))$  (2) сигналов на выходах радиоприемных устройств и отождествление отсчетов этой оценки с соответствующими пикселями радиоизображения

$$I(x, y) = \hat{R}(\Delta\tau(x, y)). \quad (6)$$

Радиометрическое изображение, сформированное с помощью радиointерферометра, есть совокупность линий положения – областей равных относительных запаздываний  $\Delta\tau(x, y) = \text{const}$  принимаемого сигнала. Местоположение каждого точечного излучателя на таком двумерном радиометрическом изображении определяется разностью фазы его сигнала на выходе радиointерферометра. В геометрической интерпретации на плоскости, линия положения соответствует ветви гиперболы с фокусами в фазовых центрах приемных антенн [2]. Разработанное программно-математическое обеспечение радиointерферометра (РСА процессор, рис. 1) оценивает взаимную корреляционную функцию принимаемых сигналов, учитывает частотную дисперсию сигнала на участке от антенн до входа в радиоприемные устройства и формирует радиоизображение (6).

База интерферометрического радиометра  $l_B$  равна 6 м. Радиометрический объект (ГШ) установлен на дальности 4 м от первого приемного пункта со смещением влево от середины линии базы на 1,5 м. Относительное запаздывание сигнала радиометрического объекта  $-1,62$  м или  $-2,7$  длины когерентности сигнала  $\Delta L$  ( $-2,7\tau_k$ ,

где  $\tau_k = \frac{\Delta L}{c}$ ) с полосой частот 500 МГц. Максимум оценки взаимной корреляционной функции сигналов на выходе радиоинтерферометра при нулевом относительном запаздывании  $\Delta\tau(x, y) = 0$  объясняется просачиванием сигнала из опорного канала АЦП в приемный канал АЦП (рис. 4). Пик оценки взаимной корреляционной функции сигналов на выходе радиоинтерферометра при относительном запаздывании  $-2,7\tau_k$  соответствует отклику радиоинтерферометра на сигнал радиометрического объекта. Порог на уровне  $-3,5$  дБ (пунктирная линия рис. 4) позволяет не учитывать мешающий отклик, соответствующий  $\Delta\tau(x, y) = 0$ , при дальнейшем формировании радиометрического изображения.

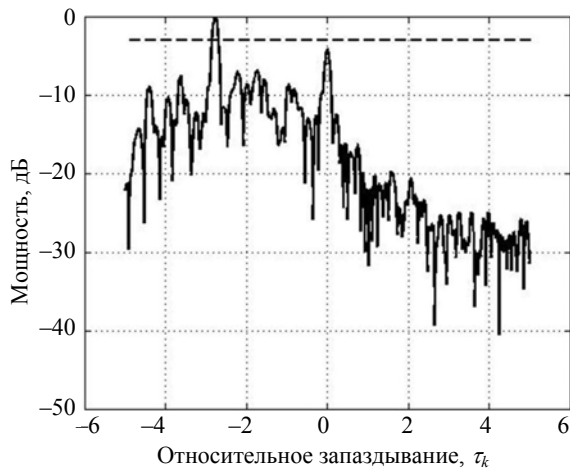


Рис. 4. Сигнал на выходе наземного радиоинтерферометра 8-мм диапазона длин волн

Радиометрическое изображение  $|I(x, y)|$  (6) содержит отклик радиоинтерферометра на точечный объект — линию положения, ветвь гиперболы (рис. 5). На рис. 5 по оси абсцисс отложено расстояние от середины линии базы радиоинтерферометра, а по оси ординат — дальность от линии базы радиоинтерферометра в метрах. Местоположение радиометрического объекта на радиометрическом изображении отмечено окружностью (рис. 5). Отклик радиоинтерферометра на точечный объект соответствует максимуму взаимной корреляционной функции ( $-2,7\tau_k$ , рис. 4).

Для формирования когерентных радиометрических изображений в плоскости азимут-наклонная дальность используем наземный радиоинтерферометр с АСДН. Измерение азимутального направления на цель обеспечено сканированием диаграммы направленности АСДН (5), установленной на одно из радиоприемных устройств радиоинтерферометра. Накопление линий поло-

жения, полученных в ходе перемещения приемной антенны вдоль апертуры АСДН, с учетом разности фазы распространения до каждого пикселя радиометрического изображения объекта позволяет сформировать когерентное радиометрическое изображение.

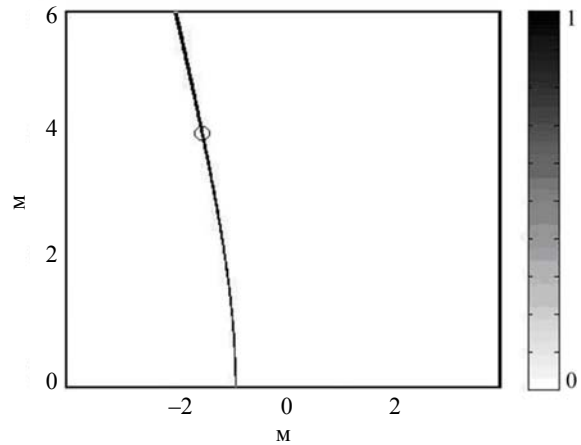


Рис. 5. Радиоизображение генератора шумового сигнала сформировано с помощью радиоинтерферометра. Положение радиометрического объекта отмечено окружностью

Измеряемые взаимные запаздывания ограничены базой интерферометрического радиометра  $l_B = 1,94$  м в пределах  $\pm 3,2\tau_k$ . Радиометрический объект установлен со смещением влево от середины линии базы примерно на 0,2 м. Когерентное радиометрическое изображение, полученное с применением порога отмеченного на рис. 4 пунктирной линией, показано на рис. 6, где по оси абсцисс отложено расстояние от середины начальной линии базы радиоинтерферометра с АСДН, а по оси ординат — дальность от линии базы радиоинтерферометра с АСДН в метрах.

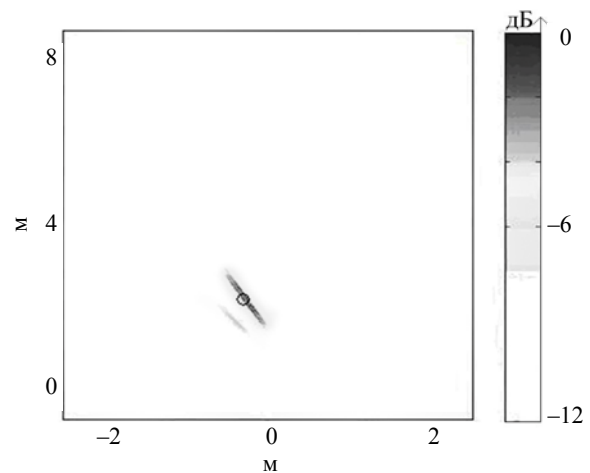


Рис. 6. Модуль когерентного радиометрического изображения, сформированного с помощью радиоинтерферометра и антенны с синтезированной диаграммой направленности. Положение радиометрического объекта отмечено окружностью

Изображение содержит 2 отклика. Реальное местоположение радиометрического объекта показано окружностью на втором отклике. Форма откликов определяется фокусированием линий равной разности хода синтезированным лучом АСДН, что в геометрической интерпретации соответствует пересечению гипербол с лучами. Наименьший отклик слева от цели соответствует отражению сигнала радиометрического объекта от стен лаборатории.

Приведенные результаты обосновывают возможность формирования когерентных радиометрических изображений с помощью предлагаемого алгоритма (6) и аппаратуры НШР с АСДН [23–27], работающей в режиме радиоинтерферометра с синтезированной диаграммой направленности антенн на малых дальностях, сравнимых с базой радиоинтерферометра.

**Выводы.** В работе предложен алгоритм формирования когерентных радиометрических изображений в плоскости азимут–наклонная дальность с помощью пассивного радара с синтезированием диаграммы приемной антенны. На основе наземного шумового радара 8-мм диапазона длин волн [23–27] создан наземный радиоинтерферометр с АСДН. Коэффициент усиления сигналов в радиоприемных устройствах радиоинтерферометра достигает 97 дБ, а шумовая температура не больше 600 К. В радиоинтерферометре реализована высокая идентичность амплитудно-частотных характеристик радиоприемных устройств (< 3 дБ). Реализована чувствительность порядка  $8 \cdot 10^{-17}$  Вт. Показаны особенности обработки сигналов, связанные с использованием аппаратуры наземного шумового радара 8-мм диапазона длин волн и АСДН. Предложенный алгоритм формирования когерентных радиометрических изображений проверен экспериментально. Получены когерентные радиометрические изображения имитатора радиометрического объекта – источника шумового сигнала, находящегося в дальней зоне приемных антенн (щелей). Радиометрические изображения получены в конфигурации радиоинтерферометра, а также с использованием АСДН. Показана возможность формирования изображений и измерения местоположения точечного объекта с помощью предложенного алгоритма. Пространственное разрешение наземного радиоинтерферометра с АСДН достигает 0,6 м по разности хода и  $1,15^\circ$  по азимуту.

#### Библиографический список

1. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
2. Алмазов В. Б. Методы пассивной радиолокации / В. Б. Алмазов. – Х.: ВИРТА, 1974. – 85 с.
3. Караваев В. В. Основы теории синтезированных антенн / В. В. Караваев, В. В. Сазонов. – М.: Сов. радио, 1974. – 168 с.
4. Николаев А. Г. Радиотеплокация / А. Г. Николаев, С. В. Перцов. – М.: Сов. радио, 1964. – 334 с.
5. Малышкин Е. А. Пассивная радиолокация / Е. А. Малышкин. – М.: Воениздат, 1961. – 156 с.
6. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
7. Справочник по радиолокации: в 4 т. Т. 4. Радиолокационные станции и системы / под ред. М. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. К. Н. Трофимова. – М.: Сов. радио, 1978. – 376 с.
8. Interferometric radiometer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.patentgenius.com/image/4990925-2.html>. – Загл. с экрана.
9. Глобальные фазостабильные радиоинтерферометрические системы / А. Ф. Дравских, Д. В. Корольков, Ю. Н. Парийский и др. // Успехи физ. наук. – 1981. – № 135, вып. 4. – С. 587–636.
10. Томпсон Р. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Р. Томпсон, Дж. Моран, Дж. Свенсон; пер. с англ. В. Т. Федорова, А. В. Шевченко под ред. Л. И. Матвеевко. – М.: Мир, 1989. – 568 с.
11. Многоканальный радиометр для систем радиовидения / В. А. Бережной, В. И. Кужель, А. П. Тузенко и др. // Технология и конструирование в радиоэлектронной аппаратуре. – 2003. – № 3. – С. 14–15.
12. Шило С. А. Аппаратурно-программный комплекс первичной обработки данных радиометрической системы «ЗИР» / С. А. Шило, Д. М. Бычков, А. С. Гавриленко // Там же. – С. 23–25.
13. СВЧ-радиометрическая система «ЗИР» для использования в интересах таможенных служб / С. А. Шило, В. М. Чмиль, В. А. Бережной и др. // Там же. – С. 11–13.
14. The CAS airborne X-band synthetic aperture radiometer: system configuration and experimental results / Hao Liu, Ji Wu, Shouzheng Ban et al. // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS): proc. – Anchorage, 2004. – Vol. 3. – P. 2230–2233.
15. Research activity on synthetic aperture radiometry in CSSAR/CAS / Ji Wu, Hao Liu, Shouzheng Ban et al. // Progress In Electromagnetics Research Symposium: proc. – Hangzhou, 2005. – P. 538–542.
16. An aperture synthesis radiometer at millimeter wave band / Qingxia Li, Ke Chen, Wei Guo et al. // Intern. Conf. Microwave and Millimeter Wave Technology: proc. – Nanjing, 2008. – P. 1699–1701.
17. Microwave and millimeter wave technologies: Modern UWB antennas and equipment / I. Minin (ed.). – S.: InTech, 2010. – 488 p.
18. An external calibration method for compensating for the mutual coupling effect in large aperture synthesis radiometers / Jian Dong, Ronghua Shi, Ke Chen et al. // Intern. J. Antennas and Propagation. – 2011. – 2011. – 937261 (8 p.).
19. A two-dimensional millimeter wave imaging radiometer for object detection / Tang Wenliang, Zhu Lu, Liu Yuanyuan, Hu Fei // Intern. J. digital content technology and its applications. – 2011. – 5, N 11. – P. 265–271.
20. Near field characterization of the GeoSTAR demonstrator / A. V. Tanner, B. H. Lambrigsten, T. M. Gaier, F. Torres // Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS): proc. – Denver, 2006. – P. 2529–2532.
21. Буняева И. В. Цифровые алгоритмы обработки сигналов в бистатическом радиометре с антенными решетками / И. В. Буняева, А. П. Верещак, В. В. Пискорж // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 2(43). – С. 7–13.
22. Буняева И. В. Цифровая обработка сигналов в бистатическом радиометре с апертурными антеннами / И. В. Буняева, А. П. Верещак, В. В. Пискорж // Авиационно-космическая техн. и технол. – 2010. – № 2(69). – С. 62–66.
23. Lukin K. A. Sliding Antennas for Noise Waveform SAR / K. A. Lukin // Applied Radio Electronics. – 2005. – 4, N 1. – P. 103–106.

24. Lukin K. A. Scanning Synthetic Radiation Pattern Antennas / K. A. Lukin // Radioelectronics and communications systems. – 2010. – 53, N 4. – P. 219–224
25. Ka-Band Bistatic Ground-Based Noise Waveform SAR for Short-Range Applications / K. A. Lukin, A. A. Mogyla, V. P. Palamarchuk et al. // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2008. – 2, N 4. – P. 233–243.
26. Experimental Investigation of Factors Affecting Stability of Interferometric Measurements with Ground Based Noise Waveform SAR / K. A. Lukin, V. P. Palamarchuk, P. L. Vyplavin, V. V. Kudriashov // Intern. J. Electronics and Telecommunications. – 2011. – 57, N 3. – P. 389–393.
27. Lukin K. A. Millimeter-Wave Band Noise Radar / K. A. Lukin // Telecommunications and radioengineering. – 2009. – 68, N 14. – P. 1229–1255.
28. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский, Т. И. Никольская. – М.: Наука, 1989. – 544 с.

*Рукопись поступила 05.05.2012*

V. V. Kudriashov, K. A. Lukin,  
V. P. Palamarchuk, P. L. Vyplavin

#### RADIOMETRIC COHERENT IMAGING WITH KA-BAND NOISE WAVEFORM SYNTHETIC APERTURE RADAR EQUIPMENT

Radiometric monitoring allows obtaining unique information about emissivity of the objects. It doesn't require generation and radiation of sounding signal. Known types of radiometers do not realize range and angle resolution when using small antennas. In the work, a principle for radiometric range – cross range imaging for short distances is considered. This principle comprises interferometric radiometer and antennas with synthesized patterns. The work describes the proposed imaging principle and obtained experimental results. Radiometric imaging was performed using the proposed algorithm implemented in ground based Ka-band

noise waveform synthetic aperture radar. Radiometric images of the test object have been obtained. The possibility of detection of thermal radiation by the investigated equipment has been confirmed. The obtained results can be applied in security scanners which can detect concealed objects.

**Key words:** passive radar, synthetic-aperture passive radar.

В. В. Кудряшов, К. О. Лукін,  
В. П. Паламарчук, П. Л. Виплавін

#### ФОРМУВАННЯ КОГЕРЕНТНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ 8-ММ ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НАЗЕМНОГО ШУМОВОГО РАДАРА З СИНТЕЗУВАННЯМ ДІАГРАМИ СПРЯМОВАНОСТІ

Радіометричний моніторинг дає змогу отримувати унікальну інформацію про випромінювання об'єктів. При цьому для дослідження не потрібно формувати та випромінювати сигнал, що зондує. Відомі конструкції радіометрів не реалізують розрізняльної здатності по двох координатах за використання широко направлених антен. Розглядається принцип формування радіометричних зображень на малих відстанях з розрізненням за напрямком відстань–азимут. Для цього використано схему інтерференційного радіометра та принцип синтезу апертури. Наведено опис запропонованого способу формування радіометричних зображень та результатів, отриманих експериментально за допомогою апаратури наземного шумового радару з синтезованою апертурою антен 8-мм діапазону довжин хвиль. Отримано радіометричні зображення тестового об'єкта, підтверджена можливість реєстрації радіотеплового випромінювання за допомогою досліджуваної апаратури. Результати можуть бути використані для виявлення прихованих об'єктів для забезпечення безпеки.

**Ключові слова:** інтерферометричний радіометр, пасивний радар з синтезованою апертурою антен.