

УДК 621.396.969

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Е.Е. НЕЧАЕВ, К.С. ДЕРЯБИН

В данной статье дается краткое описание интерферометрического режима радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны. Приводится описание и основные характеристики известных интерферометрических бортовых радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны (РСА) воздушного базирования. В сравнении с интерферометрическими системами дистанционного зондирования Земли космического базирования ИФРСА воздушного базирования имеют более высокую точность измерения высоты и детальность РЛИ. В то же время ИФРСА воздушного базирования имеют ряд недостатков, таких как: необходимость точной коррекции траектории полета самолета, что влечет за собой необходимость установки на борту прецизионных инерциальных систем и GPS-приемников, а также применение сложных алгоритмов траекторного управления; меньшее покрытие территорий при картографировании, ограниченное время и локальный характер использования, что приводит к удорожанию измерений. Дана оценка возможностей ИФРСА и перспективы их развития.

Ключевые слова: интерферометрические радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны, характеристики интерферометрических бортовых радиолокационных станций с синтезированием апертуры антенны, интерферометрическая обработка.

ВВЕДЕНИЕ

Значительные успехи в совершенствовании конструкций и производства приемо-передающих модулей для активных фазированных решеток (АФАР) бортовых радиолокационных станций в России и за рубежом позволяют уже сегодня создавать компактные высокоэффективные антенные решетки с электронным управлением лучом, которые можно размещать в любом месте самолета, создавая многопозиционные антенные системы. Примером такой системы является антенна БРЛС «Н036» многоцелевого истребителя 5-го поколения Т-50, которая имеет в своем составе пять отдельных АФАР: основную антенну переднего обзора Х-диапазона, две АФАР бокового обзора Х-диапазона, размещаемые в передней части фюзеляжа, две АФАР L-диапазона, размещаемые в кромках крыльев [8].

Подобные многопозиционные АФАР, имеющие отдельные независимые каналы обработки сигналов и отдельные каналы управления диаграммой направленности, можно использовать в качестве интерферометра. Интерферометрические радиолокационные станции с синтезированием апертуры антенны (ИФРСА) имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными радиолокационными станциями с синтезированной апертурой:

- получение более детального изображения подстилающей поверхности;
- возможность измерения высоты рельефа;
- лучшую помехоустойчивость.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ

В зависимости от расположения антенн интерферометра на борту различают РСА с поперечной интерферометрией – база интерферометра расположена поперек линии пути самолета, и продольной интерферометрией – база интерферометра расположена вдоль линии пути [2].

Получаемое РСА двумерное радиолокационное изображение (РЛИ) имеет искажения масштаба в районах со значительным изменением высоты поверхности [1]. ИФРСА с поперечной базой позволяет измерять высоту поверхности. Информация о высоте облучаемого участка местности содержится в разности фаз двух принятых от наблюдаемого участка местности сиг-

налов. Эта информация может быть использована для создания цифровых моделей местности (ЦММ), цифровых моделей рельефа (ЦМР), а также позволит более точно распознавать отдельно стоящие объекты на РЛИ, имеющие резкие перепады высоты относительно прилегающей местности, к примеру: овраги, горные расщелины, здания.

ЦММ шагом сетки задает точностью определения высоты: чем шаг плотнее, тем лучше [7]. Стандарт качества ЦММ был разработан Национальным агентством геопространственной разведки США (NGA) и получил название «цифровых высотных данных местности» (Digital Terrain Elevation Data – DTED). Стандарт DTED включает 6 уровней, соответствующих качеству ЦММ (см. таблицу).

**Качество ЦММ в соответствии со стандартом
Национального агентства геопространственной разведки США**

DTED уровень	Шаг сетки	Абсолютная точность определения высоты	Относительная точность определения высоты
0	30" ~ 1 км	–	–
1	3" ~ 100 м	30 м	20 м
2	1" ~ 30 м	18 м	12–15 м
3	0,3333" ~ 10 м	10 м	1–3 м
4	0,1111" ~ 3 м	5 м	0,8 м
5	0,037" ~ 1 м	5 м	0,33 м

Средняя ширина истребителей 5-го поколения примерно составляет 12 м (рис. 1). С учетом перпендикулярного расположения базы ИФРСА относительно горизонта и постоянной высоты полета самолета, потенциальная точность измерения высоты составит [1]

$$\sigma_h = \frac{\lambda R_h}{2\pi B \cdot \cos \varphi_h \sqrt{q}}.$$

При условии полета на высоте 10 км, угле визирования $\varphi_h = 35^\circ$, наклонной дальности $R_h \approx 12,2$ км, длине базы $B = 12$ м (размещение антенн на концах крыльев), длине волны 3,75 см, отношении сигнал-шум $q = 100$, потенциальная точность измерения высоты составит $\sigma_h = 0,672$ м, что соответствует уровню DTED 4.

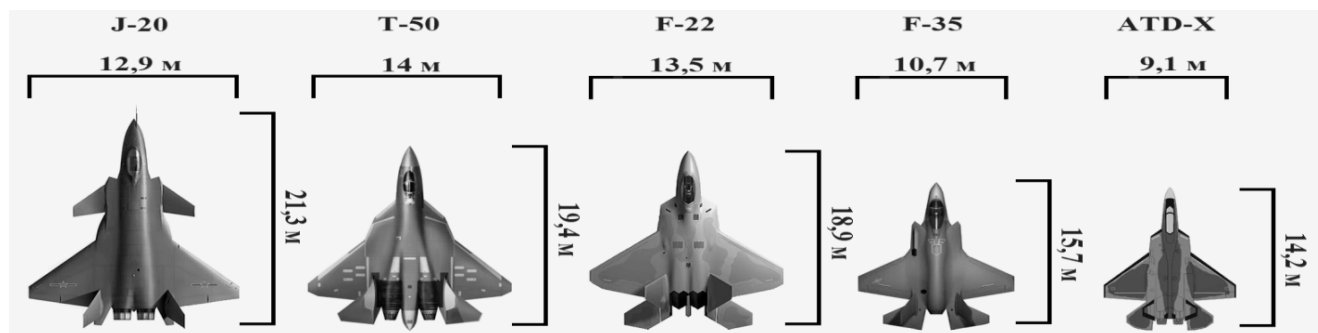


Рис. 1. Габариты истребителей 5-го поколения

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Как правило, интерферометрическая обработка РЛИ делится на несколько этапов [7, 9].

1. Подготовка данных для интерферометрической обработки, которая включает получение двух цифровых РЛИ одного и того же участка местности с двух разнесенных в пространстве антенн и их взаимную привязку.

2. Формирование интерферограммы: осуществляется путем комплексного перемножения элементов разрешения одного РЛИ на аналогичные элементы разрешения второго РЛИ.

3. Фазовая фильтрация. Информация о высоте подстилающей поверхности содержится в разности фаз сигналов, отраженных от каждого элемента разрешения и принятых двумя антеннами интерферометра. Помимо составляющей, зависящей от высоты поверхности, фаза принятых сигналов содержит паразитные составляющие, вызванные прохождением сигналов через атмосферу и приемный тракт РСА, а также погрешностями измерения наклонных дальностей от антенн интерферометра. Кроме того, необходимо компенсировать набег фазы, возникающий при отражении от подстилающей поверхности.

4. Развертывание фазы. Полученная после фильтрации интерферограмма содержит значения разностной фазы, находящейся в интервале $[0, 2\pi]$ (относительная фаза ϕ). Реальная фаза или абсолютная фаза Φ , содержащаяся в разности наклонных дальностей, имеет различное количество фазовых циклов, из-за чего возникает неоднозначность определения этой фазы по интерферограмме. Чтобы получить информацию о высоте, необходимо найти абсолютную фазу, для чего к значению относительной фазы прибавляется ближайшее целочисленное значение количества фазовых циклов k , соответствующее разностной наклонной дальности:

$$\Phi = \phi + k2\pi.$$

Процесс вычисления абсолютной фазы по значению ее относительной фазы называется «развертыванием фазы». Развертывание фазы является наиболее емким этапом интерферометрической обработки с точки зрения вычислительных затрат.

5. Интерпретация полученных данных. После развертывания фазы, полученные значения абсолютной фазы преобразуют в топографическую высоту, привязанную к местной системе координат, например геодезической. В зависимости от поставленной задачи полученные данные могут быть преобразованы в ЦММ или с использованием цветовой интерпретации преобразованы в двумерные топографические карты.

ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ СТАНЦИИ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АВИАЦИОННОГО БАЗИРОВАНИЯ

GeoSAR. Интерферометрическая бортовая радиолокационная станция с синтезированной апертурой антенны GeoSAR разрабатывалась в 1998–2003 гг. совместно Лабораторией реактивного движения НАСА (NASA Jet Propulsion Laboratory) и компанией Furgo EarthData [5]. Основное назначение GeoSAR – измерение высоты подстилающей поверхности с целью создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и местности (ЦММ). ИФРСА GeoSAR устанавливается на реактивный двухдвигательный самолет «Гольфстрим II» («Gulfstream II») (рис. 2) и имеет следующие характеристики.

Рабочий диапазон частот: X, P.

Вид поляризации волны:

– в X-диапазоне – вертикальная (VV);

– в P-диапазоне – горизонтальная (HH, HV) или вертикальная (VV, VH).

Величина несущей частоты:

- в X-диапазоне – 9,7 ГГц;
- в Р-диапазоне – 0,35 ГГц.

Ширина полосы обзора (в зависимости от высоты полета): 12–14 км – в обоих частотных диапазонах.

Точность измерения высоты при построении цифровой модели рельефа:

- в X-диапазоне: 0,5–1,2 м – для однополосного режима обзора, ~1 м – для многополосного режима обзора;
- в Р-диапазоне: 1–3 м – для однополосного режима обзора, 1–4 м – для многополосного режима обзора.

Разрешающая способность при построении цифровой модели рельефа: 2,5–5 м – в обоих частотных диапазонах.

Планиметрическая точность:

- в X-диапазоне: 1 м (относительная), < 2,5 м (абсолютная);
- в Р-диапазоне: 2 м (абсолютная) – на высоте 5 км, 4 м (абсолютная) – на высоте 10 км.

ИФРСА GeoSAR имеет в своем составе две антенны X-диапазона, расположенные под крыльями вблизи фюзеляжа, и две антенны Р-диапазона на концах крыльев, вместе образующие две интерферометрические базы. Каждая пара осуществляет обзор подстилающей поверхности перпендикулярно направлению полета с обеих сторон (рис. 3). Таким образом, каждая точка в полосе обзора наблюдается с четырех разных направлений, что позволяет уменьшить ошибки вычисления высоты, снизить влияние спекл-эффекта и рельефа на качество получаемого РЛИ. Для точного выдерживания высоты полета и картирования местности, находящейся под самолетом, используется лазерный дальномер.



Рис. 2. «Гольфстрим II» с установленной ИФРСА GeoSAR:

1 – антенны Р-диапазона; 2 – антенны Х-диапазона;
3 – антенный блок для измерения текущего положения носителя

Использование различных комбинаций работы антенн позволяет получать следующие данные.

При комбинированном обзоре антеннами Р-диапазона и Х-диапазона в режиме интерферометрии: цифровую модель рельефа без растительного покрова и зданий, ортометрические высоты.

При комбинированном обзоре антеннами Х-диапазона в режиме интерферометрии: цифровую модель местности, ортометрические высоты.

При комбинированном обзоре антеннами Х-диапазона: ортотрансформированное радиолокационное изображение.

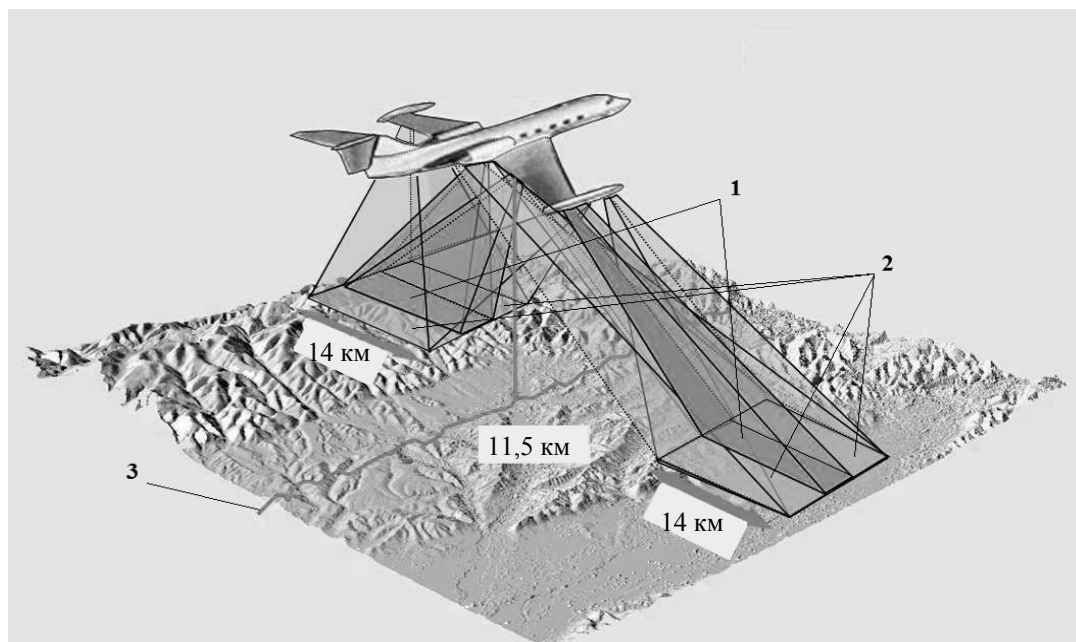


Рис. 3. Область обзора ИФРСА GeoSAR:

1 – полосы обзора Х-диапазона; 2 – полосы обзора Р-диапазона;
3 – линия измерения высоты лазерным дальномером

Измерение высоты поверхности одновременно в Р- и Х-диапазоне дает возможность измерять высоту лесных массивов. В [13] приведена модель, которая описывает этот процесс и включает четыре этапа:

- производится вычисление высоты лесного массива с использованием ЦММ, полученных в Х- и Р-диапазонах;
- измеряется отношение ЭПР поверхности в Р-диапазоне с использованием НН- и НV-поляризации;
- на третьем этапе осуществляется развертывание фазы интерферограммы с использованием данных, полученных на предыдущих двух этапах;
- на заключительном этапе осуществляется коррекция высоты лесного покрова, измеренной на первом этапе с использованием развернутой на предыдущем этапе фазы.

RTV (Rapid Terrain Visualization). ИФРСА RTV была разработана Сандийской национальной лабораторией (США) для нужд Американской армии [6, 7]. Основной целью разработки является получение качественных цифровых моделей поверхности в районах с быстроменяющейся обстановкой в масштабах времени, близких к реальным. RTV позволяет получать данные для ЦММ уровня DTED 3 и DTED 4, высококачественное изображение подстилающей поверхности, а также ортотрансформированное изображение.

ИФРСА RTV устанавливается на турбовинтовой самолет DHC-7 ("De Havilland Canada"), стоящий на вооружении армейской авиации США (рис. 4). RTV имеет следующие характеристики.

Рабочий диапазон частот: K_u . Вид поляризации волны: вертикальная (VV).

Величина несущей частоты: 16,7 ГГц. Азимутальная разрешающая способность: на уровне DTED 3 – 0,45 м; на уровне DTED 4 – 1,1 м.

Разрешающая способность по дальности:

на уровне DTED 3 – 0,45 м; на уровне DTED 4 – 1,1 м.

Шаг сетки: на уровне DTED 3 – 10 м; на уровне DTED 4 – 3 м. Точность (относительная) измерения высоты: 1 м. Длина интерферометрической базы: 0,33 м.

Антенны RTV располагаются под фюзеляжем. База интерферометра – поперечная, перпендикулярная продольной оси самолета (рис. 5). Для уменьшения влияния сигналов, отражен-

ных от фюзеляжа самолета, на обе антенны устанавливается радиопоглощающий кожух, а на обтекателе размещается дифракционная решетка.

Одной из особенностей ИФРСА RTV является использование амплитудного моноимпульсного метода измерения угла места. RTV имеет две моноимпульсные антенны, каждая из которых имеет два отдельных излучателя, разнесенных в вертикальной плоскости перпендикулярно продольной оси самолета.



Рис. 4. DHC-7 с установленной ИФРСА RTV (кругом отмечены антенны RTV в обтекателе)

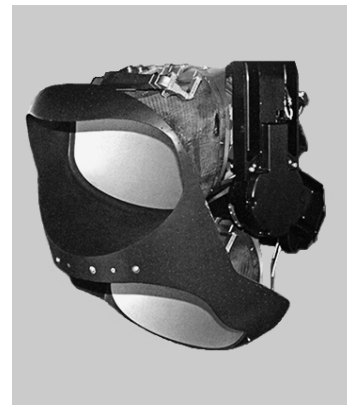


Рис. 5. Антенны ИФРСА RTV

Еще одной особенностью ИФРСА RTV является то, что она не использует традиционные алгоритмы развертывания фазы. Для устранения неоднозначности фазы в каждом пикселе интерферограммы используется соответствующий измеренный по трем каналам однозначный угол места. Значение количества фазовых циклов k определяется следующим образом:

$$k = \left[\frac{\hat{\Phi} - \phi}{2\pi} + 0,5 \right],$$

где $\hat{\Phi}$ – измеренная абсолютная фаза принятого сигнала для случая, когда интерферометрическая база перпендикулярна направлению максимума диаграммы направленности. Алгоритм является безошибочным, пока выполняется условие:

$$|\hat{\Phi} - \phi| > \pi.$$

Вероятность ошибочного определения фазового цикла по данному критерию $< 10^{-6}$. В случае возникновения ошибки определения абсолютной фазы в отдельном пикселе интерферограммы, этот пиксель изолируется и не распространяется дальше, как например, при методе «растущих пикселей».

Вычислительная система RTV позволяет получать в реальном времени без вмешательства оператора ЦММ уровня DTED 3 со скоростью $\sim 10 \text{ км}^2$ в минуту и уровня DTED 4 со скоростью $\sim 3,5 \text{ км}^2$ в минуту.

STAR-3i. ИФРСА STAR-3i была разработана в 1992–1993 гг. компанией «Norden Systems» (сейчас является частью корпорации «Northrop Grumman») и Мичиганским исследовательским институтом окружающей среды [7, 8]. С 1997 г. все работы с STAR-3i ведутся под управлением компании «Intermap Technologies». ИФРСА STAR-3i имеет жесткую базу с поперечной интерферометрией и устанавливается на многоцелевой реактивный самолет Learjet 36 (рис. 6).

STAR-3i имеет следующие характеристики:

Рабочий диапазон частот: X, UHF, P. Вид поляризации: горизонтальная (HH). Величина несущей частоты: 9,6 ГГц. Азимутальная разрешающая способность: 1,25 м. Относительная точность измерения высоты: 0,5–1,25 м. Длина интерферометрической базы: 0,92 м.



Рис. 6. Learjet 36 с установленной ИФРСА STAR-3i

STAR-3i позволяет получать: качественные цифровые модели местности уровня DTED 3, 4; ортотрансформированное радиолокационное изображение с масштабом пикселей 1,25 м; топографические карты местности.

YINSAR. ИФРСА YINSAR разработана в лаборатории Микроволнового зондирования Земли при университете Бригама Янга (США) [12]. Основной целью разработки было создание дешевой ИФРСА, имеющей достаточно хорошее разрешение.

YINSAR работает в X-диапазоне с несущей частотой 9,9 ГГц и полосой пропускания 200 МГц, интерферометрическая база – поперечная. Прошедшие в марте 2000 г. летные испытания показали, что пространственная разрешающая способность без коррекции полета самолета составляет 1 x 1 м. Теоретически возможно повысить разрешающую способность по дальности до 0,75 м, а по азимуту до 0,1 м при полете на небольших высотах и с использованием небольших антенн. В качестве платформы для испытаний был использован легкий пассажирский самолет Cessna Skymaster.

F-SAR. ИФРСА F-SAR разработана Институтом микроволн и радиолокационных систем Авиационно-космического центра Германии (DRL) для замены устаревшей ИФРСА E-SAR. F-SAR является многочастотной системой с полным поляризационным зондированием. В качестве платформы используется легкий двухмоторный самолет Dornier DO228-212. Первый тестовый полет был совершен в конце 2006 г.

ИФРСА F-SAR имеет следующие характеристики.

Рабочий диапазон частот: X-, C-, S-, L-, P-.

Вид поляризации волны: H, V – во всех частотных диапазонах.

Величина несущей частоты: в X-диапазоне – 9,6 ГГц; в C-диапазоне – 5,3 ГГц; в S-диапазоне – 3,25 ГГц; в L-диапазоне – 1,325 ГГц; в P-диапазоне – 0,35 ГГц.

Полоса пропускания: в X-диапазоне – 800 МГц; в C-диапазоне – 400 МГц; в S-диапазоне – 300 МГц; в L-диапазоне – 150 МГц; в P-диапазоне – 100 МГц.

Максимальная ширина полосы обзора: 12,5 км.

Азимутальная разрешающая способность: в X-диапазоне – 0,2 м; в C-диапазоне – 0,3 м; в S-диапазоне – 0,35 м; в L-диапазоне – 0,4 м; в P-диапазоне – 1,5 м.

Разрешающая способность по дальности: в X-диапазоне – 0,3 м; в C-диапазоне – 0,6 м; в S-диапазоне – 0,75 м; в L-диапазоне – 1,5 м; в P-диапазоне – 2,25 м.

Диапазон углов наблюдения: 25–60°.

Высота полета СН: ≤ 6000 м.

В номинальной конфигурации антенная система RTV включает в себя семь антенн (рис. 8): три антенны X-диапазона, образующие одну поперечную интерферометрическую базу

длиной 1,60 м и одну продольную интерферометрическую базу длиной 85 см; две антенны S-диапазона, образующие поперечную интерферометрическую базу длиной 1,60 м; одну антенну L-диапазона; одну антенну С-диапазона. В полной конфигурации дополнительно, в нижней части фюзеляжа, устанавливается одна антенна Р-диапазона.



Рис. 7. DO228-212 с установленной ИФРСА F-SAR (кругом обозначена платформа для крепления антенн)

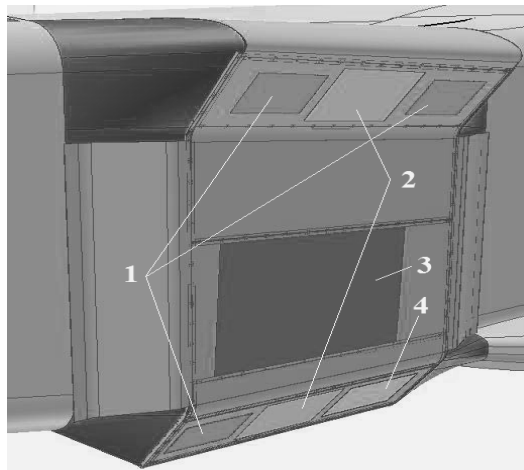


Рис. 8. Схематическое изображение антенн ИФРСА F-SAR: 1 – X-диапазона; 2 – S-диапазона; 3 – L-диапазона; 4 – C-диапазона

Наземный сегмент F-SAR включает:

- подсистемы расшифровки данных, в которых осуществляется разделение необработанных данных на интерферометрические и поляриметрические, их привязка к навигационным данным GPS и инерциальной системы;
- кластер обработки, в котором осуществляется обработка сгруппированных данных, в том числе интерферометрическая обработка и получение конечного продукта (ЦММ, ЦМР, топографические карты);
- систему хранения данных – по сути, является ПЗУ с большим объемом памяти, в котором хранятся конечные продукты обработки.

Летные испытания, начатые в 2008 г., показали возможность получения РЛИ с высоким пространственным разрешением (0,4 м) одновременно в нескольких частотных диапазонах.

АеS-1. ИФРСА AeS-1 разработана ООО «Радиолокационные системы воздушного зондирования» (Германия). Первый полет совершен в августе 1996 г., в эксплуатации с октября того же года. AeS-1 нашла широкое применение в различных сферах деятельности, таких как:

- топографическое картирование, построение ЦММ;
- создание цифровых трехмерных моделей городов;
- океанические исследования, в частности, получение РЛИ океанической поверхности, батиметрические измерения, наблюдение за прибрежной зоной в реальном времени.

В качестве базы для AeS-1 используется легкий двухмоторный самолет Turbine Commander (рис. 9). Воздушный сегмент AeS-1 включает: приемно-передающее устройство, антенную систему из двух антенн, вычислительный блок с генератором синхроимпульсов, систему контроля параметров полета (DGPS и инерциальная система). Наземный сегмент включает в себя: ноутбук для планирования полета, систему первичной обра-



Рис. 9. Turbine Commander с установленной ИФРСА AeS-1

ботки, систему интерферометрической обработки, систему хранения данных и наземную GPS-станцию.

ИФРСА AeS-1 имеет следующие основные характеристики.

Рабочий диапазон частот: X-диапазон. Вид поляризации волны: горизонтальная (HH). Величина несущей частоты: 9,35–9,6 ГГц. Азимутальная разрешающая способность: 0,5 м. Разрешающая способность по дальности: 0,5 м. Относительная точность измерения высоты: 0,5 м. Длина интерферометрической базы: 0,5 м или 1,8 м. Максимальная ширина полосы обзора: 15 км. Высота полета СН: 500–9000 м.

MEMPHIS. ИФРСА MEMPHIS (Millimeterwave Experimental Multifrequency Polarimetric High-resolution Interferometric System) разработки Фраунгоферовского института высокочастотной физики и радиолокационных технологий (FHR), предназначена для получения высокоточных ЦММ, в частности, в районах городской застройки [10]. MEMPHIS устанавливается на военно-транспортный самолет C-160 Transall, находящийся на вооружении ВВС Германии.

Основной особенностью MEMPHIS является использование более коротковолновых диапазонов волн: K_a -, W-диапазоны с несущими частотами 35 и 94 ГГц соответственно. ИФРСА имеет в своем составе две антенны: многолучевую интерферометрическую антенную систему K_a -диапазона (на рис. 10 в центре) с одной передающей и четырьмя приемными антеннами; поляриметрическую антенну W-диапазона (на рис. 10 снизу). Приемные антенны K_a -диапазона можно использовать в различных конфигурациях, что позволяет получать интерферометрическую базу с длиной 5,5; 11 м; 16,5; 22; и 27,5 м. При этом однозначная точность определения высоты составит: 228, 114, 76, 57 и 46 м соответственно.

Для развертывания фазы используется несколько интерферограмм, полученных на различных интерферометрических базах. В качестве эталонной используются интерферограмма, полученная с использованием самой короткой базы (5,5 м). На первом этапе минимизируется фазовый сдвиг между фазой эталонной интерферограммы и фазой интерферограммы, полученной более длинной базой – 11 м. На втором этапе осуществляется непосредственно развертывание фазы и, при необходимости, коррекция ошибок. Далее, картина развернутых фаз используется в качестве эталонной интерферограммы для развертывания фаз интерферограммы, для базы 16,5 м. Этот цикл повторяется, пока не будет развернута интерферограмма, полученная самой длинной базой.

ONERA RAMSES. ИФРСА RAMSES разработана Французским агентством аэрокосмических исследований ONERA. ИФРСА RAMSES является экспериментальным стендом для отработки передовых разработок в области радиовидения и создания радиолокационных систем для военных. В качестве самолета используется военно-транспортный самолет C-160 Transall.

В зависимости от конфигурации оборудования ИФРСА RAMSES может работать в трех из восьми частотных диапазонах в пределах от Р-диапазона до W-диапазона. Интерферометрический режим в RAMSES осуществляется в X- и K_u -диапазонах со следующими параметрами работы:

Величина несущей частоты: в X-диапазоне – 9,5 ГГц; в K_u -диапазоне – 14,3 ГГц.

Полоса пропускания: 1200 МГц – в обоих частотных диапазонах.

Вид поляризации: HH, HV, VH, VV – в обоих частотных диапазонах.

Диапазон углов наблюдения: 30–85°.

Для каждого диапазона используется по 4 антенны в двух возможных конфигурациях: две поперечные интерферометрические базы; одна поперечная и одна продольная интерферометрическая база.



Рис. 10. C-160 Transall с установленной ИФРСА MEMPHIS

Широкая полоса пропускания позволяет получать РЛИ с пространственным разрешением около 0,11 м (рис. 11).



Рис. 11. Изображение одного и того же участка местности: слева – полученное с помощью оптической съемки; справа – РЛИ, синтезированное ИФРСА RAMSES в K_u -диапазоне

InSAeS4. ИФРСА InSAeS4 является модернизированным вариантом РЛС AeS4. Доработку в интерферометрическую РСА осуществлял Институт электромагнитного зондирования окружающей среды (IREA), входящий в Итальянский Национальный исследовательский совет (CNR) [11]. InSAeS4 устанавливается на легкий реактивный самолет Learjet 35A.

ИФРСА InSAeS4 имеет следующие основные характеристики.

Рабочий диапазон частот: X-диапазон. Вид поляризации: горизонтальная (HH). Величина несущей частоты: 9,55 ГГц. Полоса пропускания: 50–400 МГц. Ширина полосы обзора: 1,5–12 км.

Антенная система включает в себя три рупорные антенные решетки X-диапазона, направленные в правую от оси самолета сторону под углом 45° . Антенны разнесены таким образом, что образуют три независимые поперечные интерферометрические базы и три продольные интерферометрические базы (рис. 12).

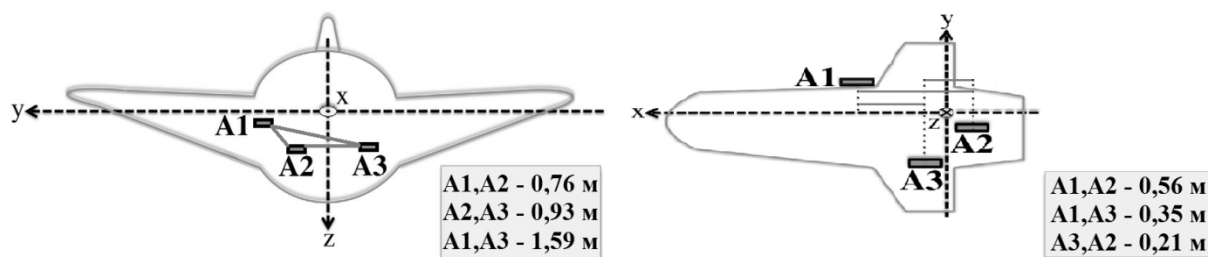


Рис. 12. Схема размещения антенн InSAeS4 на борту Learjet 35A

Летные испытания, проведенные в январе 2013 г., показали следующие результаты: разрешающая способность по азимуту – 0,14 м, разрешающая способность по дальности – 0,49 м, ошибка определения высоты – 1,57 м по сравнению с лазерным дальномером и 0,51 м по сравнению с данными DGPS.

Pi-SAR2. ИФРСА Pi-SAR2 разрабатывается с 2006 г. Национальным институтом информационных и коммуникационных технологий (Япония) [4, 5]. Основное назначение – наблюдение за изменением гео- и биосреды, а также климатическими изменениями. ИФРСА Pi-SAR2 устанавливается на самолет «Гольфстрим II» (рис. 13). Pi-SAR2 имеет следующие характеристики.

Рабочий диапазон частот: X-диапазон. Вид поляризации волны: горизонтальная (HH, HV) или вертикальная (VV, VH). Величина несущей частоты: 9,65/9,55 ГГц.

Полоса пропускания: 500/300/150 МГц. Тангенциальная разрешающая способность: 0,3/0,5/1 м. Азимутальная разрешающая способность: 0,3/0,6 м. Ширина полосы обзора: 5–10 км.

Pi-SAR2 включает в себя две пары антенн, размещенных под крыльями вблизи фюзеляжа и образующих интерферометрическую базу длиной 2,6 м. Одна пара антенн является «ведущей» (расположена в основании левого крыла) и работает как на прием, так и на передачу. Она включает одну антенну с вертикальной поляризацией и одну с горизонтальной поляризацией волны (рис. 14). Вторая пара антенн является «ведомой» (расположена в основании правого крыла) и работает только на прием. Она включает одну антенну для поперечной интерферометрии и одну антенну для продольной интерферометрии, причем вторая состоит из двух частей, фазовые центры которых разнесены вдоль продольной оси фюзеляжа на 40 см (рис. 15).



Рис. 13. «Гольфстрим II»
с установленной ИФРСА Pi-SAR2

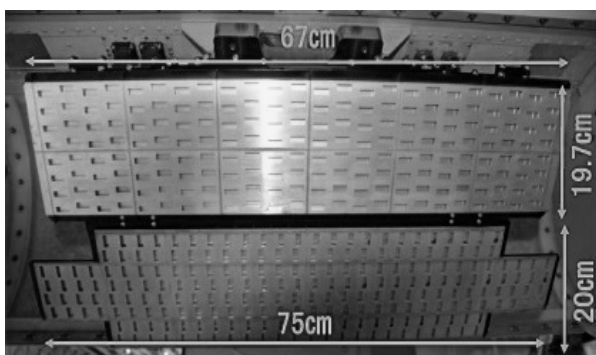


Рис. 14. Основные антенны ИФРСА Pi-SAR2
(с вертикальной поляризацией – вверх;
с горизонтальной поляризацией – вниз)

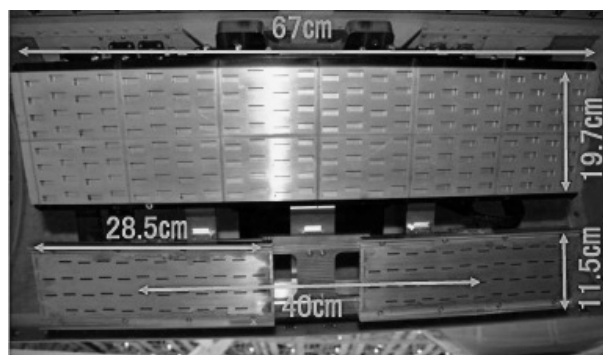


Рис. 15. Второстепенные
(приемные) антенны ИФРСА Pi-SAR2
(антенна для поперечной интерферометрии вверх;
антенна для продольной интерферометрии – вниз)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дистанционное зондирование земной поверхности в интерферометрическом режиме, на сегодняшний день, является одним из активно развивающихся направлений совершенствования бортовых радиолокационных станций воздушного базирования. Основным преимуществом ИФРСА по сравнению с обычными РСА является возможность высокоточного измерения высоты подстилающей поверхности. Это позволяет создавать цифровые модели местности и топографические карты в районах с быстроменяющейся обстановкой, что является полезным средством во многих отраслях народного хозяйства, науке и военной сфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные системы радиовидения: монография / Под ред. Г.С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2015.
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010.
3. **Kampes B., Blaskovich M., Reis James J., Sanford M., Morgan K.** Fugro GeoSAR airborne dual-band IFSAR DTM processing. ASPRS/Annual Conference Milwaukee, Wisconsin (USA), May 1–5, 2011.
4. **Matsuoka T., Umehara T., Nadai A., Kobayashi T., Satake M., Uemoto J., Uratsuka S.** Calibration experiments of X-band high performance airborne SAR system (Pi-SAR2). International

Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, Volume XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan, 2010.

5. Yamaguchi Y., Singh G., Kojima S., Satake M., Inami M., Park S., Cui Y., Yamada H., Sato R. X-band 30 cm resolution fully polarimetric SAR images obtained by Pi-SAR2. IEEE, 2014.

6. Burns B.L., Eichel P.H., Hensley W.H., Kim T.J. IFSAR for the rapid terrain visualization demonstration. Conference Record of The Thirty-Fourth Asilomar Conference on signals? Systems & Computers, Pacific Grove, California, USA, October, 2000.

7. Mark A.R. A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing. IEEE A&E Systems Magazine. Vol. 22. No. 9. 2007.

8. Фомин А. Пятое поколение у нас и у них // Взлет. 2010. № 3.

9. Коберниченко В.Г., Сосновский А.В. Особенности построения цифровых моделей рельефа на основе метода космической радиолокационной интерферометрии // Труды СПИИРАН. 2013. № 5.

10. Schmitt M., Magnard C., Stanko S., Ackermann C., Stilla U. Advanced High Resolution SAR Interferometry of Urban Areas with Airborne Millimetrewave Radar. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. No. 10, 2013.

11. Perna S., Esposito C., Amaral T., Berardino P., Jackson G., Moreira J., Pauciuolo A., Vaz E. Jr., Wimmer C., Lanari R. The InSAeS4 Airborne X-Band Interferometric SAR System: A First Assessment on Its Imaging and Topographic Mapping Capabilities. Remote Sens. Vol. 8. No. 1. 2016.

12. Lundgreen R.B., Thompson D.G., Arnold D.V., Long D.G., Miner G.F. Initial Results of a Low-Cost SAR: YINSAR. IEEE, 2000.

13. Lavallo M., Williams M.L., Hensley S., Pottier E., Solimini D. Dependence of P-band interferometric height on forest parameters from simulation and observation. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE International. Vol. 4. 2009.

AIRBORNE INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR

Nechaev E.E., Deryabin K.S.

This article gives a brief description of the interferometric SAR mode. It gives a description and the main characteristics of some airborne interferometric SAR systems. It's also shows possible ways of development of airborne interferometric radars in the near future. Compared to the interferometric systems of the Earth remote sensing space-based, airborne ISAR have higher precision of measurement of height and detail RI. At the same time, ISAR airborne have several disadvantages such as the need of accurate correction of the flight path of the aircraft, which entails the need to install onboard precision inertial systems and GPS receivers, and the application of complex algorithms for trajectory control; less coverage to the areas in the mapping, time limited and local character of the use, which leads to higher dimensions.

Keywords: interferometric SAR, airborne IFSAR characteristics, interferometric processing.

REFERENCES

1. Antipov V.N., Vikent'ev A.Y., Koltyshev E.E., Kondratenkov G.S., Lavrov A.A., Frolov A.Y., Yankovskii V.T. Aviatsonnye sistemy radiovideniya. Monografiya. Moscow: Radiotekhnika, 2015.

2. Verba V.S., Neronskii L.B., Osipov I.G., Turuk V.E. Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya. Moscow: Radiotekhnika, 2010.

3. Kampes B., Blaskovich M., Reis James J., Sanford M., Morgan K. Fugro GeoSAR airborne dual-band IFSAR DTM processing. ASPRS/Annual Conference Milwaukee, Wisconsin (USA), May 1–5, 2011.

4. **Matsuoka T., Umehara T., Nadai A., Kobayashi T., Satake M., Uemoto J., Uratsuka S.** Calibration experiments of X-band high performance airborne SAR system (Pi-SAR2). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science. Volume XXXVIII. Part 8. Kyoto Japan, 2010.
5. **Yamaguchi Y., Singh G., Kojima S., Satake M., Inami M., Park S., Cui Y., Yamada H., Sato R.** X-band 30 cm resolution fully polarimetric SAR images obtained by Pi-SAR2. IEEE, 2014.
6. **Burns B.L., Eichel P.H., Hensley W.H., Kim T.J.** IFSAR for the rapid terrain visualization demonstration. Conference Record of The Thirty-Fourth Asilomar Conference on signals? Systems & Computers, Pacific Grove, California, USA, October, 2000.
7. **Mark A.R.** A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing. IEEE A&E Systems Magazine. Vol. 22. No. 9. 2007.
8. **Fomin A.** Pyatoe pokolenie u nas i u nikh. Take-off. 2010. No. 3.
9. **Kobernichenko V.G., Sosnovskii A.V.** Osobennosti postroeniya tsifrovyykh modelei rel'efa na osnove metoda kosmicheskoi radiolokatsionnoi interferometrii. Trudy SPIIRAN. Sankt-Peterburg, 2013. No. 5.
10. **Schmitt M., Magnard C., Stanko S., Ackermann C., Stilla U.** Advanced High Resolution SAR Interferometry of Urban Areas with Airborne Millimetrewave Radar. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. No. 10, 2013.
11. **Perna S., Esposito C., Amaral T., Berardino P., Jackson G., Moreira J., Pauciuolo A., Vaz E. Jr., Wimmer C., Lanari R.** The InSAes4 Airborne X-Band Interferometric SAR System: A First Assessment on Its Imaging and Topographic Mapping Capabilities. Remote Sens. Vol. 8. No. 1, 2016.
12. **Lundgreen R.B., Thompson D.G., Arnold D.V., Long D.G., Miner G.F.** Initial Results of a Low-Cost SAR: YINSAR. IEEE, 2000.
13. **Lavalle M., Williams M.L., Hensley S., Pottier E., Solimini D.** Dependence of P-band interferometric height on forest parameters from simulation and observation. Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE International. Vol. 4. 2009.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Нечаев Евгений Евгеньевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, электронный адрес: e.nechaev@mstuca.aero.
Дерябин Кирилл Сергеевич, аспирант МГТУ ГА, электронный адрес: deryabin@bk.ru.