



Уральский
федеральный
университет

имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина

Институт радиоэлектроники
и информационных
технологий — РТФ

**Л. Г. ДОРОСИНСКИЙ
Н. С. ВИНОГРАДОВА**

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ
ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Учебно-методическое пособие

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Л.Г. Доросинский, Н.С. Виноградова

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом
Уральского федерального университета
для студентов вуза, обучающихся
по направлениям подготовки
11.03.01 — Радиотехника,
11.05.01 — Радиоэлектронные системы и комплексы

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2021

УДК 621.396.96(075.8)

ББК 32.95я73

Д69

Рецензенты:

канд. техн. наук, доц. *Н. В. Будылдина* (заведующая кафедрой инфокоммуникационных технологий и мобильной связи Уральского технического института связи и информатики (филиал) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики);
д-р техн. наук, проф. *В. П. Часовских* (Уральский государственный лесотехнический университет)

Научный редактор — канд. техн. наук, доц. *О. Ю. Иванов*

Доросинский, Л. Г.

Д69 Теория и практика формирования и обработки радиолокационных изображений : учебно-методическое пособие / Л. Г. Доросинский, Н. С. Виноградова ; М-во науки и высш. образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2021. — 232 с.

ISBN 978-5-7996-3384-4

В пособии изложены основы теории цифровой обработки изображений в среде MATLAB применительно к данным дистанционного зондирования Земли, полученных в радиодиапазоне (раздел А). Приведено описание пяти лабораторных работ по дисциплине «Теория и практика формирования и обработки радиолокационных изображений» (раздел Б). Систематизированы основные сведения о гражданских радиолокационных системах наблюдения Земли из космоса.

Настоящее пособие предназначено для студентов старших курсов бакалавриата и специалитета технических направлений подготовки.

Табл. 14. Рис. 162. Прил. 2.

УДК 621.396.96(075.8)

ББК 32.95я73

ISBN 978-5-7996-3384-4

© Уральский федеральный
университет, 2021

Оглавление

Предисловие	5
-------------------	---

Раздел А. Основы обработки цифровых радиолокационных изображений в среде MATLAB

1. Использование MATLAB при обработке изображений в радиодиапазоне.....	9
1.1. Типы данных в ПО MATLAB	10
1.2. Массивы и базовые операции над ними в ПО MATLAB	20
1.3. Генерация и обработка случайных полей в ПО MATLAB...	30
1.4. Обработка комплексных чисел в ПО MATLAB	37
1.5. Основные функции для обработки изображений в ПО MATLAB	42
Контрольные вопросы к главе 1	64
2. Формирование радиолокационных изображений и особенности их обработки	66
2.1. Принцип работы радиолокатора бокового обзора.....	68
2.2. Аналитическая запись отраженного сигнала	75
2.3. Технология синтезирования апертуры.....	83
2.4. РЛИ пространственно-распределенных объектов	99
2.5. Особенности построения радиолокационных станций с синтезированной апертурой для систем дистанционного зондирования Земли	106
2.6. Влияние параметров волны на свойства РЛИ	109
2.7. Режимы радиолокационной съемки	116
Контрольные вопросы к главе 2	118
3. Основные радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли	120
3.1. Advanced Land Observation Satellite (ALOS).....	121
3.2. Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation (COSMO-SkyMed)	127

3.3. European Remote-Sensing Satellite (ERS)	131
3.4. Envisat	135
3.5. RADARSAT.....	139
3.6. Sentinel	151
3.7. TerraSAR-X	156
3.8. TanDEM-X.....	158
3.9. PAZ	160
Контрольные вопросы к главе 3.....	162
Раздел Б. Методические указания к выполнению лабораторных работ	
Лабораторная работа 1. Моделирование радиолокационного изображения с использованием карты ЭПР местности	165
Лабораторная работа 2. Синтез радиолокационного изображения по радиоголограмме	170
Лабораторная работа 3. Подавление спекл-шума на радиолокационных изображениях	177
Лабораторная работа 4. Анализ радиолокационного образа движущейся многоточечной цели	194
Лабораторная работа 5. Классификация радиолокационных изображений	202
Приложение 1. Комплексные числа. Основные характеристики и свойства.....	211
Приложение 2. Текст программы для моделирования РЛИ движущейся многоэлементной цели в среде MATLAB	218
Список библиографических ссылок.....	222

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данные дистанционного зондирования Земли стали доступны широкому кругу пользователей и активно применяются для решения самых различных задач. К ним относятся: автоматическое обнаружение и дешифрирование объектов, мониторинг территорий для оценки развития как природных, так и антропогенных процессов в различных масштабах и с различной точностью (исследования ландшафтов, морских акваторий, мегаполисов, городов, лесов, состояния сельскохозяйственных земель), построение цифровых моделей местности, оценка смещений земной поверхности и др. Квалифицированный специалист, решающий вышеперечисленные задачи, должен владеть основами теоретических и практических знаний в области уже существующих технологий обработки и применения данных дистанционного зондирования. Важное место среди таких систем занимают космические системы, в основу функционирования которых положен принцип синтезирования апертуры — радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые обладают разрешающей способностью, уступающей оптическим системам, но позволяют осуществлять наблюдение вне зависимости от условий освещенности и облачности.

Пособие содержит основы теории формирования и обработки радиолокационных изображений в системах дистанционного зондирования Земли из космоса и описание цикла лабораторных работ, охватывающего ряд важных практических задач.

Учебно-методическое пособие состоит из двух разделов. Раздел А «Основы обработки цифровых радиолокационных изображений в среде MATLAB» пособия содержит три главы. Первая глава посвящена вопросам разработки программного кода для обработки изображений дистанционного зондирования Земли на примере системы про-

ектирования и моделирования MATLAB. Здесь рассматриваются вопросы организации данных и правил обработки данных в MATLAB, имеющие первостепенное значение при выполнении задач обработки радиолокационных изображений: организация многомерных массивов данных, типы данных, используемых при хранении изображений, множества допустимых операций для этих типов, наиболее часто используемые функции и операции при обработке данных, генерация и обработка случайных полей и элементы математической статистики. Вторая глава посвящена особенностям формирования и обработки собственно радиолокационных изображений, и в ней рассматриваются вопросы формирования и обработки траекторного сигнала, принципов бокового радиолокационного обзора, наиболее часто использующегося в системах дистанционного зондирования Земли, и принципов синтезирования апертуры, вопросы влияния свойств поверхности, параметров и режимов работы радиолокационной системы на свойства и характеристики получаемых изображений. В третьей главе систематизированы сведения об основных гражданских системах дистанционного мониторинга Земли из космоса, данные которых находят широкое применение при решении различных научных и практических задач.

В разделе Б приведены методические указания к пяти лабораторным работам, выполнение которых призвано закрепить знания студентов УрФУ, приобретаемые в ходе теоретического изучения курсов «Основы дистанционного зондирования Земли», «Радиолокационные системы с высокой разрешающей способностью», а также развить умения и навыки в области обработки данных дистанционного зондирования Земли и инженерного и научного программирования. Работы по умолчанию выполняются в среде MATLAB и посвящены вопросам моделирования радиолокационной обстановки и соответствующего ей радиолокационного сигнала, синтеза радиолокационных изображений, базовым вопросам обработки радиолокационных изображений (подавление спектр-шума), в том числе их классификации.

Пособие будет полезно студентам и аспирантам технических специальностей и направлений обучения, изучающим современные радиотехнические системы и пытающимся самостоятельно решать задачи по разработке алгоритмов моделирования и обработке радиолокационных данных.

РАЗДЕЛ А

**Основы обработки цифровых
радиолокационных изображений
в среде MATLAB**



MATLAB®

1. Использование MATLAB при обработке изображений в радиодиапазоне

MATLAB (Matrix Laboratory) — программное обеспечение (ПО), предназначенное для решения научных и инженерных задач любого уровня сложности. Названное ПО применяется для математического моделирования, обработки и визуализации данных, в том числе и многомерных [1]. MATLAB представляет собой сочетание полноценного языка программирования, позволяющего решать любые программно-алгоритмические задачи, и набора пакета прикладных программ (Toolbox), направленных на решение различных узкоспециализированных вопросов. Следует отметить, что прикладные программы определены непосредственно в ядре MATLAB, за счет чего обращение к функциональным возможностям прикладных пакетов возможно напрямую, без специального подключения каких-либо библиотек.

Одной из ключевых особенностей ПО MATLAB является матричное представление данных, т. е. все функции спроектированы под обработку массивов, причем размерность массива в большинстве случаев может быть произвольной. Отсюда следует такое достоинство ПО MATLAB, как увеличенная скорость обработки данных матричного представления, к числу которых относятся и цифровые изображения. Более того, такая особенность функций зачастую позволяет избежать использования циклов при обработке изображений, что также уменьшает общее время расчетных процедур и позволяет создавать достаточно емкие коды. Сравнительно быстрая обработка многомерных массивов данных, возможность компактного представления тек-

ста программы, набор функций обработки изображений, определенных в пакете Image Processing Toolbox, а также слабая и динамическая типизация переменных делают ПО MATLAB идеальным инструментом для решения научных и учебных задач, ассоциированных с изображениями.

1.1. Типы данных в ПО MATLAB

Прежде чем рассмотреть специфику работы ПО MATLAB, необходимо проанализировать некоторые особенности различных типов данных. Под типом данных (class) понимается множество возможных значений переменной и операций, определенных на обозначенном множестве в некотором языке программирования. Все возможные типы данных ПО MATLAB можно условно разделить на четыре группы (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Классификация типов данных ПО MATLAB

Первые три группы из представленных типов данных предназначены для обработки числовых массивов, выполнения логических операций и работы с текстовыми элементами. К последней, специальной, группе данных относятся различные типы переменных, определяемые, как правило, в прикладных пакетах и используемые для решения узко-специализированных задач. В качестве примера можно привести тип Datetime, определяющий переменную, которую можно трактовать как дату и (или) время. Использование типа Datetime для хранения переменных позволяет без дополнительных алгоритмических уточнений производить такие операции, как расчет количества дней либо часов между заданными датами, соотнесение даты и дня недели и дру-

гие манипуляции с учетом календаря и особенностей записи местного времени, принятого для различных государств [1]. Рассмотрим более подробно наиболее часто применяемые типы данных ПО MATLAB.

1.1.1. Числовые типы данных

Числовые типы данных (numerical) ПО MATLAB подразделяются, в свою очередь, на три класса: целочисленные, с плавающей точкой и комплексные. Рассмотрим числовые данные, начиная с целочисленных переменных (integer). Существует два типа целочисленных данных в ПО MATLAB — знаковые (signed) и беззнаковые (unsigned). Знаковые переменные обозначаются в рабочей среде как «`intN`», беззнаковые соответственно как «`uintN`», где N — количество бит, отводимое на хранение числового значения, которое может принимать величину 8, 16, 32 либо 64 (рис. 1.2). Например, для хранения числовой переменной типа `uint8` отводится 8 бит. Таким образом, переменная может принимать целочисленные значения в диапазоне от 0 до 255 включительно. Если же переменная сохранена в типе `int8`, то она может принимать целочисленные значения в диапазоне от -128 до 127 ¹.

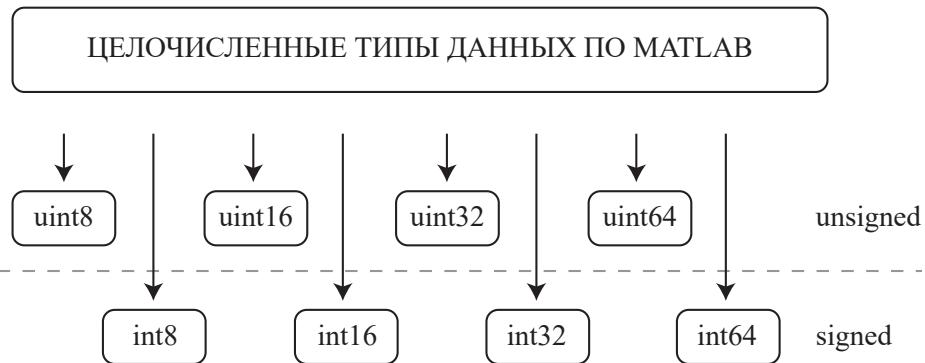


Рис. 1.2. Классификация целочисленных типов данных ПО MATLAB

Хранение переменных в целочисленном формате накладывает ряд ограничений на возможность их дальнейшей обработки. В част-

¹ Такая особенность представления связана с американским происхождением среды MATLAB, где число 0 рассматривается как натуральное положительное число [2].

ности, для этого типа данных не определено большинство функций ПО MATLAB: при попытке их применить средой будет возвращена ошибка (рис. 1.3). Арифметические операции на множестве целочисленных значений допустимы, однако результат расчета будет автоматически огрублен до диапазона значений, разрешенного конкретным типом данных. Например, если переменная представлена в формате uint8, то в ходе произвольных арифметических операций возвращаемое значение не будет превышать величину 255 и не сможет принимать отрицательную величину (рис. 1.4). Поскольку целочисленный беззнаковый формат является типом данных по умолчанию, для работы ряда специализированных функций, таких как imread, эту особенность при работе с целочисленными данными следует иметь в виду.

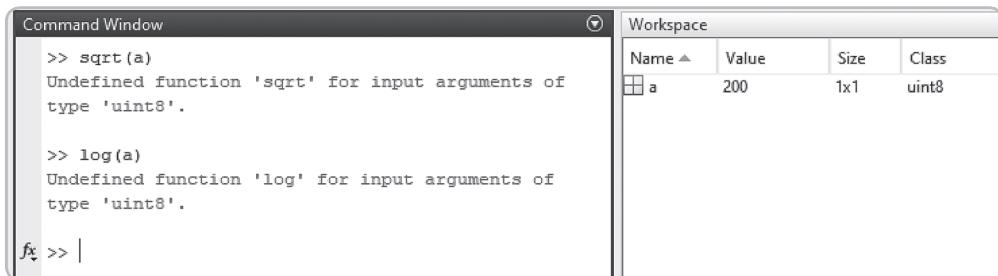


Рис. 1.3. Результат применения некоторых функций к целочисленному типу данных в ПО MATLAB

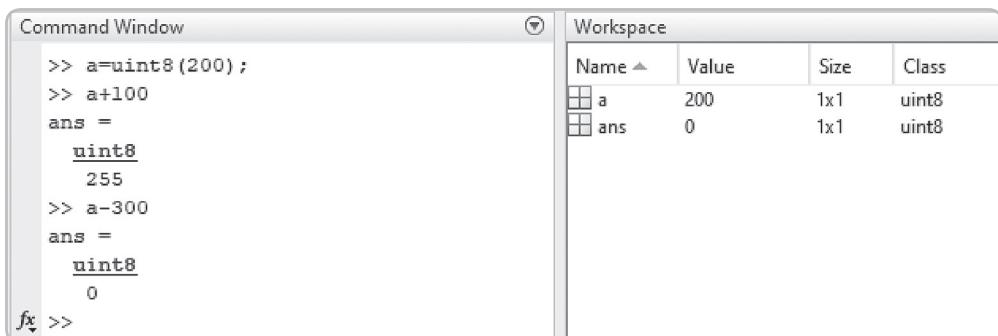


Рис. 1.4. Результат использования арифметических операций на целочисленном множестве данных в ПО MATLAB

Следующий числовой тип данных ПО MATLAB — вещественный с плавающей точкой (float). Он подразделяется на два подтипа: вещественный с одинарной точностью (single), для которого на хранение

одного числового значения отводится 32 бита, и вещественный с двойной точностью (double), для которого под запись отдельного числового значения отводится 64 бита. Формат double является типом данных по умолчанию для представления числовых значений в среде MATLAB. Рассмотрим его более подробно.

Первый бит в записи числового значения формата double отводится под хранение его знака, являющегося знаком мантиссы. Последующие 11 бит отводятся под хранение порядка числа, причем порядки могут принимать как положительные, так и отрицательные значения. И, наконец, последние 52 бита используются для представления мантиссы числового значения [3]. Таким образом, наименьшее число, выражаемое мантиссой, может быть найдено как $2^{-52} \approx 1,22^{-16}$, что является машинной точностью формата double, т. е. числа с относительной точностью лучшей указанного значения не могут быть выражены типом данных double. Несмотря на то что величина порядка 10^{-16} является достаточно маленькой и в большинстве задач может быть интерпретирована как ноль, в ряде случаев данное значение может быть накоплено в ходе вычислительных процедур, а это, в свою очередь, может привести к неверной трактовке результата. В частности, на рис. 1.5 представлен график зависимости величины $|\sin(N\pi)|$ от N , где N — целое положительное число в интервале от 1 до 100.

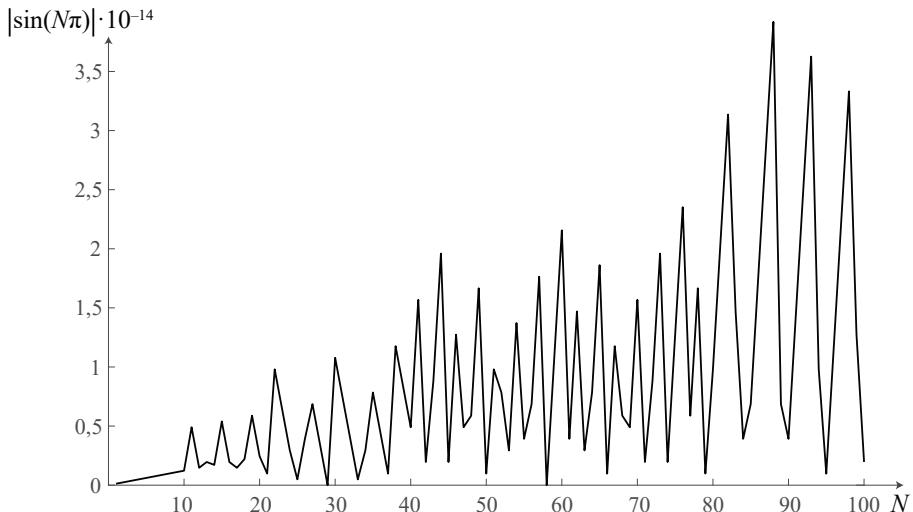


Рис. 1.5. График зависимости $|\sin(N\pi)|$ от параметра N (иллюстрация накопления ошибки, возникающей из-за машинной точности формата double)

Несмотря на то, что с математической точки зрения указанная функция равна нулю для любых значений N , в ПО MATLAB из-за представления функции $\sin(x)$ в виде ряда Тейлора и последующего накопления машинной точности числа наблюдается возрастание возвращаемого значения.

Также возможно определить наибольшее число, выражаемое типом данных `double`. Согласно количеству бит, разрешенному для хранения порядка, это значение составляет $2^{1024} \approx 1,797^{308}$. Следовательно, числовые значения, превышающие эту величину, не могут быть выражены типом данных `double` и будут представлены в виде бесконечности.

Наконец, последний тип числовых данных относится к множеству комплексных чисел, для этого существует две группы данных: `complex double` (двойная точность) и `complex single` (одинарная точность). В таких типах данных каждое числовое значение представлено в виде $a + jb$, где a — действительная часть числа, b — мнимая часть числа, j — мнимая единица, $j^2 = -1$. Как мнимая, так и действительная части комплексного числа, в свою очередь, по аналогии с вещественным типом данных представляются в виде мантиссы и порядка. Таким образом, в случае двойной точности под хранение одного числового значения отводится 128 бит на одну переменную, в случае одинарной — 64 бита. Для мнимой единицы существует четыре варианта обозначения: `i`, `j`, `1i`, `1j`.

Следует отметить, что в ПО MATLAB предусмотрена возможность динамической типизации данных, т. е. одна и та же переменная на различных этапах исполнения кода может многократно изменять тип данных (рис. 1.6). Данное свойство среды MATLAB позволяет упростить процесс создания программы, оставляя за разработчиком возможность сокращения множества используемых переменных.

Часть отдельных числовых значений отводится под хранение специальных числовых констант: бесконечности и неопределенного значения. Бесконечность в среде MATLAB возникает как результат деления числа на ноль и обозначается как `Inf`. Существует два типа бесконечности: положительная (`+Inf`) и отрицательная (`-Inf`), причем знак бесконечности определяется знаком числителя в исходном выражении. В среде MATLAB результат деления любого числового значения на бесконечность даст ноль. Неопределенное значение обозначается как `NaN` и при использовании числовых выражений возникает, например, как результат деления нуля на ноль. Одной из осо-

бенностью MATLAB является тот факт, что любые математические выражения, содержащие NaN, будут также возвращать неопределенные значения (рис. 1.7).

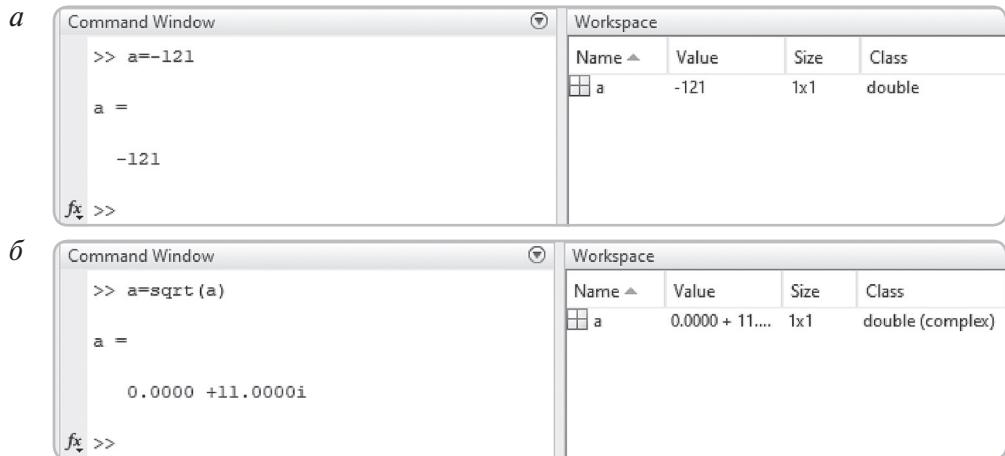


Рис. 1.6. Иллюстрация динамической типизации ПО MATLAB:

а — переменная типа данных double;

б — та же самая переменная типа данных complex double

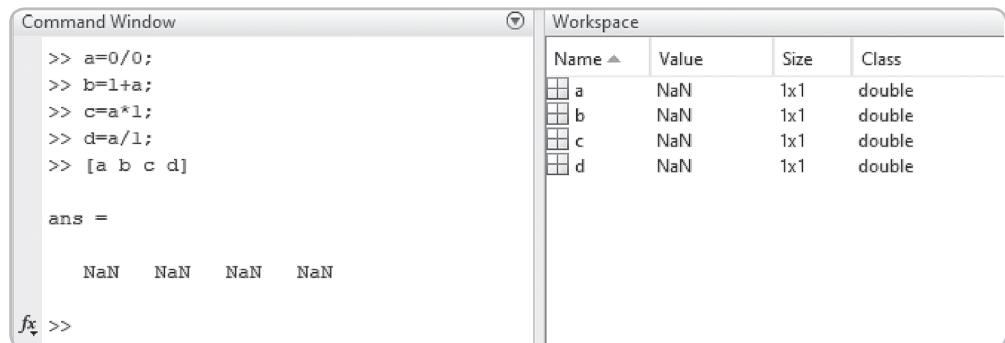


Рис. 1.7. Выполнение математических операций в среде MATLAB с использованием неопределенного значения

1.1.2. Логический тип данных

Следующая группа типов данных ПО MATLAB представлена единственным форматом logical, который может принимать два возможных значения: 1 (true) и 0 (false). Следовательно, под хранение одного

элемента в среде отводится 1 бит памяти. Переменные этого типа возникают как результат выполнения логических операций либо операций сравнения. Благодаря динамической типизации в ПО MATLAB предусмотрена возможность сочетания в одном выражении переменных логического и числового типов (рис. 1.8), что, с одной стороны, упрощает расчетные процедуры, с другой стороны, существенно расширяет возможности ПО MATLAB, как будет показано ниже.

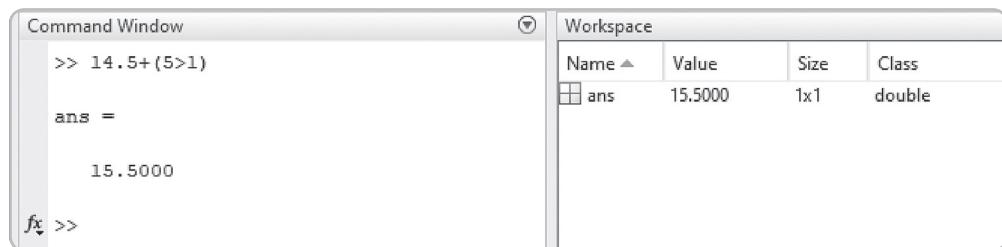


Рис. 1.8. Сочетание переменных числового и логического типов данных

1.1.3. Строковые типы данных

Группа строковых типов данных включает два формата: `char` и `string`. Формат `char` является типом данных по умолчанию для символьных переменных; на хранение одного элемента для этого типа данных отводится 16 бит. Текстовая строка в формате `char` интерпретируется как массив из единичных символов, что существенно упрощает обработку текстовых данных. Формат `string` появился в версии MATLAB 2016b и предназначен для упрощенной работы со строковыми данными: поддерживает такие операции, как объединение и разделение строк, поиск группы символов в строке и использование регулярных выражений.

Как и в случае числовых типов данных, строковые форматы можно сочетать с логическим типом. Такая возможность в ПО MATLAB позволяет проводить различные преобразования над текстом без использования ветвлений. Пример использования такого сочетания для решения задачи о замене определенных символов исходного текста показан на рис. 1.9. Здесь выражение `text=='f'` возвращает массив логического типа данных, размеры которого совпадают с размерами массива `text`. Использование полученного массива в качестве индексов к исходному эквивалентно процедуре маскирования («логическое

индексирование»), в этом случае в качестве отклика вернутся только те элементы массива `text`, для которых условие `text=='f'` является истинным. Далее сформированные значения приравниваются к значению '`a`', что и является процедурой замены символов исходного фрагмента текста.

The screenshot shows the MATLAB interface with two main windows: 'Command Window' and 'Workspace'.

Command Window:

```
>> text='Солдат по осени считают'
text =
    'Солдат по осени считают'
>> text(text=='f')='o'
text =
    'Солдат по осени считают'
fx >>
```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
text	'Солдат по...'	1x23	char

Рис. 1.9. Сочетание переменных строкового и логического типов данных

1.1.4. Преобразование типов данных

В общем случае преобразование типов данных в ПО MATLAB реализуется с помощью функций, названия которых совпадают с названием типа данных. Для преобразования целочисленного числового формата в вещественный необходимо использовать функцию `double`, для преобразования переменной в логический тип данных — функцию `logical` и т. д. Если используется функция `logical`, а в качестве аргумента — любое числовое значение, отличное от нуля (рис. 1.10), то значение «`true`» возвращается.

Применительно к строковым типам данных также возможно использование функций преобразования. Причем если используется функция, соответствующая числовым значениям, то будет возвращена кодировка того или иного символа, а если используется функция преобразования в логический тип данных, то всегда будет возвращено «`true`»². Также возможно использование функции `char` применительно к числовым значениям, тогда будет возвращен символ с соответствующим значением кодировки, причем в случае нецелочисленного

² Исключение составляет пустой символ, которому соответствует кодировка со значением 0.

аргумента дробная часть будет отброшена. Некоторые примеры использования функций преобразования применительно к символьным типам данных показаны на рис. 1.11.

The screenshot shows the MATLAB interface with the Command Window on the left and the Workspace browser on the right.

Command Window:

```
>> a2=double(a1)
a2 =
    48
>> b2=uint16(b1)
b2 =
    uint16
    16
>> c2=logical(c1)
c2 =
    logical
    0
>> d2=logical(d1)
d2 =
    logical
    1
fx >>
```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
a1	48	1x1	uint8
a2	48	1x1	double
b1	15.5000	1x1	double
b2	16	1x1	uint16
c1	0	1x1	double
<input checked="" type="checkbox"/> c2	0	1x1	logical
d1	16	1x1	double
<input checked="" type="checkbox"/> d2	1	1x1	logical

Рис. 1.10. Использование некоторых числовых и логической функций преобразования типов данных в ПО MATLAB

The screenshot shows the MATLAB interface with the Command Window on the left and the Workspace browser on the right.

Command Window:

```
>> a2=double(a1)
a2 =
    74
>> a3=uint8(a1)
a3 =
    uint8
    74
>> a4=logical(a1)
a4 =
    logical
    1
>> b2=char(b1)
b2 =
    'I'
fx >>
```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
<input checked="" type="checkbox"/> a1	'J'	1x1	char
a2	74	1x1	double
a3	74	1x1	uint8
<input checked="" type="checkbox"/> a4	1	1x1	logical
b1	73	1x1	double
<input checked="" type="checkbox"/> b2	'I'	1x1	char

Рис. 1.11. Использование некоторых числовых и строковых функций преобразования типов данных в ПО MATLAB

В некоторых случаях бывает необходимо интерпретировать числовое значение как символьное, например, если это значение по ходу выполнения программы используется в качестве одной из составляю-

щих наименования выходного файла. Для этого можно использовать функцию преобразования `num2str`, преобразующую число в соответствующий ему символ. Если числовая величина включает несколько цифр, то ответ будет возвращен в виде вектор-строки, длина которой соответствует количеству цифр в записи числа, включая знак разделителя. Обратная функция называется `str2double`, позволяет преобразовать символьную запись некоторого числа в его числовое значение. Если в качестве аргумента функции используется символьная запись, не соответствующая числовому значению, то функция возвращает `NaN`. Примеры использования функций `num2str` и `str2double` показаны на рис. 1.12.

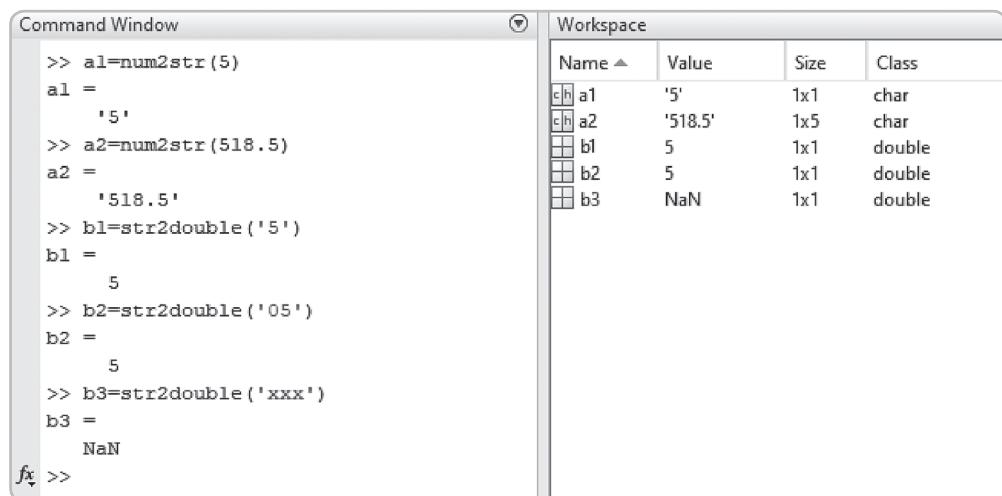


Рис. 1.12. Использование функций `num2str` и `str2double` в ПО MATLAB

В ПО MATLAB возможно конструирование пользовательских типов данных средствами объектно-ориентированного программирования. При этом понятие типа данных будет эквивалентно понятию класса, а понятие переменной определенного типа данных — понятию экземпляра класса. Сам класс внутри себя может содержать переменные, функции, массивы и иные классы объектов. Пользовательские типы данных могут применяться при работе с заголовками (метаданными) ряда распространенных форматов геокодированных растров, например GeoTiff. Также элементы объектно-ориентированного программирования используются при обработке документов Microsoft Word и Access.

Следует подчеркнуть, что в ПО MATLAB любые переменные представлены в виде массивов данных, в том числе отдельные числовые и символьные элементы (см. параметр «size» окна Workspace на рис. 1.3, 1.4, 1.6–1.8, 1.10–1.12). Массив в среде MATLAB в общем случае может иметь любые размеры и обладать любой размерностью, включая в себя при этом переменные только одного типа данных. Если имеется необходимость сочетания в одном массиве разнородных данных, то следует использовать массив ячеек либо структуру данных [1].

1.2. Массивы и базовые операции над ними в ПО MATLAB

Массивом в языках программирования принято называть совокупность данных единого типа с общим именем, причем к элементам массива возможно осуществить обращение по указанию индекса либо набору индексов. Обозначение индексов массива начинается с единицы, обращение осуществляется посредством указания номера элемента индекса в круглых скобках (рис. 1.13, *a*). Если массив двумерный, то сначала указывается положение индекса по строкам, затем по столбцам (рис. 1.13, *б*).

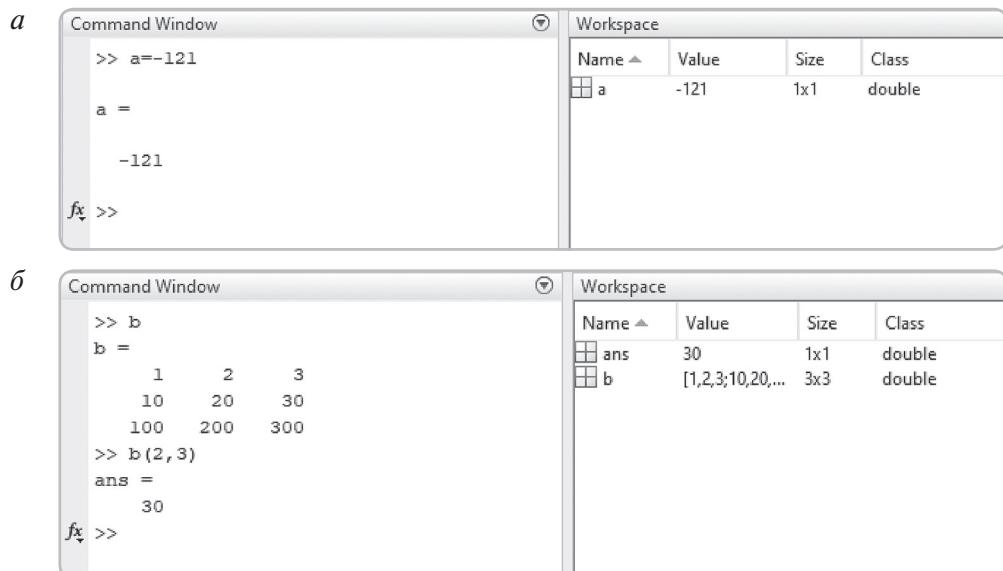


Рис. 1.13. Обращение к элементам массива через индексы:

a — одномерный массив (вектор-строка); *б* — двумерный массив

Также возможно обращение сразу к группе индексов с использованием оператора объединения «`:`» (рис. 1.14, *а*), при этом в качестве последнего элемента индекса возможно использование ключевого слова `end`, инициирующего обращение к последнему элементу строки либо столбца массива (рис. 1.14, *б*). Если при работе с элементами массива требуется обратиться сразу ко всем элементам строки либо столбца, то возможно использование сокращенной записи «`:`» вместо «`1:end`» (рис. 1.14, *в*).

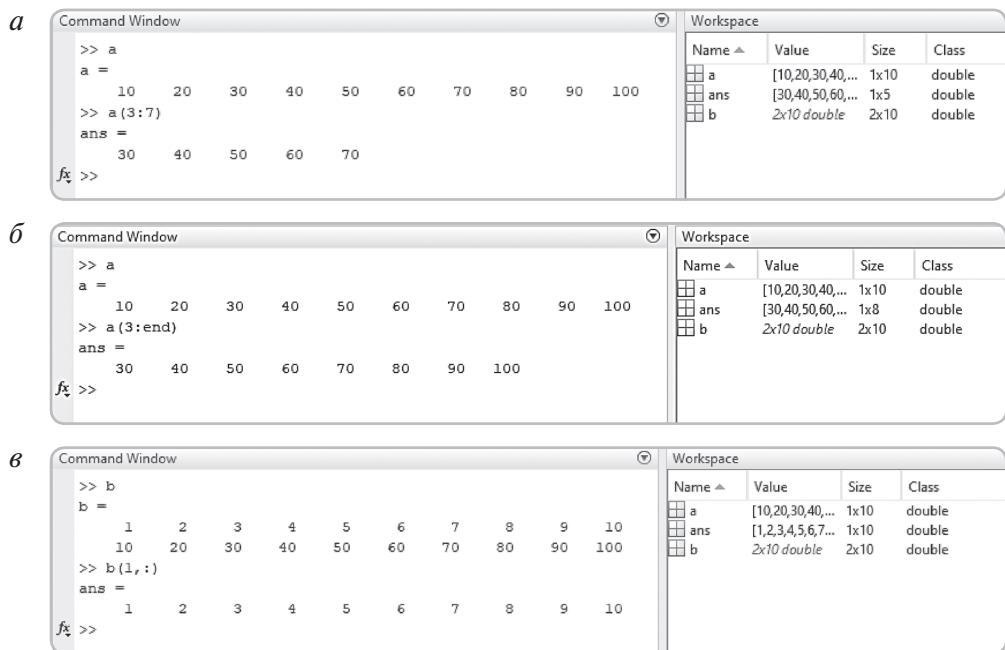


Рис. 1.14. Обращение к упорядоченной группе элементов массива:

а — обращение с 3-го по 7-й индекс включительно; *б* — обращение с 3-го по последний индекс включительно; *в* — обращение ко всем элементам столбца

Если необходимо обратиться к элементам массива в произвольном порядке, возможно использование оператора объединения «`[]`», в рамках которого указываются нужные для дальнейшей работы индексы либо множество индексов. Пример использования оператора объединения для обращения к элементам вектор-строки приведен на рис. 1.15.

Для изменения значения элемента массива следует осуществить операцию присвоения, используя обращение к нужным индек-

сам массива. Возможно присвоение значения как точечных элементов (рис. 1.16, *a*), так и группы элементов, заданных в виде матриц (рис. 1.16, *b*), причем в последнем случае важно соблюдать совпадение количества индексов, к которым выполнено обращение, и количества присваиваемых элементов.

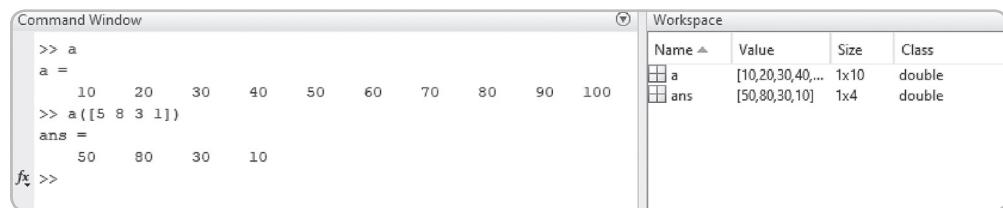


Рис. 1.15. Обращение к неупорядоченной группе элементов массива в ПО MATLAB

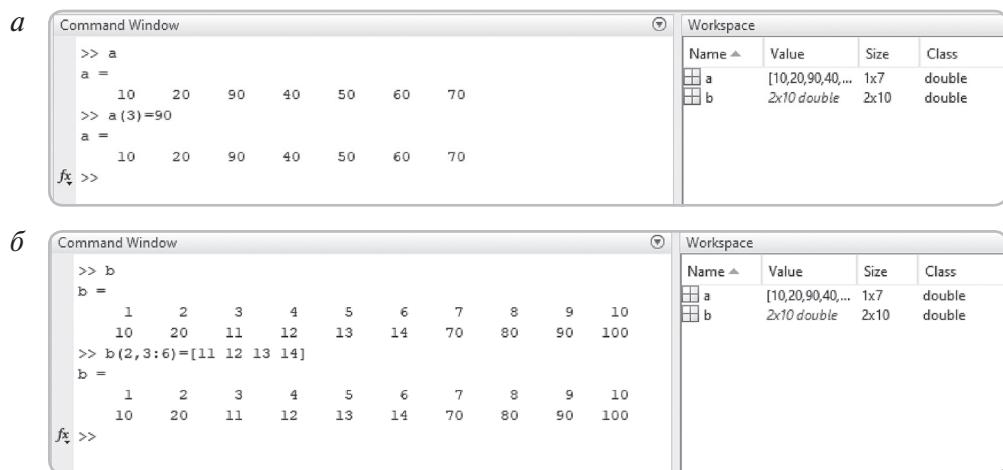


Рис. 1.16. Присвоение элементам массива в ПО MATLAB новых значений:
а — отдельное значение; б — множество значений

Также следует отметить, что процедура присвоения элементов массива во время работы с числовыми либо логическими типами данных позволяет автоматически увеличить его размерность. В частности, если размерность исходного массива равна двум, то присвоение некоторого значения позиции, соответствующей третьей размерности, приведет к увеличению размерности исходного массива до трех, при этом не определенные явно элементы будут инициализированы нулями.

Операция удаления элемента массива в ПО MATLAB (рис. 1.17) эквивалента процедуре присвоения его значению пустого множества, обозначаемого как «`[]`». Следует отметить, что поэлементное удаление возможно только для одномерных массивов, применительно к двумерным массивам возможно удаление только целиком строк либо столбцов матрицы. В случае работы с массивом более высокой размерности L , возможно удаление только слоев размерности $(L-1)$.

a

Command Window:

```
>> c
c =
    1     2     3     4     5     5     6     7
>> c(5) = []
c =
    1     2     3     4     5     6     7
fz >>
```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
c	[1,2,3,4,5,6,7]	1x7	double
d	[1,2,3;1,2,3;1...]	3x3	double

б

Command Window:

```
>> d
d =
    1     2     3
    4     5     6
    7     8     9
>> d(2,:) = []
d =
    1     2     3
    7     8     9
fz >>
```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
c	[1,2,3,4,5,6,7]	1x7	double
d	[1,2,3;7,8,9]	2x3	double

в

Command Window:

```
>> d
d =
    1     2     3
    4     5     6
    7     8     9
>> d(2,3) = []
A null assignment can have only one non-colon index.
fz >>
```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
c	[1,2,3,4,5,6,7]	1x7	double
d	[1,2,3;4,5,6;7...]	3x3	double

Рис. 1.17. Удаление элементов массива в ПО MATLAB:

а — одномерный массив; *б* — строка двумерного массива; *в* — попытка удаления одиночных элементов двумерного массива

Зачастую при работе с элементами массивов в целях упрощения дальнейших вычислений бывает удобно использовать некоторые специальные функции. Рассмотрим более подробно некоторые из них.

Первая из таких функций (рис. 1.18, *а*), называемая `size`, предназначена для определения размеров массива. В качестве аргумента

функции используется переменная, соответствующая массиву, при этом возвращаемыми значениями будут количество строк и количество столбцов массива. Следует обратить внимание на особенности отклика функции, который, как следует из рисунка, представляет собой два числовых значения, объединенные в один массив (переменная *ans*). Поэтому для четкого разнесения результатов использования функции *size* рекомендуется оформлять возвращаемое значение в полной форме (рис. 1.18, б). Также данное замечание справедливо для массивов более высокой размерности, в частности на рис. 1.19 показан результат применения функции *size* к массиву размером $3 \times 4 \times 3$.

a		b																	
Command Window		Workspace																	
>> a																			
a =																			
1 2 3 4																			
5 6 7 8																			
9 10 11 12																			
>> size(a)																			
ans =																			
3 4																			
<i>f5</i>	>>	<i>f5</i>	>>																
		Workspace																	
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Size</th> <th>Class</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>3x4 double</td> <td>3x4</td> <td>double</td> </tr> <tr> <td>ans</td> <td>[3,4]</td> <td>1x2</td> <td>double</td> </tr> </tbody> </table>		Name	Value	Size	Class	a	3x4 double	3x4	double	ans	[3,4]	1x2	double				
Name	Value	Size	Class																
a	3x4 double	3x4	double																
ans	[3,4]	1x2	double																
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Name</th> <th>Value</th> <th>Size</th> <th>Class</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>a</td> <td>3x4 double</td> <td>3x4</td> <td>double</td> </tr> <tr> <td>x</td> <td>3</td> <td>1x1</td> <td>double</td> </tr> <tr> <td>y</td> <td>4</td> <td>1x1</td> <td>double</td> </tr> </tbody> </table>		Name	Value	Size	Class	a	3x4 double	3x4	double	x	3	1x1	double	y	4	1x1	double
Name	Value	Size	Class																
a	3x4 double	3x4	double																
x	3	1x1	double																
y	4	1x1	double																

Рис. 1.18. Использование функции *size* в ПО MATLAB:

a — краткая запись возвращаемого значения; *b* — полная запись возвращаемого значения

Поскольку любое значение в среде MATLAB представлено в матричной форме, то даже в случае применения функции *size* к числовому значению будет возвращено две величины, равные единице. То же самое относится к вектор-строкам и вектор-столбцам. В этом случае

более удобной будет функция `length` (рис. 1.20), в качестве возвращаемого значения которой выступает одно единственное значение, равное наибольшему из размеров многомерного массива.

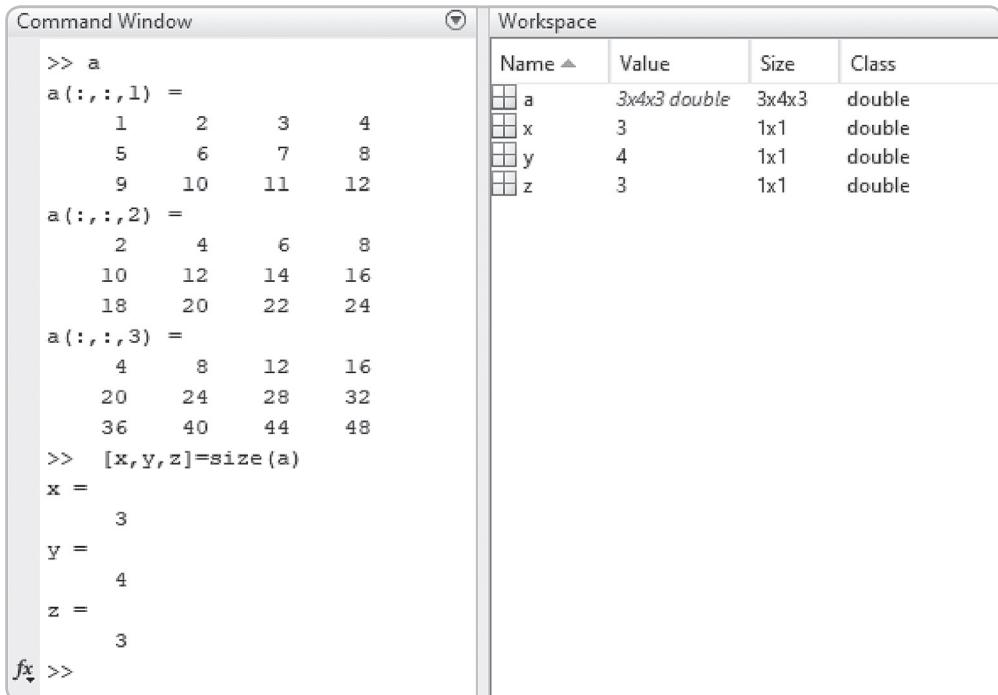


Рис. 1.19. Использование функции `size` в ПО MATLAB для трехмерного массива

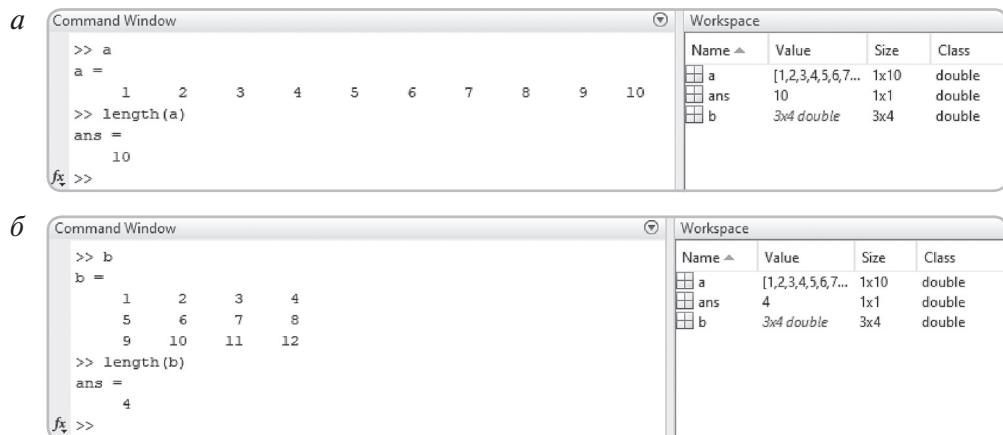


Рис. 1.20. Использование функции `length` в ПО MATLAB:

а — одномерный массив; *б* — двумерный массив

Еще одной удобной функцией для работы с массивами является `reshape`, которая позволяет изменять размеры (и размерность) массива при сохранении общего количества элементов (рис. 1.21). Функция требует два обязательных аргумента: первый аргумент — переменная, обозначающая изменяемый массив, второй аргумент — размеры выходных данных, представленные в виде совокупности размеров формируемого массива $[x \ y]$. При использовании этой функции важно соблюдать сохранение объемов массивов, т. е. произведение аргументов x и y должно быть в точности равно количеству элементов исходного массива.

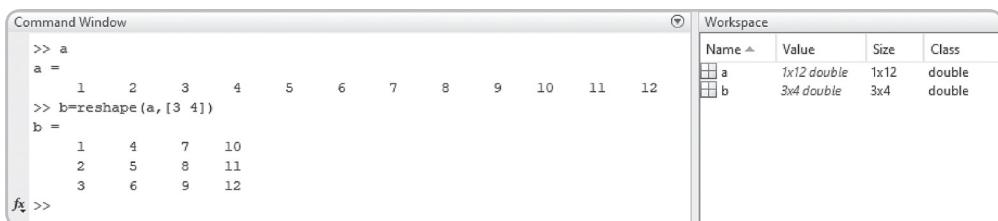


Рис. 1.21. Использование функции `reshape` в ПО MATLAB
(преобразование вектор-строки в двумерный массив данных)

Если необходимо выполнить обратную процедуру, т. е. преобразовать многомерный массив в одномерный, полезно использовать операцию расшивки, обозначаемую как $a(:)$, где a — многомерный массив. В случае двумерного исходного массива размерами $n \times m$ операция расшивки формирует один вектор-столбец, элементы которого упорядочены следующим образом: сначала в выходной массив записываются n элементов первого столбца, затем n элементов второго столбца, и т. д. (рис. 1.22). Для массивов более высокой размерности расшивка реализуется следующим образом: сначала расшивка происходит для элементов первого слоя массива согласно принципу, рассмотренному для двумерного массива, затем для элементов второго слоя и т. д. Если для дальнейшей обработки результатов данные удобнее представить в виде вектор-строки, то к результату расшивки необходимо применить операцию транспонирования, обозначаемую в ПО MATLAB как «'».

Если необходимо осуществить сдвиг размерностей массива, целесообразно использовать функцию `shiftdim`. В качестве первого аргумента функции используется переменная, относящаяся к многомерному (размерность 2 и выше) массиву, в качестве второго аргумента — целое числовое значение n .

The screenshot shows the MATLAB interface with the Command Window on the left and the Workspace browser on the right.

Command Window:

```

>> a
a(:,:,1) =
    1     4     7    10
    2     5     8    11
    3     6     9    12
a(:,:,2) =
    2     8    14    20
    4    10    16    22
    6    12    18    24
a(:,:,3) =
    3    12    21    30
    6    15    24    33
    9    18    27    36
>> shiftdim(a,2)
ans(:,:,1) =
    1     2     3
    2     4     6
    3     6     9
ans(:,:,2) =
    4     5     6
    8    10    12
   12    15    18
ans(:,:,3) =
    7     8     9
   14    16    18
   21    24    27
ans(:,:,4) =
    10    11    12
   20    22    24
   30    33    36
f2 >>

```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
a	3x4x3 double	3x4x3	double
ans	3x3x4 double	3x3x4	double

Рис. 1.22. Использование операции расшивки в ПО MATLAB

The screenshot shows the MATLAB interface with the Command Window on the left and the Workspace browser on the right.

Command Window:

```

>> a
a(:,:,1) =
    1     4     7    10
    2     5     8    11
    3     6     9    12
a(:,:,2) =
    2     8    14    20
    4    10    16    22
    6    12    18    24
a(:,:,3) =
    3    12    21    30
    6    15    24    33
    9    18    27    36
>> shiftdim(a,2)
ans(:,:,1) =
    1     2     3
    2     4     6
    3     6     9
ans(:,:,2) =
    4     5     6
    8    10    12
   12    15    18
ans(:,:,3) =
    7     8     9
   14    16    18
   21    24    27
ans(:,:,4) =
    10    11    12
   20    22    24
   30    33    36
f2 >>

```

Workspace:

Name	Value	Size	Class
a	3x4x3 double	3x4x3	double
ans	3x3x4 double	3x3x4	double

Рис. 1.23. Использование функции shiftdim в ПО MATLAB при $n > 0$

Если n положительное, то функция осуществляет сдвиг размерности исходного массива на эту величину влево, при этом n первых размерностей подставляются в конец (см. рис. 1.23); если n отрицательное, выполняется сдвиг на n размерностей вправо, а n первых размерностей дополняются единичными элементами (рис. 1.24).

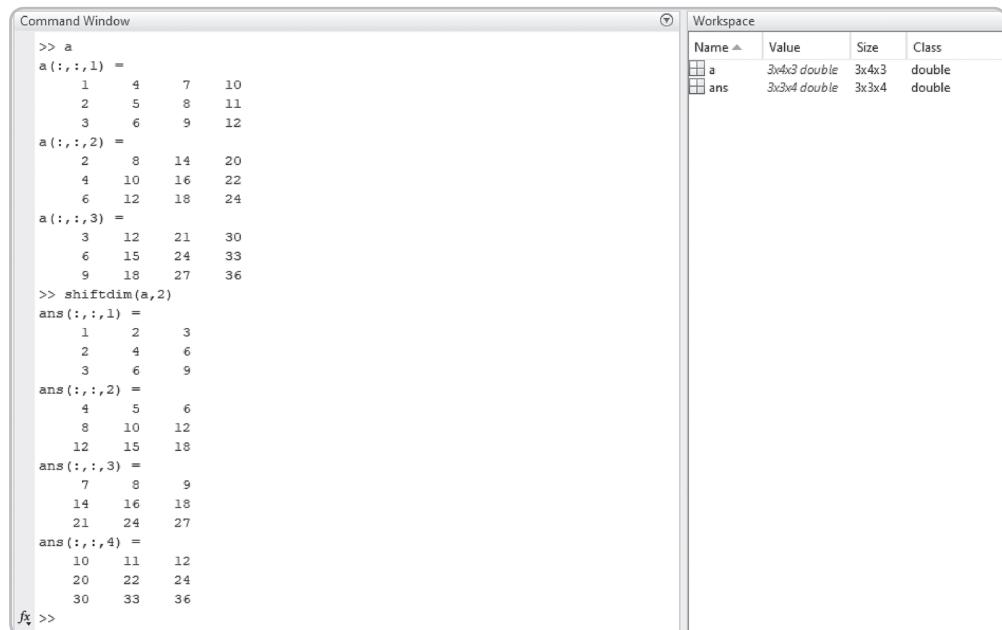


Рис. 1.24. Использование функции `shiftdim` в ПО MATLAB при $n < 0$

Функция `shiftdim` также может быть использована для понижения размерности многомерного массива, если в нем присутствуют единичные размерности. В этом случае ее возвращаемое значение должно быть оформлено в полном виде как $[a_1, d] = \text{shiftdim}(a)$, при этом в переменную `d` будет записано количество удаленных размерностей. Пример такого применения функции показан на рис. 1.25. Следует отметить, что аналогичными возможностями в части удаления единичной размерности обладает функция `squeeze`.

```

>> a
a(:,:,1,1) =
    1     2     3
a(:,:,2,1) =
    4     5     6
a(:,:,3,1) =
    7     8     9
a(:,:,4,1) =
   10    11    12
a(:,:,1,2) =
    2     4     6
a(:,:,2,2) =
    8    10    12
a(:,:,3,2) =
   14    16    18
a(:,:,4,2) =
   20    22    24
a(:,:,1,3) =
    3     6     9
a(:,:,2,3) =
   12    15    18
a(:,:,3,3) =
   21    24    27
a(:,:,4,3) =
   30    33    36
>> [b,d]=shiftdim(a)
b(:,:,1) =
    1     4     7    10
    2     5     8    11
    3     6     9    12
b(:,:,2) =
    2     8    14    20
    4    10    16    22
    6    12    18    24
b(:,:,3) =
    3    12    21    30
    6    15    24    33
    9    18    27    36
d =
    1
f2 >>

```

Рис. 1.25. Использование функции `shiftdim` в ПО MATLAB
для задач понижения единичных размерностей массива

В ПО MATLAB существует возможность автоматического формирования различных массивов, элементы которых обладают заданными свойствами. В частности, функция `ones` формирует массив произвольной размерности, состоящий из единиц, функция `zeros` — массив произвольной размерности, состоящий из нулей, функция `eye` — единичную³ двумерную матрицу. Использование этих функций позволяет в ряде случаев облегчить расчетные процедуры для пользовательских данных, и следовательно, избежать употребления ветвлений. Однако в ряде случаев бывает удобно формирование специальных массивов, состоящих не из фиксированных элементов, а случайных, подчиненных некоторому закону распределения.

³ Матрица, в которой на главной диагонали расположены единицы, все остальные элементы равны нулю.

1.3. Генерация и обработка случайных полей в ПО MATLAB

Зачастую при моделировании различных природных процессов возникает необходимость генерации наборов случайных величин, распределенных по тому или иному закону. В ПО MATLAB предусмотрены две функции для решения таких задач: `randn` и `rand`, формирующие наборы нормально и равномерно распределенных числовых значений. Использование этих функций в качестве базовых дает возможность создания случайных полей, подчиненных произвольному закону распределения, в частности, как будет показано ниже, экспоненциальное распределение может быть сформировано на основании двух независимых нормальных распределений.

Функции `randn` и `rand` формируют массивы случайных значений, в качестве аргумента функций служат размеры выходных массивов, причем размерность выходных данных может быть произвольной. Если в качестве аргумента используется единственное числовое значение, функциями будут возвращены двумерные квадратные матрицы, размер стороны которых численно равен аргументу. Пример использования функций `randn` и `rand` показан на рис. 1.26.

Оценку закона распределений случайных величин принято проводить на основе гистограммы — графической зависимости, где по оси абсцисс отложены значения, которые может принимать случайная величина, по оси ординат — количество элементов, попадающих в тот или иной диапазон случайной величины [4]. В ПО MATLAB предусмотрено несколько функций, инициирующих построение гистограммы. Рассмотрим более подробно наиболее употребляемую — `hist`. Функция требует один аргумент — переменную, наименование которой соответствует анализируемый массив случайных величин, — и по умолчанию формирует гистограмму из 10 интервалов (рис. 1.27, а). Количество интервалов может быть настроено с помощью дополнительного параметра (рис. 1.27, б), также возможна коррекция цветов обводки и заливки гистограммы, нанесение поясняющих надписей и иные возможности [1].

Рассмотрим подробнее некоторые числовые характеристики случайных величин, возвещаемых функциями `rand` и `randn`. Функция `rand` формирует массив случайных чисел, распределенных равномерно в диапазоне от 0 до 1 (рис. 1.28, а).

a

Command Window				Workspace	
Name	Value	Size	Class		
ans	4x5x2 double	4x5x2	double		
>> rand(4,5,2)					
ans(:,:,1) =					
0.3517 0.9172 0.3804 0.5308 0.5688 0.8308 0.2858 0.5678 0.7792 0.4694 0.5853 0.7572 0.0759 0.9340 0.0119 0.5497 0.7537 0.0540 0.1299 0.3371					
ans(:,:,2) =					
0.1622 0.1656 0.6892 0.2290 0.5383 0.7943 0.6020 0.7482 0.9133 0.9961 0.3112 0.2630 0.4505 0.1524 0.0782 0.5285 0.6541 0.0838 0.8258 0.4427					
fx >>					

b

Command Window				Workspace	
Name	Value	Size	Class		
ans	5x5 double	5x5	double		
>> randn(5)					
ans =					
-0.1332 -0.2938 0.3075 -1.3320 0.4517 -0.7145 -0.8479 -1.2571 -2.3299 -0.1303 1.3514 -1.1201 -0.8655 -1.4491 0.1837 -0.2248 2.5260 -0.1765 0.3335 -0.4762 -0.5890 1.6555 0.7914 0.3914 0.8620					
fx >>					

Рис. 1.26. Использование функций `randn` и `rand` в ПО MATLAB:
a — формирование массива размерностью 3; *b* — формирование квадратного массива размерностью 2

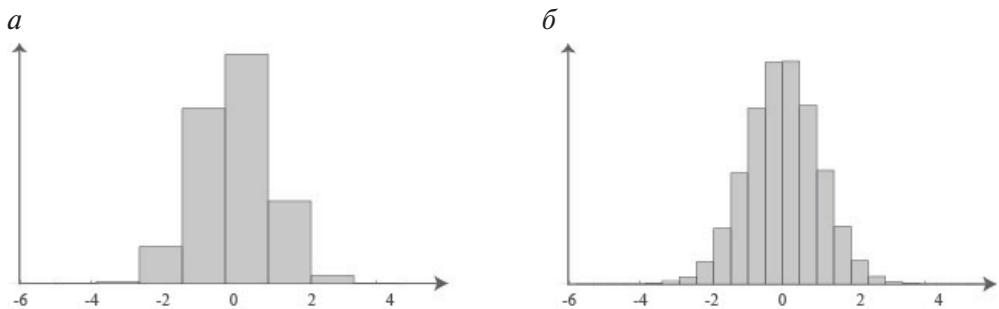


Рис. 1.27. Построение гистограмм массива случайных нормально распределенных величин в ПО MATLAB:

a — использование функции вида `hist(a)`;
b — использование функции вида `hist (a, 25)`

Очевидно, что чем большее количество числовых значений будет сформировано, тем более выраженным будет закон распределения на гистограмме. Если имеется необходимость изменить диапазон равномерно распределенных величин, к полученному массиву следует применить операции умножения на некоторую константу (изменение ширины диапазона принимаемых значений) и (или) операции сложения с некоторой константой (изменение границ диапазона принимаемых значений) (рис. 1.28, δ).

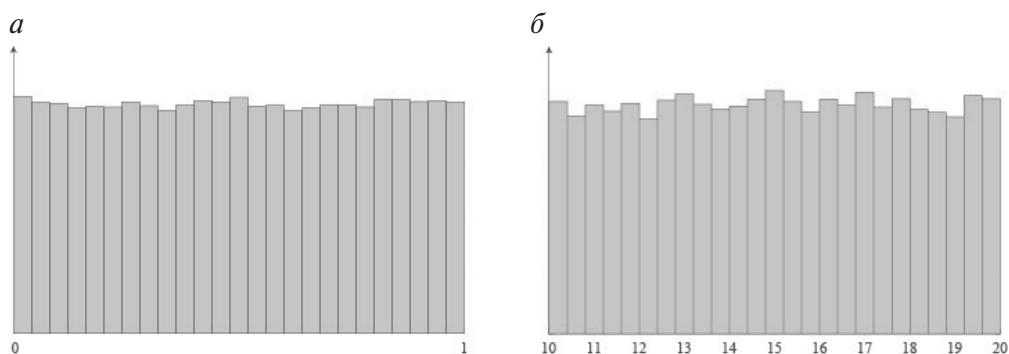


Рис. 1.28. Гистограммы равномерно распределенных величин в ПО MATLAB
(количество интервалов составляет 25):

$a = \text{rand}(1, 10000); b = \text{rand}(1, 10000) * 10 + 10$

Функция `randn`, в свою очередь, формирует массив из случайных величин, подчиненных стандартному нормальному закону распределения, т. е. математическое ожидание таких элементов будет равно нулю, а среднеквадратическое отклонение — единице (рис. 1.29, a).

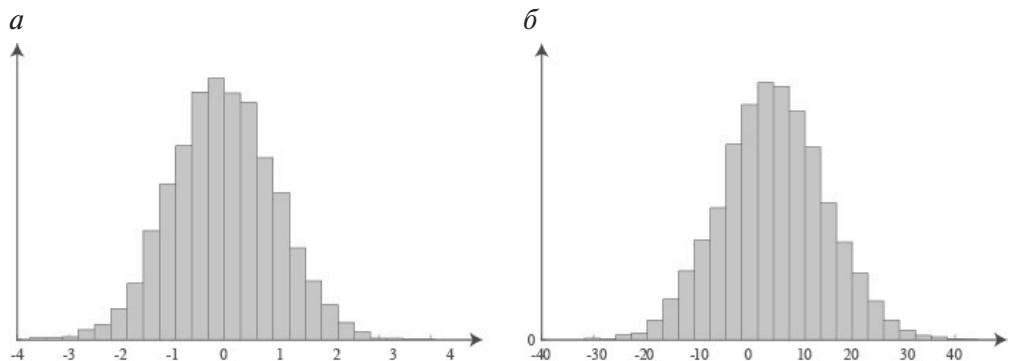


Рис. 1.29. Гистограммы нормально распределенных величин в ПО MATLAB
(количество интервалов составляет 25):

$a = \text{randn}(1, 10000); b = \text{randn}(1, 10000) * 10 + 5$

Для того чтобы изменить математическое ожидание полученной выборки, все значения необходимо сдвинуть на определенную константу, т. е. произвести операцию сложения. Для изменения среднеквадратического отклонения элементы выборки необходимо умножить на константу численно равную этому среднеквадратическому отклонению. Пример использования такого приема показан на рис. 1.29, б.

Для получения численных параметров моделей, в основе которых лежат поля случайных величин, зачастую бывает удобно проводить их оценку не по гистограмме, а вычислять их напрямую. В этом случае целесообразно использовать специальные функции, предназначенные для расчета точечных оценок числовых параметров случайных величин. Среди таких функций следует отметить `mean`, `median`, `std`, `var`, `min` и `max`. Рассмотрим функции оценки числовых параметров случайных величин. Начнем с функции `mean`, возвращающей среднее арифметическое значение случайной величины (рис. 1.30).

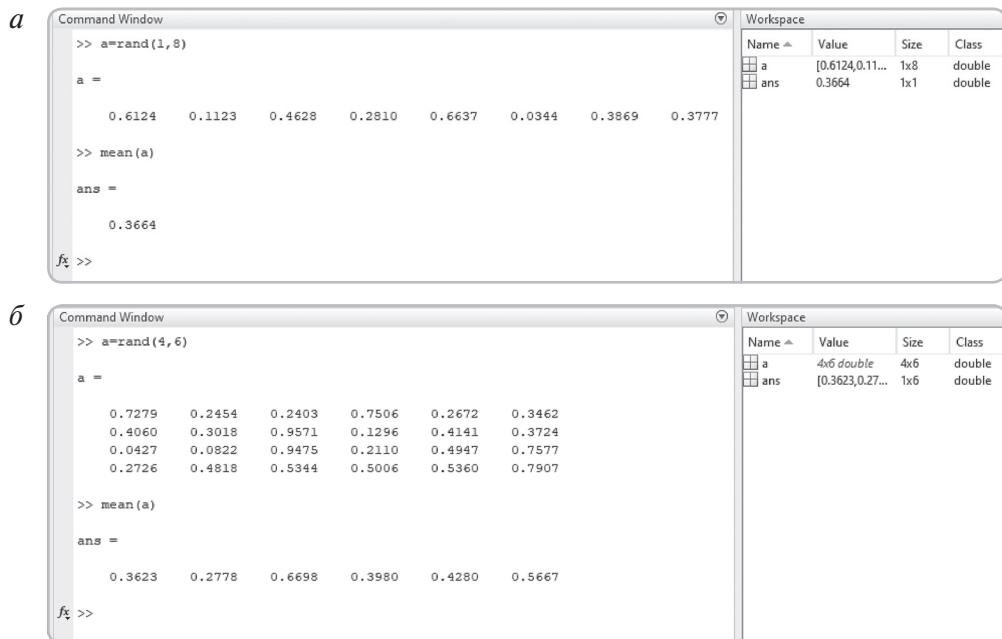


Рис. 1.30. Использование функций `mean` в ПО MATLAB:

a — для одномерного массива данных; *b* — для двумерного массива данных

Отметим одну особенность применения этой и иных функций по отношению к массивам, обладающим размерностью 2 и выше.

В этом случае возвращаемое значение по умолчанию рассчитывается для столбцов матрицы: если размер исходного массива составляет $n \times m$, то будет возвращено m значений среднеарифметических величин, полученных для каждого столбца. Для устранения возможного неудобства, возникающего при использовании функций для оценки параметров распределения по отношению к многомерному массиву, используются два варианта: либо функция применяется последовательно несколько раз, например, в случае двумерного массива `mean (mean (a))`, где a — анализируемая матрица случайных значений, либо предварительно используется операция расшивки массива, т. е. `mean (a (:))`.

Функция `median` возвращает медиану выборки, т. е. значение, занимающее центральную позицию в ранжированной выборке элементов. В некоторых случаях для анализа статистических величин медиана является более предпочтительным способом в сравнении со среднеарифметическим значением, поскольку отражает наиболее типичное проявление случайной величины. В качестве примера рассмотрим выборку, включающую десять единичных элементов и два элемента, величина которых равна 100 (рис. 1.31).

Session a:

```

>> a
a =
    1     1     1     1     1     1     1     1     1    100    100
>> mean(a)
ans =
    17.5000
fx >>

```

Session b:

```

>> a
a =
    1     1     1     1     1     1     1     1     1    100    100
>> median(a)
ans =
    1
fx >>

```

The screenshots show two MATLAB sessions. Session a demonstrates the use of the `mean` function on a vector a containing ten ones and two values of 100. The result is 17.5000. Session b demonstrates the use of the `median` function on the same vector a . The result is 1.

Рис. 1.31. Вычисление наиболее типичного значения выборки в ПО MATLAB:

a — с помощью функции `mean`; *б* — с помощью функции `median`

Среднее значение такой выборки будет равно 17,5, что, с одной стороны, достаточно сильно превышает единичное значение, с другой стороны, значительно меньше, чем 100. Медиана выборки будет равна единичному значению, что соответствует наиболее типичному проявлению элементов обозначенной выборки.

Следующие две функции — `std` и `var` — предназначены для расчета среднеквадратического отклонения и дисперсии выборки случайных элементов. Обе функции работают только применительно к массивам, содержащим не менее двух элементов, в противном случае функцией будет возвращено нулевое значение. Если входной массив данных представляет собой матрицу большой размерности, функции `std` и `var` по умолчанию производят расчет по первой отличной от единицы размерности. Если в качестве аргумента функций указана только переменная, соответствующая массиву данных, то полученный результат будет нормирован на величину $(N - 1)$, где N — объем анализируемой выборки. Конкретный тип нормализации может быть настроен с помощью дополнительного аргумента, т. е. представления функций в виде `std(a, w)` (`var(a, w)`), при этом для $w = 0$ нормировка будет общепринятой, для $w = 1$ результат будет поделен на количество наблюдений, т. е. оценка будет смещенной. Также в качестве аргумента w может быть использована вектор-строка весовых коэффициентов. В этом случае длина вектора должна совпадать с размером той стороны исходного массива, для которой производится расчет оценки. Примеры использования функций для расчета оценок нормального распределения показаны на рис. 1.32.

Как следует из названия, следующие функции — `min` и `max` — возвращают минимальное и максимальное значение элементов массива. Как и в случае функций, предназначенных для расчета среднеквадратического отклонения и дисперсии, величины `min` и `max` проводят анализ первой отличной от единичной размерности многомерного массива. Обозначенные функции могут возвращать не только наименьшее (наибольшее) значение элементов массива, но и его индекс. Для этого необходимо оформить возвращаемое значение в полной форме, т. е. в виде `[M, i] = min(a)` (`[M, i] = max(a)`), где переменной `M` будет соответствовать минимальное либо максимальное значение, переменной `i` — его индекс в массиве данных. Пример использования функции `max` показан на рис. 1.33, *a*. Следует отметить, что если в массиве содержится несколько равных по величине элементов, соответствую-

ших наибольшему либо наименьшему значению, то в качестве индекса будет определено первое из них по порядку (рис. 133, б). Как и при использовании других функций, предназначенных для оценки случайных распределений, функции `min` и `max` по умолчанию проводят вычисления в рамках столбца применительно к двумерному массиву. В таком случае в качестве индексов положения минимального либо максимального значений будет возвращена вектор-строка.

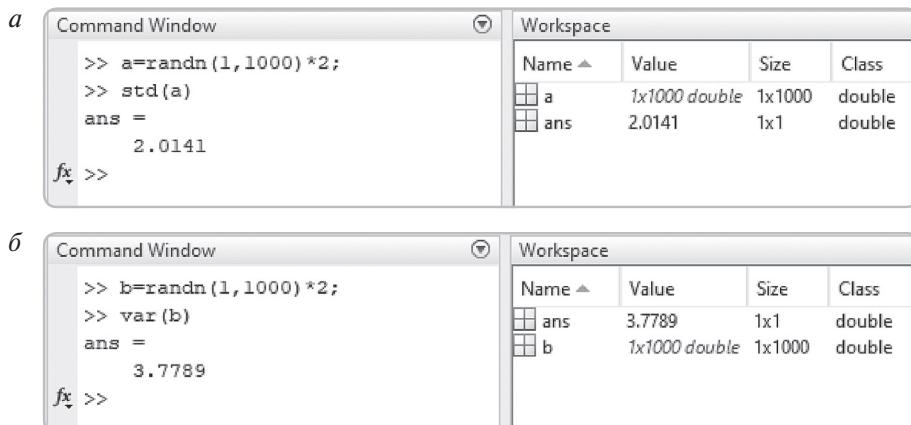


Рис. 1.32. Расчет оценки нормального распределения в ПО MATLAB с помощью функции:
а — `std`; б — `var`

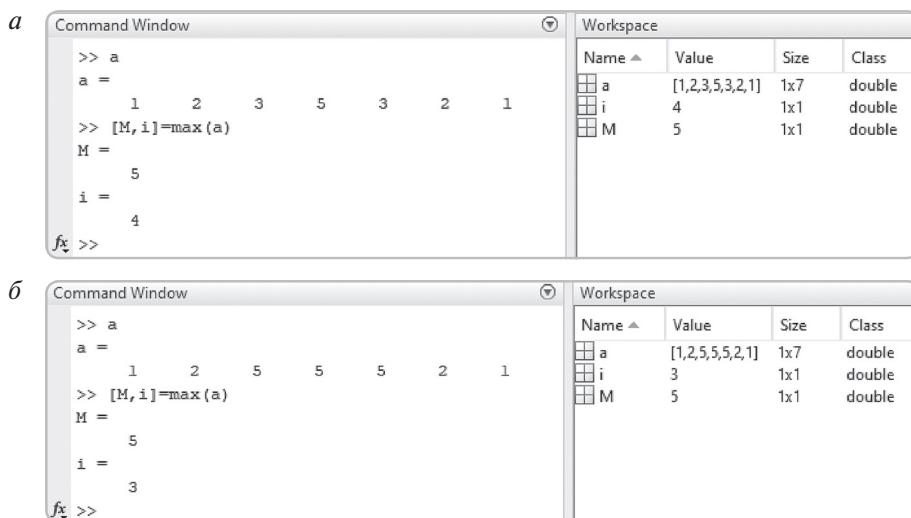


Рис. 1.33. Нахождение наибольшего элемента массива и его индекса с использованием функции `max` в ПО MATLAB:
а — одиночное наибольшее значение; б — несколько наибольших значений

Name	Value	Size	Class
a	3x4 double	3x4	double
i	[2,3,2,3]	1x4	double
M	[0.9275,0.76...	1x4	double

Рис. 1.34. Нахождение наибольшего элемента двумерного массива и его индекса с использованием функции max в ПО MATLAB

1.4. Обработка комплексных чисел в ПО MATLAB

Как будет показано ниже, радиолокационные изображения представляют собой массив комплексных чисел, т. е. включают два изображения, соответствующие действительной и мнимой частям (см. подглаву 2.3). Рассмотрим более подробно некоторые функции ПО MATLAB, позволяющие упростить процесс анализа таких массивов.

Формирование комплексного числа из имеющихся действительной и мнимой частей можно осуществить двумя способами. Во-первых, можно выполнить операцию сложения, при этом умножив мнимую часть на мнимую единицу (рис. 1.35, а). Во-вторых, можно использовать специальную функцию `complex` (рис. 1.35, б), у которой в качестве аргументов через запятую следует указать действительную и мнимую составляющие формируемого числа либо массива.

Способ с применением функции `complex` является более универсальным по отношению к арифметическим операциям, поскольку позволяет осуществлять преобразования в комплексную форму как вещественных, так и целочисленных величин. В случае, если на функцию будет подан один аргумент, то он будет по умолчанию восприниматься как действительная часть формируемого комплексного числа, мнимая часть при этом будет равна нулю (рис. 1.36).

1. Использование MATLAB при обработке изображений в радиодиапазоне

a

The screenshot shows the MATLAB interface with two panes. The left pane is the Command Window containing the following code:
>> a
a =
10
>> b
b =
5
>> c1=a+1j*b
c1 =
10.0000 + 5.0000i
fx >>

The right pane is the Workspace browser displaying the variables:

Name	Value	Size	Class
a	10	1x1	double
b	5	1x1	double
c1	10.0000 + 5....	1x1	double (complex)

b

The screenshot shows the MATLAB interface with two panes. The left pane is the Command Window containing the following code:
>> a
a =
10
>> b
b =
5
>> c2=complex(a,b)
c2 =
10.0000 + 5.0000i
fx >>

The right pane is the Workspace browser displaying the variables:

Name	Value	Size	Class
a	10	1x1	double
b	5	1x1	double
c2	10.0000 + 5....	1x1	double (complex)

Рис. 1.35. Формирование комплексного числа из действительной и мнимой частей в ПО MATLAB с помощью:

a — арифметических операций; *б* — функции complex

The screenshot shows the MATLAB interface with two panes. The left pane is the Command Window containing the following code:
>> a=10
a =
10
>> c3=complex(a)
c3 =
10.0000 + 0.0000i
fx >>

The right pane is the Workspace browser displaying the variables:

Name	Value	Size	Class
a	10	1x1	double
c3	10.0000 + 0....	1x1	double (complex)

Рис. 1.36. Формирование комплексного числа с помощью функции complex с одним аргументом в ПО MATLAB

Иногда возникает необходимость рассмотреть отдельно действительную и мнимую составляющие комплексного массива данных. Для формирования действительной составляющей используется функция `real`, для формирования мнимой части — функция `imag`, причем обе функции возвращают значение в вещественном типе данных

(рис. 1.37). Если необходимо проверить, содержится ли в том или ином числовом значении действительная составляющая, можно применить функции `isreal`. При этом, если в числе присутствует мнимая компонента, возвращаемым значением будет `false`.

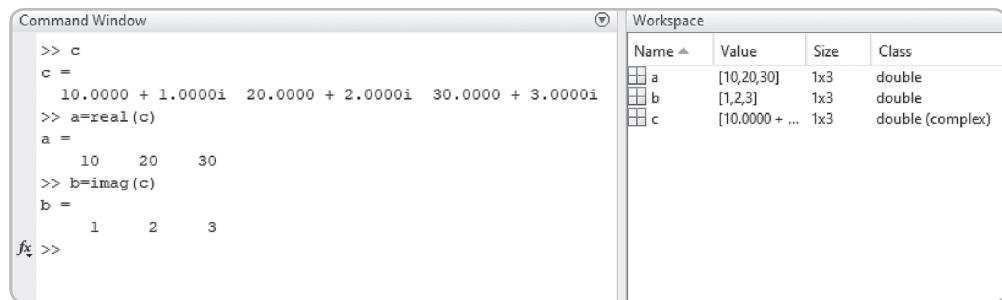


Рис. 1.37. Использование функций `real` и `imag` в ПО MATLAB

Функция `conj` (рис. 1.38) возвращает элемент, комплексно-сопряженный по отношению к аргументу. Если аргументом функции будет величина, не являющаяся комплексной, то возвращаемое значение будет в точности совпадать с аргументом.

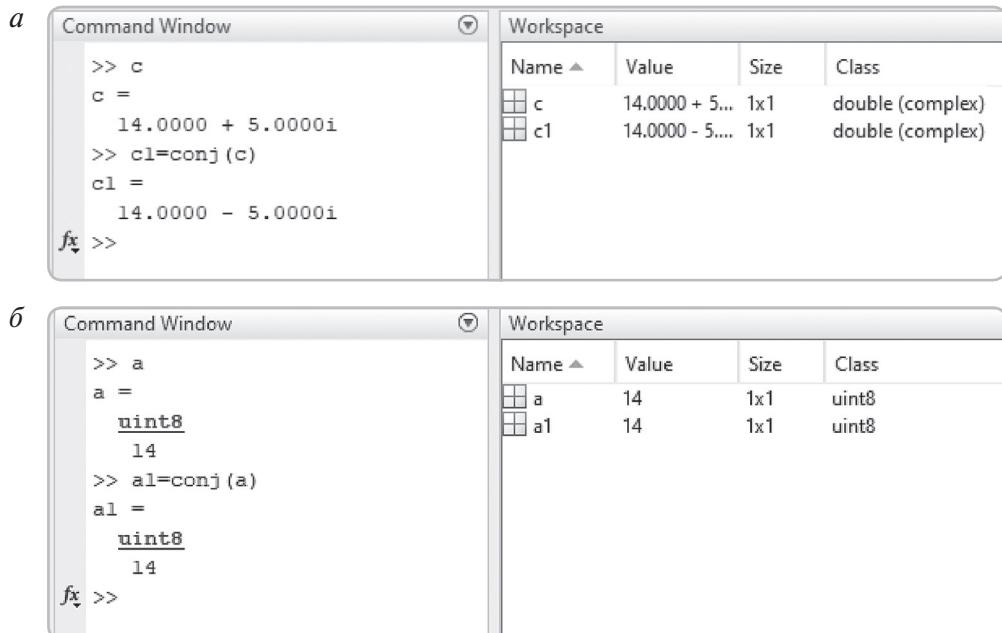


Рис. 1.38. Использование функции `conj` в ПО MATLAB:

а — для комплексного числового значения; *б* — для вещественного числового значения

Еще две удобные функции для работы с массивами комплексных чисел предназначены для нахождения фазы и модуля — `angle` и `abs` (рис. 1.39). Функция `angle` возвращает значение фазы, выраженное в радианах и принимающее значение от $-\pi$ до π . В случае, если аргумент функции представляет собой действительное значение, то возвращаемым значением функции будет ноль. В качестве аргумента функции `abs` можно использовать любое действительное число: если число отрицательное, то возвращаемым значением будет его модуль; если же число положительное, то возвращаемое значение будет совпадать с аргументом.

Name	Value	Size	Class
c	[0.4142 + 0...]	1x3	double (complex)
mod	[0.4827, 0.8...]	1x3	double
phi	[0.5393, 0.6...]	1x3	double

Рис. 1.39. Использование функций `angle` и `abs` в ПО MATLAB

Если в ряде случаев формирование массива комплексных чисел осуществляется на основании ряда промежуточных расчетов, то диапазон значений фаз может обладать разрывами. Для устранения этой проблемы удобно использовать функцию `unwrap` (рис. 1.40), принцип работы которой организован следующим образом: если разность между текущим и последующим элементами превышает величину $\pm\pi$ (критический угол), то ко всем последующим элементам прибавляется величина $\pm 2\pi$.

Следует отметить, что для функции `unwrap` возможна настройка величины критического угла, в этом случае необходимо указать дополнительный аргумент, т. е. оформить ее как `unwrap (P, cutoff)`, где величина аргумента `cutoff` по умолчанию равна величине π .

Также необходимо отметить, что в ПО MATLAB практически все элементарные функции и арифметические операции допускают вычисления на множестве комплексных чисел. Примеры использования некоторых таких операций и функций приведены на рис. 1.41.

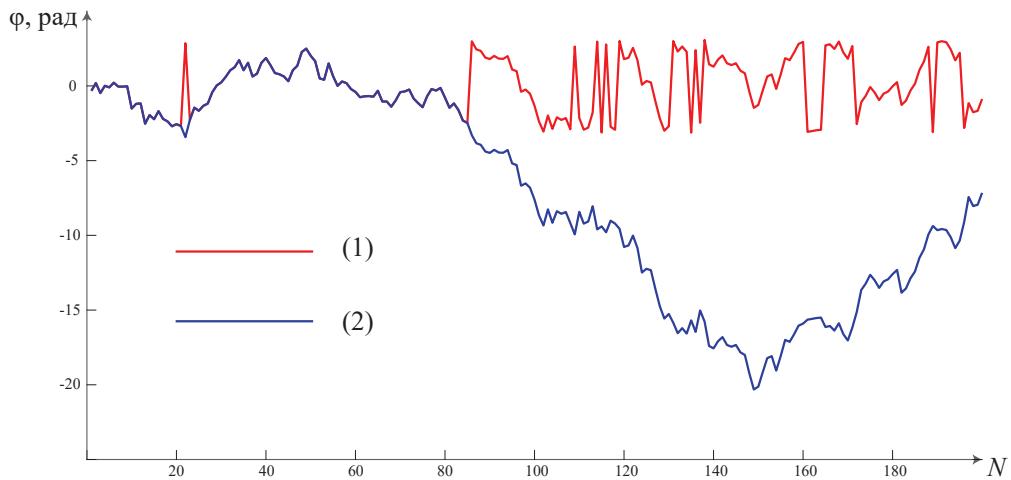


Рис. 1.40. График изменения (после применения функции `unwrap`):
1 — относительной фазы; 2 — абсолютной фазы

Command Window		Workspace			
		Name	Value	Size	Class
>> c	c =	c	[0.9572 + 0...	1x2	double (complex)
	0.9572 + 0.8003i 0.4854 + 0.1419i	c1	[10.9572 + ...	1x2	double (complex)
>> c1=c+10	c1 =	c2	[4.7858 + 4...	1x2	double (complex)
	10.9572 + 0.8003i 10.4854 + 0.1419i	c3	[0.2757 + 1...	1x2	double (complex)
>> c2=c*5	c2 =	c4	[1.0500 + 0...	1x2	double (complex)
	4.7858 + 4.0014i 2.4269 + 0.7094i	c5	0.7213 + 0....	1x1	double (complex)
>> c3=c.^2	c3 =	c6	0.5727	1x1	double
	0.2757 + 1.5320i 0.2155 + 0.1377i	c7	[1.0936 + 0...	1x2	double (complex)
>> c4=sqrt(c)	c4 =	c8	0.9572 + 0....	1x1	double (complex)
	1.0500 + 0.3811i 0.7039 + 0.1008i				
>> c5=mean(c)	c5 =				
	0.7213 + 0.4711i				
>> c6=std(c)	c6 =				
	0.5727				
>> c7=sin(c)	c7 =				
	1.0936 + 0.5116i 0.4712 + 0.1259i				
>> c8=log(c)	c8 =				
	0.2213 + 0.6964i -0.6818 + 0.2844i				
>> c8=max(c)	c8 =				
	0.9572 + 0.8003i				

Рис. 1.41. Использование арифметических операций и некоторых элементарных функций ПО MATLAB применительно к массивам комплексных значений

1.5. Основные функции для обработки изображений В ПО MATLAB

Поскольку цифровые растровые изображения могут быть интерпретированы как массивы элементов, в которых в качестве индексов используются положения пикселя по строкам и столбцам, а в качестве величины элемента — величина яркости пикселя, ПО MATLAB представляет собой, пожалуй, один из наиболее мощных инструментов для исследования методов обработки изображений. А специальные функции, реализованные в прикладном пакете Image Processing Toolbox, позволяют решить ряд общепринятых задач в упрощенной форме. Настоящий раздел посвящен базовым функциям, предназначенным для считывания, обработки и записи цифровых растровых изображений в ПО MATLAB.

1.5.1. Считывание и визуализация изображений

Для импорта изображения в рабочую среду MATLAB используется функция `imread`, требующая один обязательный аргумент, — полный путь и наименование считываемого файла с указанием расширения в виде строки. Если считываемый файл находится в текущем каталоге MATLAB, то достаточно указать имя файла. Возвращаемое значение представляет собой трехмерный массив целочисленных величин, причем третья размерность массива соответствует количеству каналов изображения. Пример использования функции `imread` показан на рис. 1.42.

Функция `imread` способна осуществить считывание изображений только для ограниченного набора общепринятых форматов, приведенных в таблице ниже.

BMP	Windows Bitmap	JPEG	Joint Photographic Experts Group	PNG	Portable Network Graphics
CUR	Cursor File	JPEG 2000	Joint Photographic Experts Group 2000	PPM	Portable Pixmap
GIF	Graphics Interchange Format	PBM	Portable Bitmap	RAS	Sun Raster

HDF4	Hierarchical Data Format	PCX	Windows Paintbrush	TIFF	Tagged Image File Format
ICO	Icon File	PGM	Portable Graymap	XWD	X Window Dump

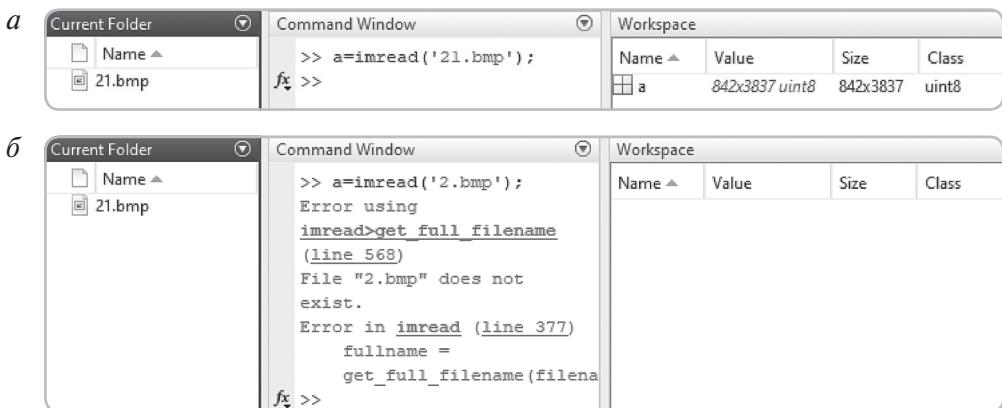


Рис. 1.42. Использование функции `imread` в ПО MATLAB:

a — загрузка в среду изображения; *б* — загрузка в среду изображения, не расположенного в текущем каталоге

Динамический диапазон изображений может быть произвольным. В случае, если необходимо открыть изображение некоторого более редкого формата, следует использовать функцию `multibandread` [1].

Для визуализации считываемого изображения возможно использование трех функций — `imshow`, `image` и `imagesc`. Все три функции требуют одного обязательного аргумента — переменной, соответствующей массиву изображения. При этом массив может содержать один канал, тогда выводимое изображение будет представлено в градациях серого, а также три канала, тогда визуализация будет выполнена в раскладке RGB. Визуализация изображений, содержащих четыре и более канала, не поддерживается. Если необходимо рассмотреть определенный канал изображения, то к нему необходимо обратиться согласно синтаксису, описанному в подглаве 1.2, т. е. оформить возвращаемое значение как `Im (:,:,1)`, где `Im` — массив, содержащий многозональное изображение, 1 — номер интересующего канала. Рассмотрим более подробно возможности функций `imshow`, `image` и `imagesc`.

Применительно к двумерным массивам `imshow` по умолчанию выводит изображение в графическом режиме `TrueColor` (рис. 1.43). Для функции возможна настройка динамического диапазона панхроматического изображения: необходимо указать второй аргумент в виде массива из двух значений $[k_1 \ k_2]$, при этом элементы с яркостью меньшей чем k_1 будут отображаться черным цветом. Следовательно, пиксели, яркость которых больше чем k_2 , будут отображаться белым цветом. Все остальные оттенки будут равномерно распределены в диапазоне от k_1 до k_2 (рис. 1.44). Если в качестве второго аргумента функции указать пустой массив, то тогда по умолчанию величине k_1 будет присвоено минимальное значение яркости изображения, а величине k_2 — максимальное значение яркости. Отметим, что при использовании функции `imshow` возможна визуализация изображения без предварительного импорта в среду MATLAB. Для этого необходимо написать выражение `imshow filename`, где `filename` — имя файла, содержащего изображение, с расширением. При этом файл должен располагаться в текущем каталоге среды MATLAB.

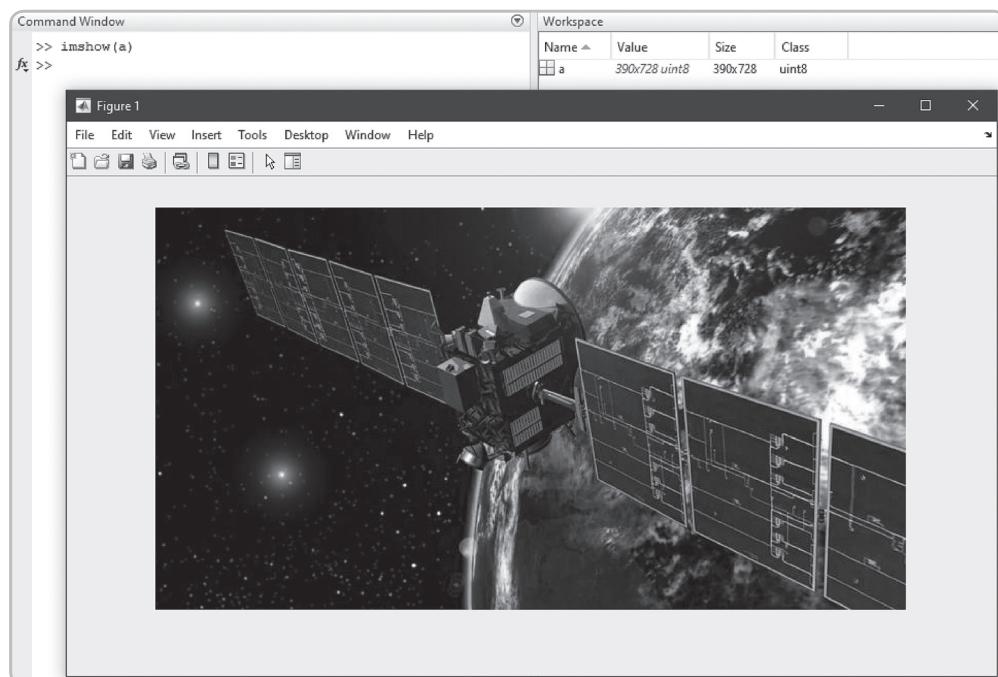


Рис. 1.43. Использование функции `imshow` в ПО MATLAB

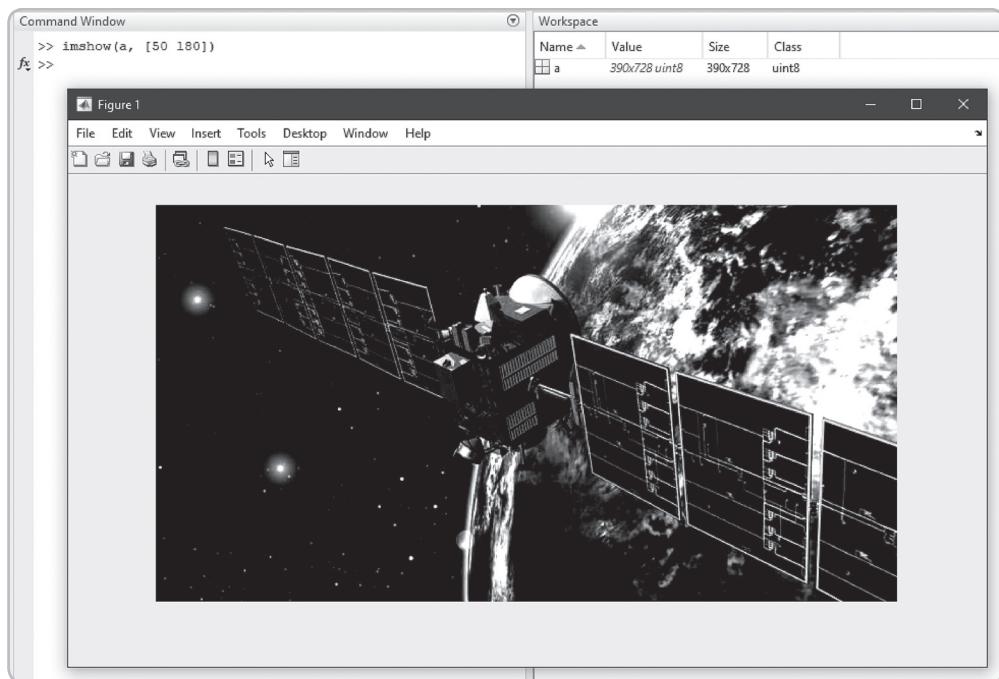


Рис. 1.44. Использование функции `imshow` в ПО MATLAB с настройкой динамического диапазона

В отличие от функции `image` функции `imshow` и `imagesc` определены в ядре ПО MATLAB. В целом функции обладают похожими возможностями, основное отличие заключается в различном определении свойства `CDataMapping`, отвечающего за индексацию цветов. Для функции `image` величина этого параметра по умолчанию равна `direct`, в этом случае каждый элемент отображаемого изображения интерпретируется непосредственно как индекс к цвету в стандартной цветовой карте, а значения вне диапазона заменяются максимальным значением. Поскольку цветовые карты MATLAB по умолчанию занимают диапазон с 64 оттенками серого, то элементы яркостью более чем 64 будут отображены белым цветом. Для функции `imagesc` свойство `CDataMapping` определено как `scaled`. Таким образом, все значения яркостей элементов масштабируются занимая весь динамический диапазон. Примеры визуализации изображений с помощью функций `image` и `imagesc` показаны на рис. 1.45 и 1.46.

1. Использование MATLAB при обработке изображений в радиодиапазоне

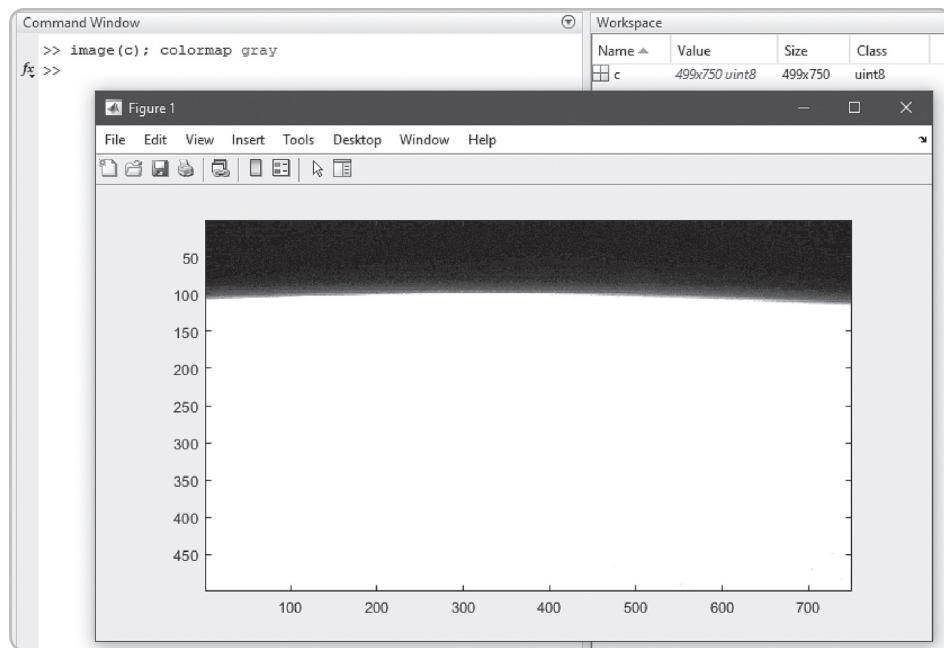


Рис. 1.45. Использование функции `image` в ПО MATLAB
(настройки по умолчанию)

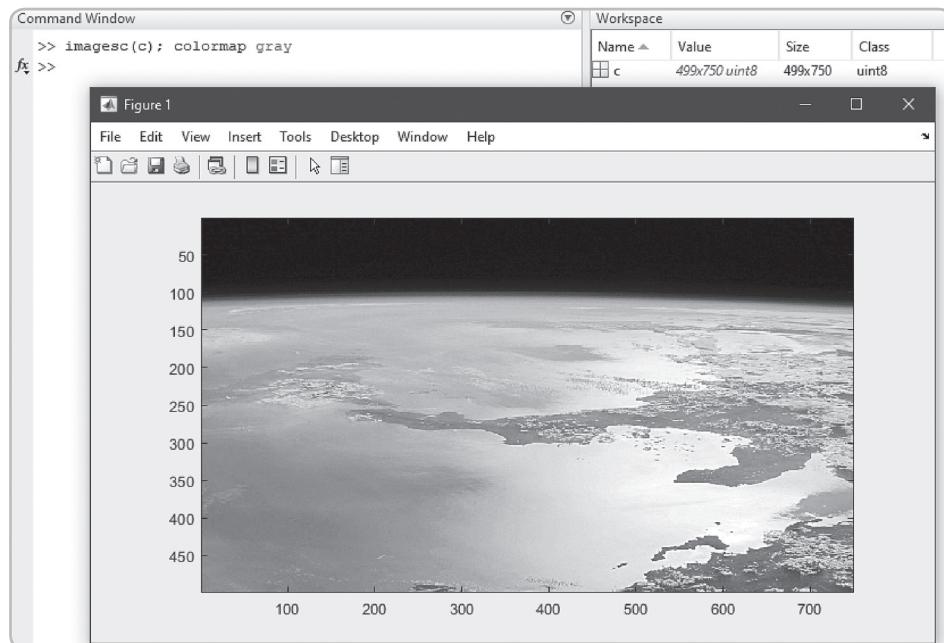


Рис. 1.46. Использование функции `imagesc` в ПО MATLAB

1.5.2. Геометрические преобразования изображений

В ряде случаев перед выполнением того или иного преобразования возникает необходимость предварительной геометрической коррекции изображения. Например, перед процедурой частотной фильтрации необходимо привести размеры кадра к четному виду, также иногда возникает необходимость вырезать определенный фрагмент изображения, повернуть его на некоторый угол либо изменить масштаб. Рассмотрим наиболее распространенные функции ПО MATLAB, используемые для решения этих задач.

Для кадрирования изображения можно использовать как процедуру обращения к элементам массива (показано в подглаве 1.2), так и специальную функцию `imcrop`. При использовании первого способа необходимо указать в качестве индексов исходного изображения координаты вырезаемого фрагмента, при этом индексы не должны выходить за пределы размера массива. Иллюстрация данного способа представлена на рис. 1.47, где показано обращение к элементам массива с 100-й по 400-ю строки и с 500-го по 900-й столбцы, что и эквивалентно процессу кадрирования исходного изображения. Полученный фрагмент показан во второй форме (см. Figure 2).

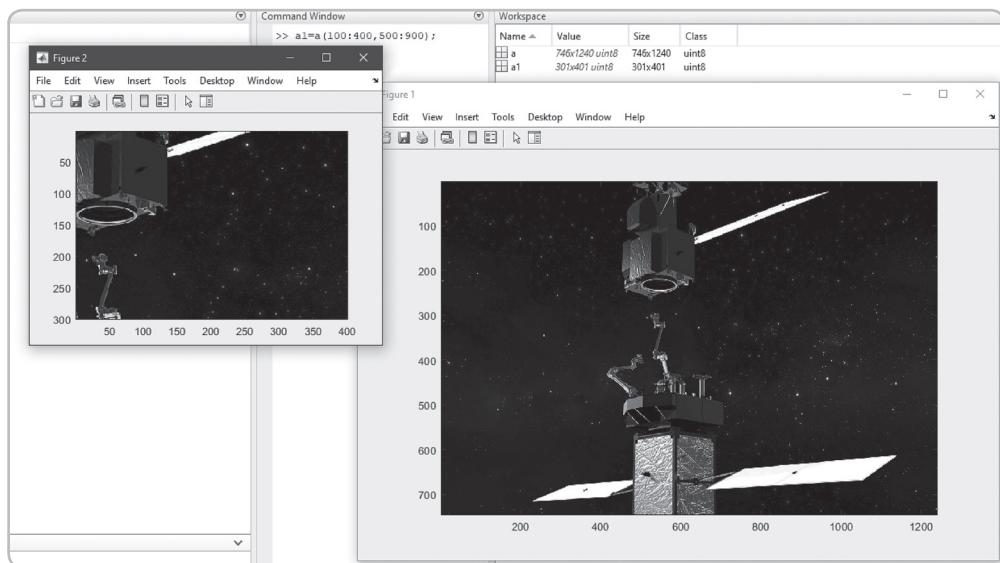


Рис. 1.47. Кадрирование изображения в ПО MATLAB с помощью индексов

При использовании функции `imcrop` формируется интерактивная форма, в которой при помощи мыши следует указать область кадрирования изображения (рис. 1.48). После выбора интересующей области нажимается позиция `Crop Image`, после чего фрагмент сохраняется в новом массиве. Также в режиме интерактивной формы можно скопировать координаты и соотношения сторон выделенного фрагмента и настроить цвет области выделения. Координаты полученного фрагмента можно извлечь, записав возвращаемое значение в полной форме, т. е. `[a1, rect]=imcrop(a)`, где `a1` — массив, соответствующий вырезанному фрагменту, `rect` — массив из четырех элементов, определенный в форме `[xmin ymin width height]`, причем `xmin`, `ymin` — пиксельные координаты нижнего левого угла фрагмента, `width`, `height` — ширина и высота фрагмента. Возможно прямое указание координат вырезаемого фрагмента без использования интерактивной формы в строке функции. В этом случае на функцию попадется второй аргумент в форме `rect`.

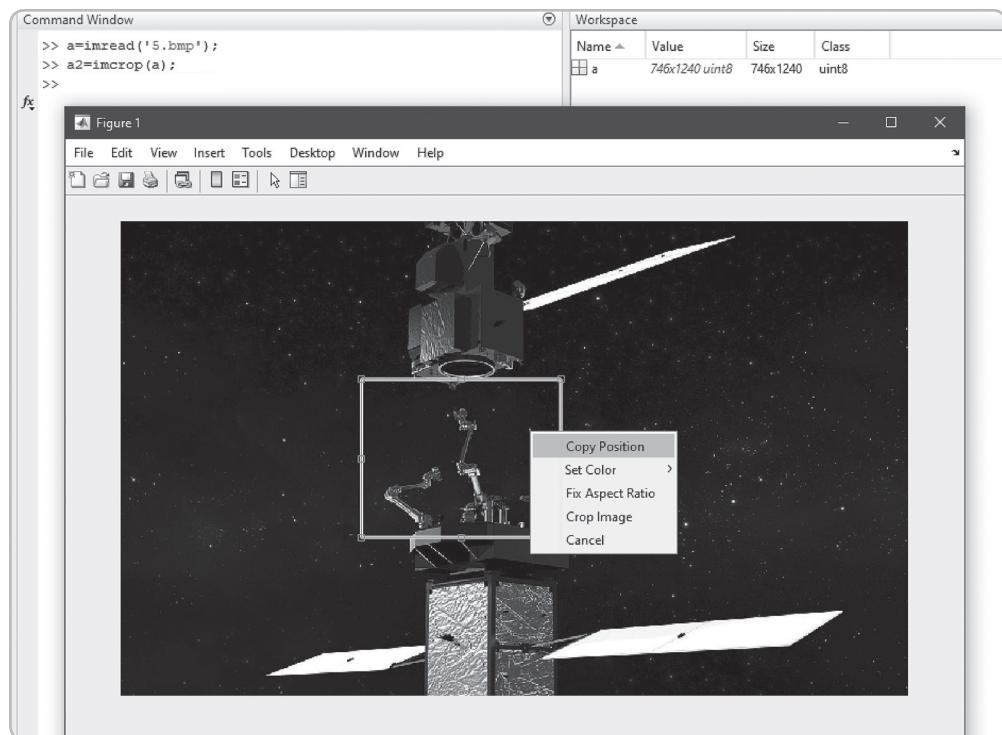


Рис. 1.48. Кадрирование изображения в ПО MATLAB с помощью функции `imcrop`

В случае, если необходимо изменить масштаб изображения, в ПО MATLAB используется функция `imresize` (рис. 1.49), для которой требуется два обязательных аргумента: во-первых, переменная, ассоциированная с массивом изображения, во-вторых, числовое значение, показывающее, во сколько раз необходимо изменить масштаб изображения. Числовое значение может принимать величину либо больше единицы (исходное изображение будет увеличено), либо меньше единицы (изображение будет уменьшено). Если в ходе расчетных процедур после применения функции размеры выходного массива оказываются дробными величинами, их значения автоматически округляются до целочисленных.

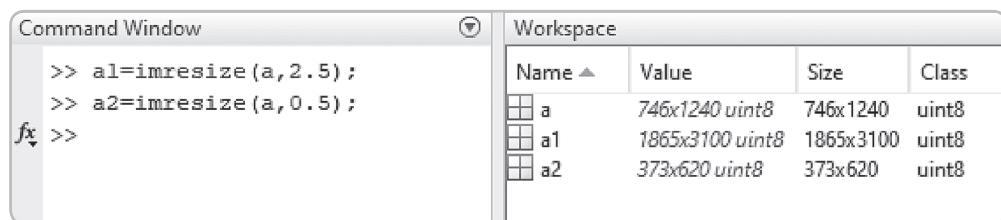


Рис. 1.49. Изменение масштаба изображения в ПО MATLAB
с помощью функции `imresize`

Использование функции `imresize` позволяет изменять масштаб непропорционально. В данном случае в качестве второго аргумента следует использовать массив, состоящий из двух значений, первое из которых характеризует количество строк нового изображения, второе — количество столбцов (рис. 1.50). При изменении размера изображения выполняется передискретизация элементов его яркости, по умолчанию функция использует бикубическую интерполяцию. Также возможно применение метода ближайшего соседа либо билинейной интерполяции. Для указания конкретного метода необходимо прописать его в виде третьего аргумента как '`'nearest'`', '`'bilinear'`' либо '`'bicubic'`'. Также следует отметить, что при уменьшении размеров изображения на нем возникает шум, поэтому по умолчанию перед процедурой уменьшения все изображения предварительно обрабатываются пространственным усредняющим фильтром размером 11×11 . Размер маски фильтра также можно настроить, указав в виде дополнительного параметра после метода избыточной дискретизации, т. е. оформить функцию в виде `imresize(a, K, method, n)`, где ар-

гумент n и будет размером маски фильтра. Если указать нулевой размер маски фильтра, то фильтрация произведена не будет.

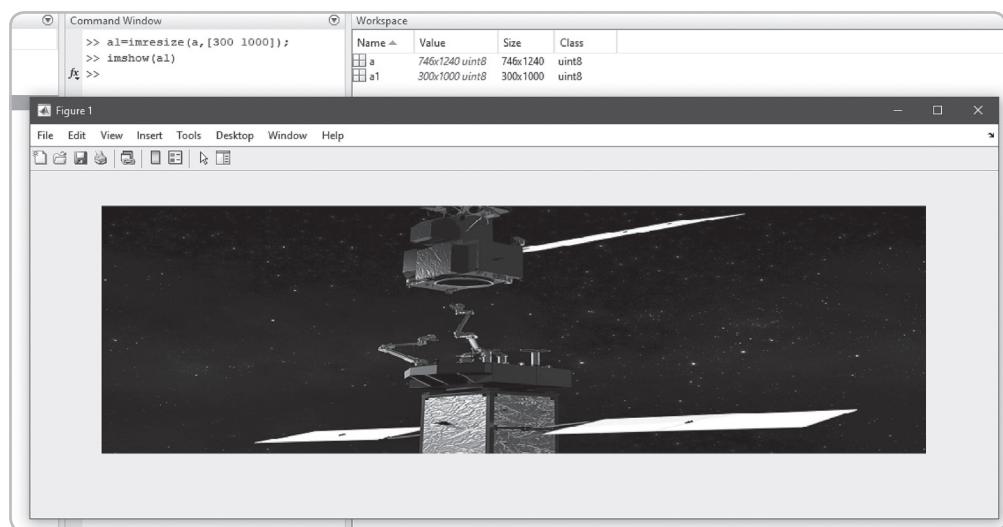


Рис. 1.50. Неравномерное изменение масштаба изображения в ПО MATLAB с помощью функции `imresize`

Наконец, для поворота изображения в ПО MATLAB используется функция `imrotate`, для которой требуется два обязательных аргумента: переменная, обозначающая массив изображения и угол поворота. Величина угла поворота выражается в градусах, причем положительные значения угла соответствуют повороту против часовой стрелки, а отрицательные — по часовой стрелке. Как и в случае использования функции `imresize`, при повороте изображения осуществляется передискретизация его элементов, для выбора конкретного метода возможно использование дополнительного аргумента. Также следует отметить, что при повороте изображения автоматически формируются области с нулевым значением яркости, при этом размер изображения изменяется (рис. 1.51). Для устранения данного эффекта возможно использование специального аргумента в виде `imrotate(a, 15, 'crop')`, при этом размеры повернутого изображения будут совпадать с исходными, а кадрирование будет произведено относительно его центра (рис. 1.52).

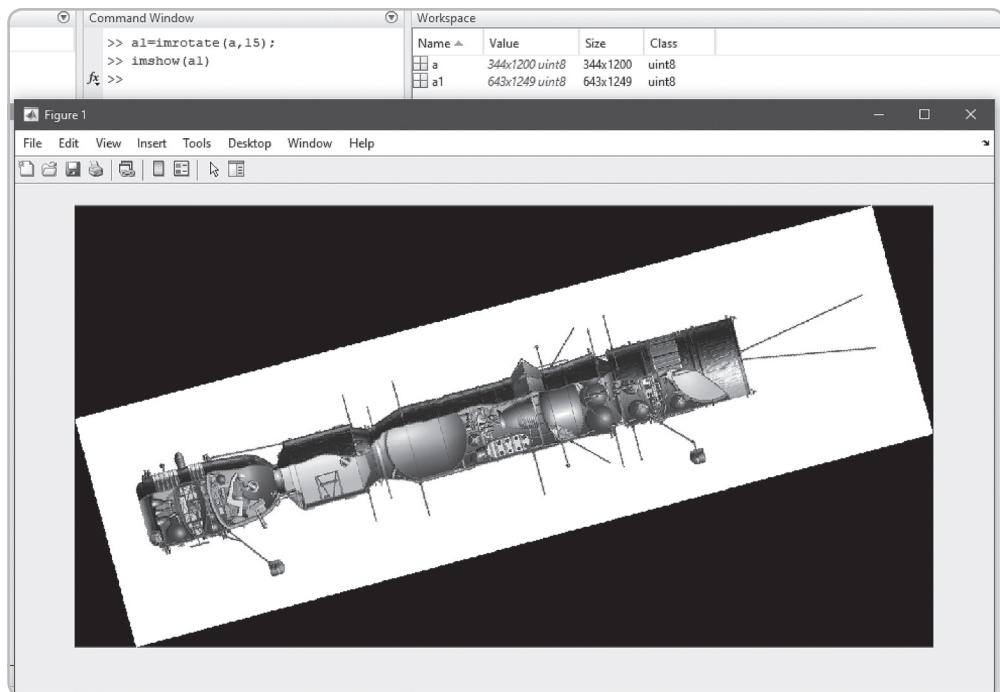


Рис. 1.51. Поворот изображения в ПО MATLAB с помощью функции `imrotate`

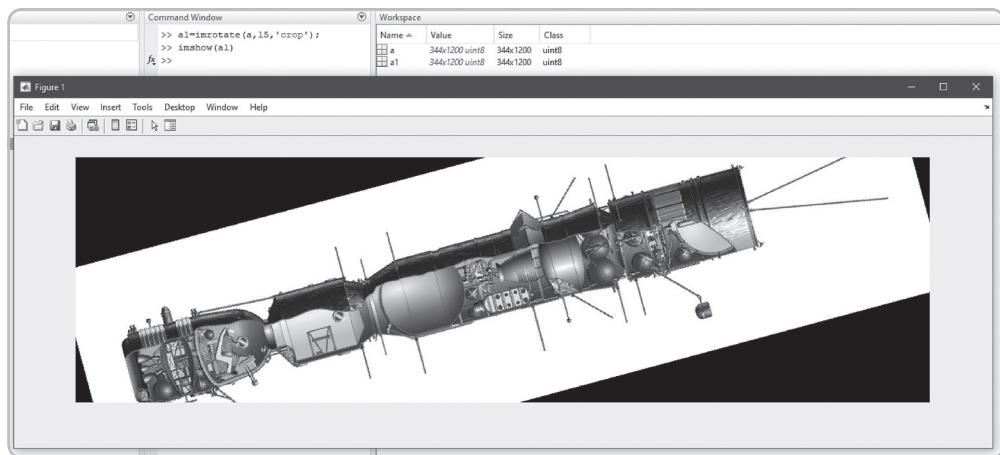


Рис. 1.52. Поворот изображения с сохранением размера в ПО MATLAB с помощью функции `imrotate`

1.5.3. Яркостные преобразования изображений

Большинство яркостных преобразований над изображениями заключаются в применении сравнительно простых арифметических операций, таких как сложение, вычитание, умножение множеств элементов массива и т. д. Большая часть из этих операций может быть выполнена с использованием как традиционных арифметических выражений, так и с применением специальных функций, которые позволяют дополнительно расширить возможности арифметических операций, например указать формат выходного изображения. Рассмотрим некоторые из таких преобразований.

Начнем с операции сложения. Применительно к цифровым изображениям можно выполнять его сложение как с константой, так и с другим изображением. Благодаря матричному представлению данных в ПО MATLAB эти операции возможно осуществить без использования ветвлений, при сложении изображений их размеры должны совпадать. Примеры использования сложения с константой и с другим изображением приведены на рис. 1.53.

<i>a</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Command Window</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">>> x1=x+16;</td> </tr> <tr> <td colspan="4">fx >></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Workspace</th> </tr> <tr> <th>Name</th><th>Value</th><th>Size</th><th>Class</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td><td>300x500 uint8</td><td>300x500</td><td>uint8</td></tr> <tr> <td>x1</td><td>300x500 uint8</td><td>300x500</td><td>uint8</td></tr> <tr> <td>y</td><td>300x500 uint8</td><td>300x500</td><td>uint8</td></tr> </tbody> </table>	Command Window				>> x1=x+16;				fx >>				Workspace				Name	Value	Size	Class	x	300x500 uint8	300x500	uint8	x1	300x500 uint8	300x500	uint8	y	300x500 uint8	300x500	uint8
Command Window																																	
>> x1=x+16;																																	
fx >>																																	
Workspace																																	
Name	Value	Size	Class																														
x	300x500 uint8	300x500	uint8																														
x1	300x500 uint8	300x500	uint8																														
y	300x500 uint8	300x500	uint8																														
<i>b</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Command Window</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">>> z=x+y;</td> </tr> <tr> <td colspan="4">fx >></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Workspace</th> </tr> <tr> <th>Name</th><th>Value</th><th>Size</th><th>Class</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td><td>300x500 uint8</td><td>300x500</td><td>uint8</td></tr> <tr> <td>y</td><td>300x500 uint8</td><td>300x500</td><td>uint8</td></tr> <tr> <td>z</td><td>300x500 uint8</td><td>300x500</td><td>uint8</td></tr> </tbody> </table>	Command Window				>> z=x+y;				fx >>				Workspace				Name	Value	Size	Class	x	300x500 uint8	300x500	uint8	y	300x500 uint8	300x500	uint8	z	300x500 uint8	300x500	uint8
Command Window																																	
>> z=x+y;																																	
fx >>																																	
Workspace																																	
Name	Value	Size	Class																														
x	300x500 uint8	300x500	uint8																														
y	300x500 uint8	300x500	uint8																														
z	300x500 uint8	300x500	uint8																														
<i>c</i>	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Command Window</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">>> z=x+y;</td> </tr> <tr> <td colspan="4">Matrix dimensions must agree.</td> </tr> <tr> <td colspan="4">fx >></td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Workspace</th> </tr> <tr> <th>Name</th><th>Value</th><th>Size</th><th>Class</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>x</td><td>300x500 uint8</td><td>300x500</td><td>uint8</td></tr> <tr> <td>y</td><td>301x500 uint8</td><td>301x500</td><td>uint8</td></tr> </tbody> </table>	Command Window				>> z=x+y;				Matrix dimensions must agree.				fx >>				Workspace				Name	Value	Size	Class	x	300x500 uint8	300x500	uint8	y	301x500 uint8	301x500	uint8
Command Window																																	
>> z=x+y;																																	
Matrix dimensions must agree.																																	
fx >>																																	
Workspace																																	
Name	Value	Size	Class																														
x	300x500 uint8	300x500	uint8																														
y	301x500 uint8	301x500	uint8																														

Рис. 1.53. Сложение изображений в ПО MATLAB
с помощью арифметических операций:

a — сложение с константой; *b* — сложение с изображением;

c — сложение двух изображений с разными размерами

Эту же задачу можно решить с использованием функции `imadd`, требующей два обязательных аргумента, в роли которых используются либо два изображения, либо изображение и константа. В случае сложения двух изображений они должны быть представлены одним типом данных. Следует отметить, что при выполнении операции сложения двух изображений, представленных целочисленным форматом, может возникнуть ситуация переполнения динамического диапазона, т. е. некоторые элементы яркости сформированного изображения могут принять большее значение, чем верхняя граница динамического диапазона. В этом случае значения элементов яркости, превышающие указанную границу, будут автоматически огрублены, и следовательно, итоговое изображение будет представлено некорректно (рис. 1.54 (третья форма)).

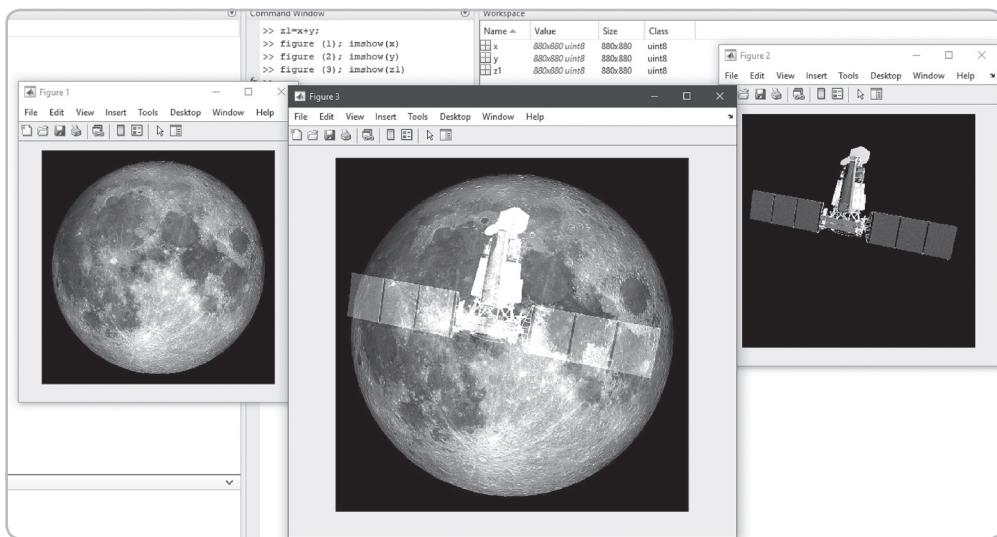


Рис. 1.54. Иллюстрация переполнения динамического диапазона при операции сложения изображений в ПО MATLAB

Для функции имеется `imadd` возможность указывать тип данных для выходного изображения, используя в качестве третьего аргумента необходимый формат, т. е. оформить функцию, например, в виде `imadd (X, Y, 'uint16')`. Данная возможность позволяет предотвращать выход за границы динамического диапазона при работе с целочисленными типами данных (рис. 1.55).

1. Использование MATLAB при обработке изображений в радиодиапазоне

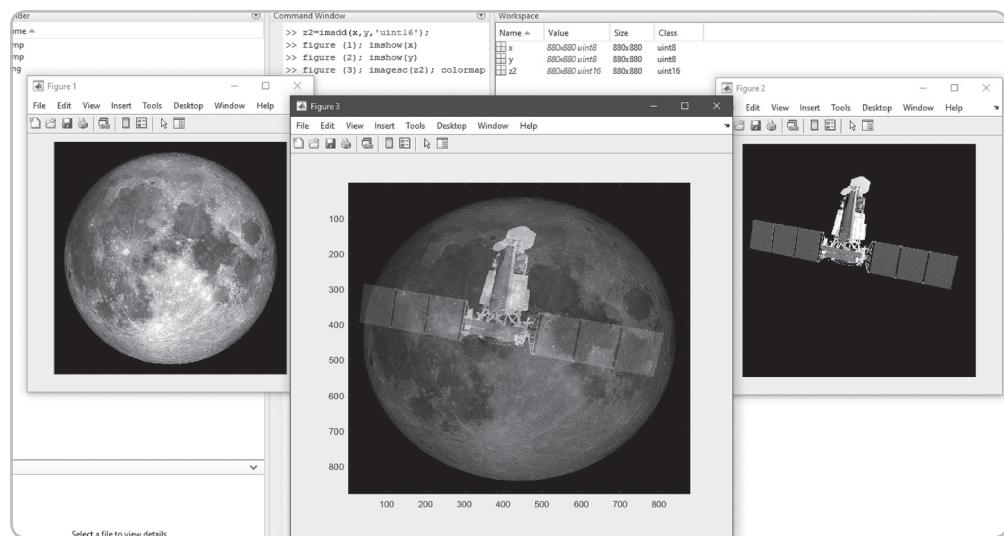


Рис. 1.55. Сохранение динамического диапазона при операции сложения изображений с использованием функции imadd в ПО MATLAB

Аналогично операции сложения возможно осуществить операцию вычитания из элементов изображения либо константы, либо элементов другого изображения. Операция вычитания может быть произведена либо с помощью арифметических операций ПО MATLAB (рис. 1.56), либо с использованием функции imsubtract. При этом в случае вычитания двух изображений на них накладываются ограничения, аналогичные функции imadd.

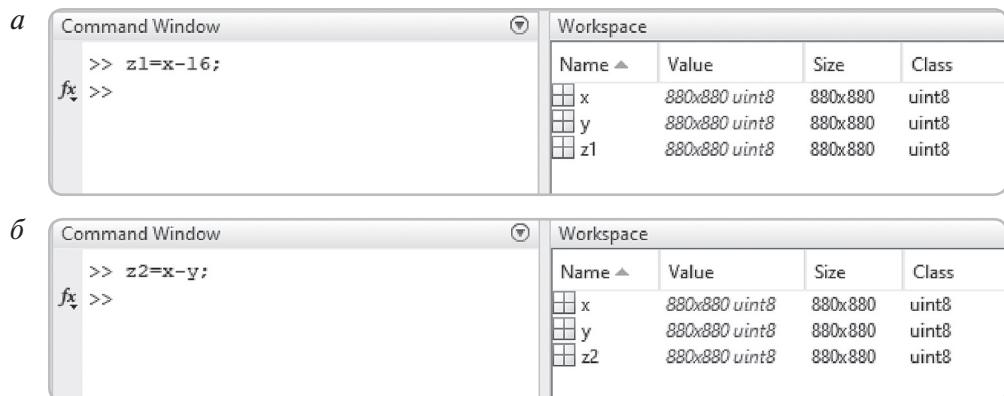


Рис. 1.56. Вычитание изображений в ПО MATLAB
с помощью арифметических операций:

a — вычитание константы; *б* — вычитания изображения

Одним из примеров применения процедуры вычитания изображения является автоматизированный поиск изменений. В качестве примера можно привести задачу об обнаружении изменений на местности по данным дистанционного зондирования Земли из космоса. В этом случае в качестве изображений при операции вычитания используются два снимка, одной и той же территории в разное время, при этом должна быть осуществлена процедура предварительной геометрической и радиометрической коррекций.

Следует отметить, что при использовании операции вычитания на выходном изображении могут возникнуть отрицательные значения. Если используется целочисленный положительный формат данных, то такие участки будут огрублены до нулевых значений и проанализировать содержимое таких изображений будет затруднительно (рис. 1.57). Применительно к космическим снимкам невозможно будет осуществить процедуру геометрической привязки сформированных изображений. Поэтому для корректной обработки изображений сохранять результат следует либо в знаковом формате данных, либо в вещественном, пример использования функции `imsubtract` для решения этой задачи показан на рис. 1.58.

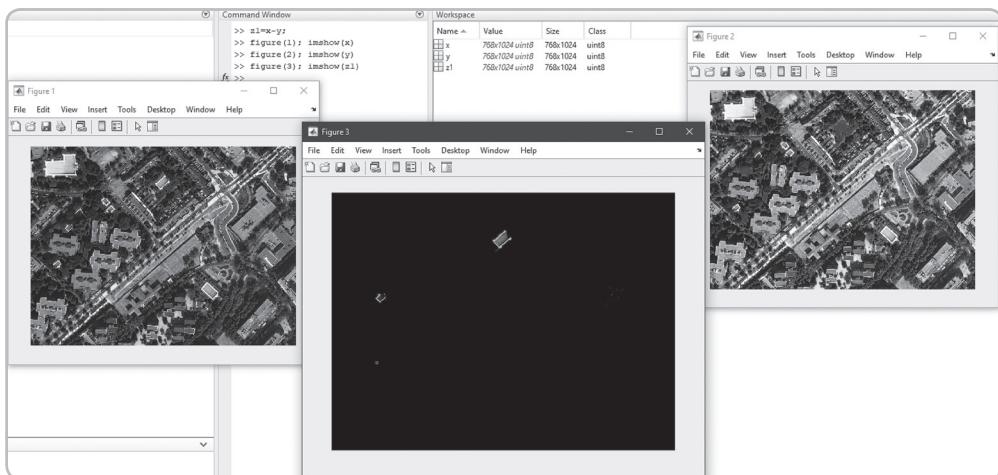


Рис. 1.57. Эффект присутствия элементов отрицательной яркости на изображении целочисленного формата в ПО MATLAB, полученных в результате вычитания

1. Использование MATLAB при обработке изображений в радиодиапазоне

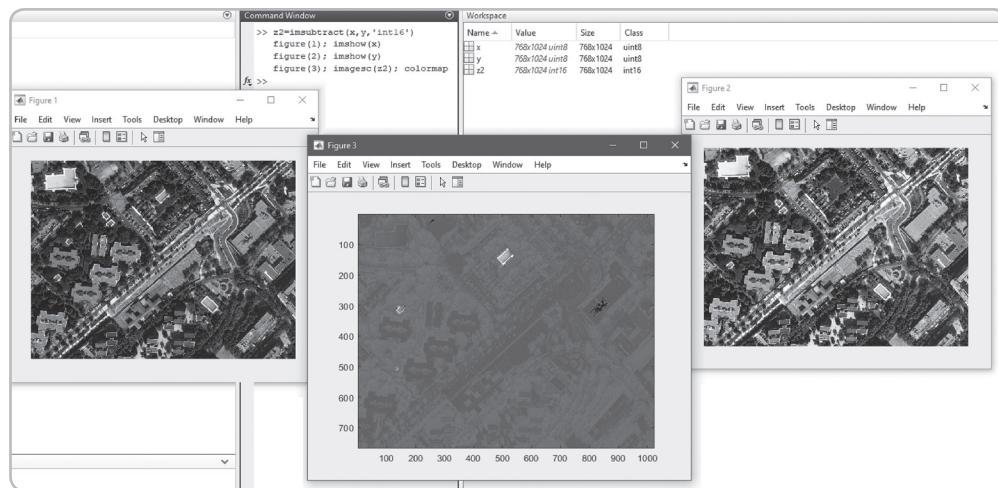


Рис. 1.58. Нивелирование выхода динамического диапазона в отрицательную область при вычитании изображений в ПО MATLAB с помощью функции `imsubtract`

Часто возникает необходимость умножения изображений на константу, например, в задачах изменения динамического диапазона. Также может возникнуть необходимость перемножения двух изображений; в качестве примера можно привести задачу подавления дымки на изображениях, полученных при дистанционном зондировании Земли из космоса. Сделать это можно как с помощью арифметических операций (рис. 1.59), так и с применением функции `immultiply`.

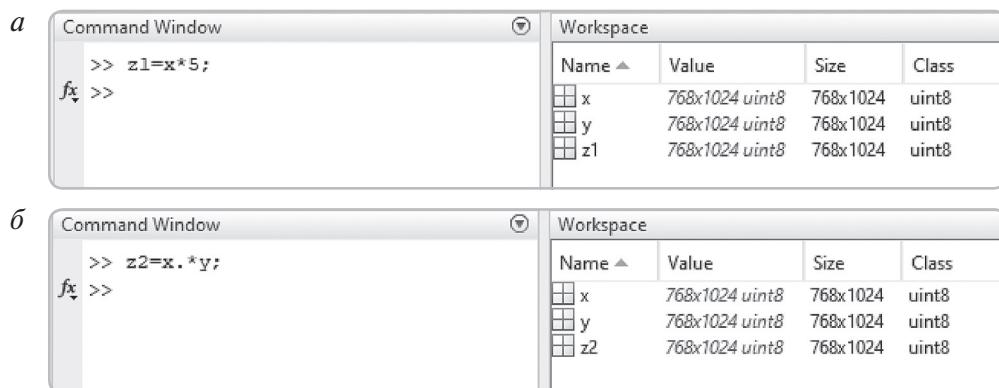


Рис. 1.59. Умножение изображений в ПО MATLAB с помощью арифметических операций:

a — умножение на константу; *б* — перемножение двух изображений

Операция умножения применительно к цифровым изображениям, помимо прочих задач, позволяет выполнять процедуру маскирования элементов (рис. 1.60), в этом случае в качестве второго изображения используется массив данных в формате logical. При этом на выходном изображении будут отображены только элементы, координатам которых соответствуют значения true на используемой маске, остальные элементы будут показаны черным цветом.

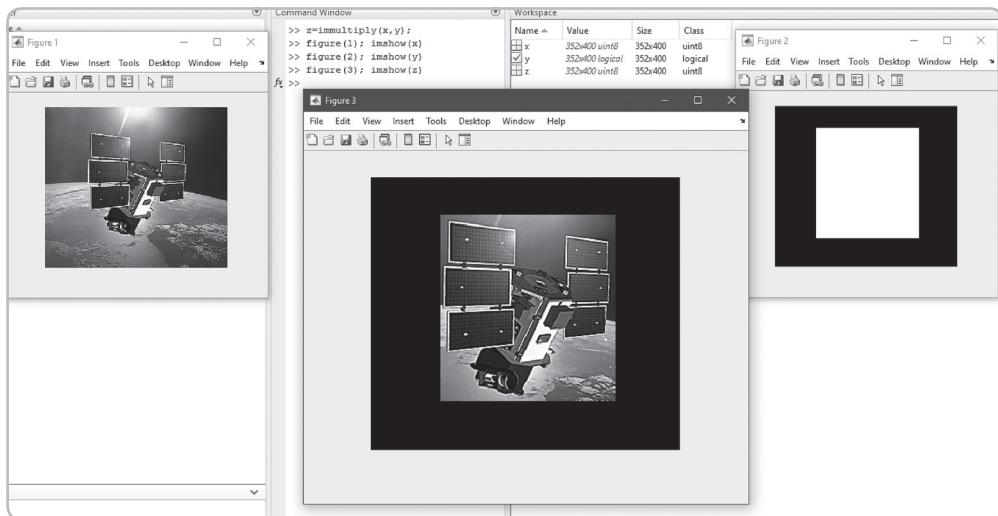


Рис. 1.60. Маскирование элементов изображения в ПО MATLAB с помощью функции `immultiply`

Аналогично процедуре умножения в ПО MATLAB можно определить деление изображения либо на константу, либо на другое изображение, причем в последнем случае процедура эквивалента умножению на изображение с элементами яркости вида $\frac{1}{l_{ij}}$, где l_{ij} — яркости

элементов исходного изображения. Деление изображений можно осуществить либо с помощью арифметических операций (рис. 1.61), либо с использованием функции `imdivide`.

Следует помнить, что при делении изображения на число либо на другое изображение могут возникнуть достаточно маленькие дробные значения яркости элементов выходного массива данных, которые при сохранении в целочисленном формате данных будут значительно огрублены (рис. 1.62). Для устранения обозначенного эффекта выход-

ные данные при операции деления рекомендуется представлять в вещественном типе данных (рис. 1.63).

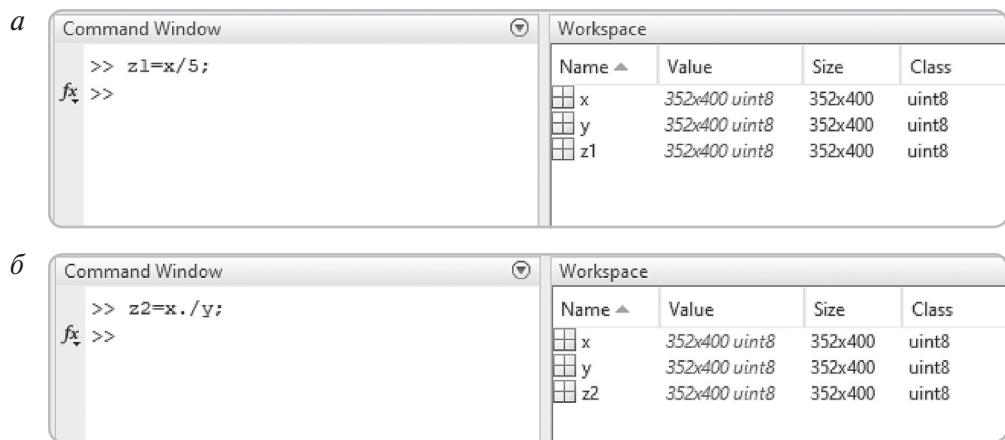


Рис. 1.61. Деление изображений в ПО MATLAB
с помощью арифметических операций:

a — деление на константу; *б* — деление двух изображений

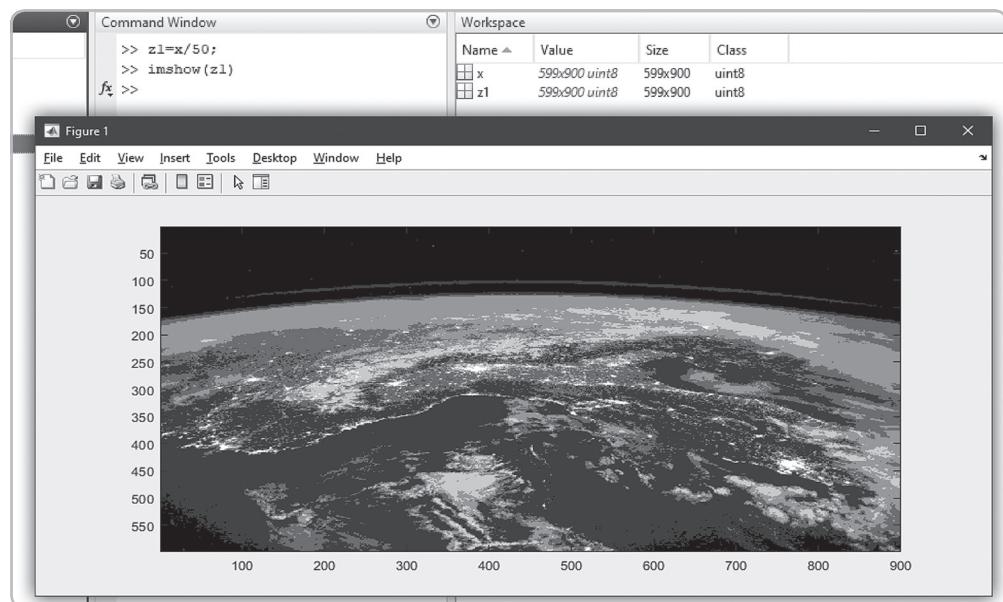


Рис. 1.62. Эффект снижения количества уровней квантования яркости изображения целочисленного формата в ПО MATLAB, возникающих в результате деления

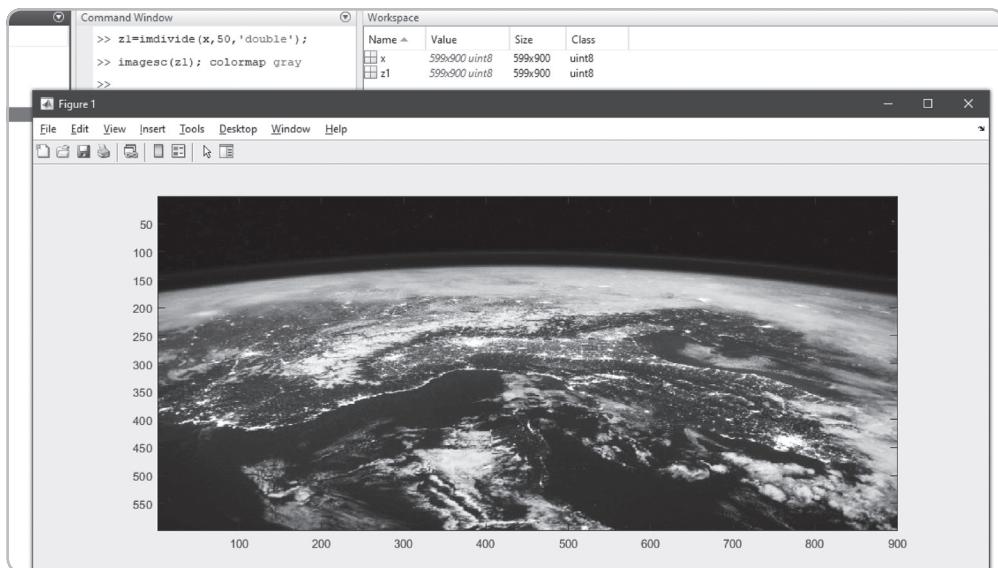


Рис. 1.63. Нивелирование эффекта сужения динамического диапазона изображения в ПО MATLAB с помощью функции imdivide

В ПО MATLAB возможно выполнение сложения нескольких изображений с различными весовыми коэффициентами. Для этого используется специальная функция `imlincomb` (рис. 1.64). Аргументы функции представляются в следующей форме: `imlincomb(K1, A1, K2, A2, ..., Kn, An)`, где K_i — весовые коэффициенты, A_i — комбинируемые изображения, которые должны принадлежать одному типу данных. Следует отметить, что функция на этапе промежуточных вычислений сохраняет динамический диапазон, поскольку все промежуточные расчетные процедуры проводятся в вещественном формате данных, а итоговое изображение сохраняется в тот же тип, что и A_i . В частности, результатом выполнения функции с параметрами `imlincomb(1.5, a, -1, b)` (где $a = 201$, $b = 200$ — числовые значения, представленные в формате `uint8`) будет 102, несмотря на то, что в ходе выполнения операции промежуточный результат выходит за пределы диапазона от 0 до 255.

Также следует отметить, что для цифровых изображений в ПО MATLAB допустимо использование большинства элементарных функций, однако при этом тип данных должен быть преобразован к формату `double`. Примеры использования некоторых функций показаны на рис. 1.65.

1. Использование MATLAB при обработке изображений в радиодиапазоне

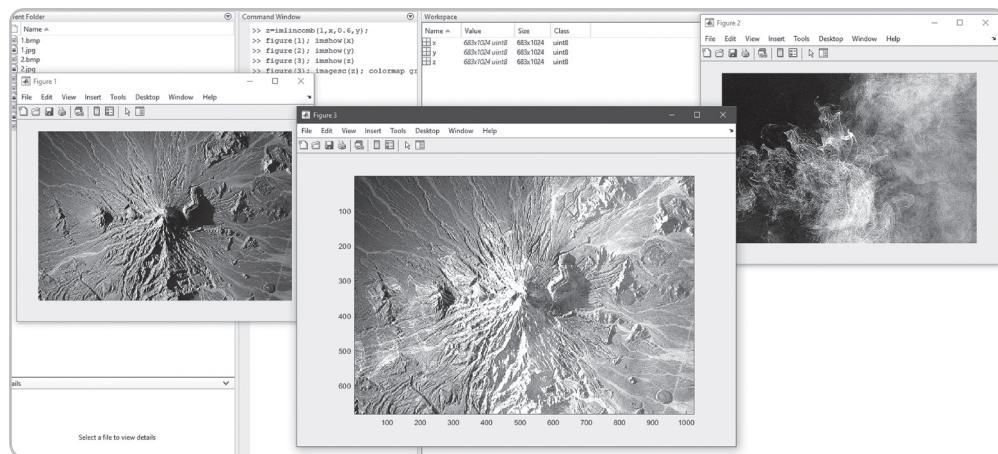


Рис. 1.64. Сложение изображений с весовыми коэффициентами в ПО MATLAB с использованием функции imlincomb

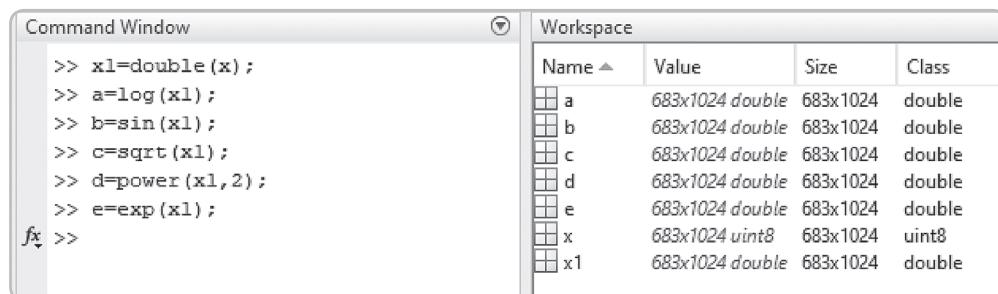


Рис. 1.65. Использование некоторых элементарных функций ПО MATLAB применительно к массивам изображений

Последняя группа преобразований, рассмотренных в этом разделе, будет посвящена процедуре свертки изображений, в ходе которой делается расчет каждого элемента формируемого изображения на основании окружения соответствующего ему элемента исходного изображения и значений числовых коэффициентов элементов второго изображения, чаще всего называемым окном свертки.

Рассмотрим с функцию `conv2`, требующую два обязательных аргумента, в роли которых выступают два изображения, причем порядок следования аргументов, соответствующих обрабатываемому изображению и окну свертки, может быть произвольным. Результатом выполнения будет свертка первого изображения по второму, при этом размер выходного изображения будет определяться как $(m_1 + m_2 - 1)$.

и $(n_1 + n_2 - 1)$, где m_1, m_2 — количество строк исходных изображений, n_1, n_2 — количество столбцов исходных изображений [1]. Пример использования функции `conv2` для решения задачи нахождения контуров на изображении показан на рис. 1.66.

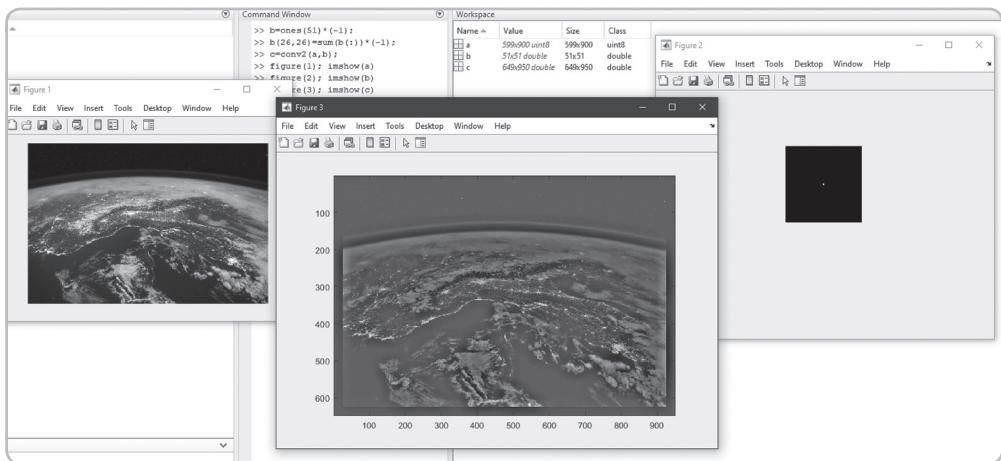


Рис. 1.66. Свертка изображений в ПО MATLAB с помощью функции `conv2`

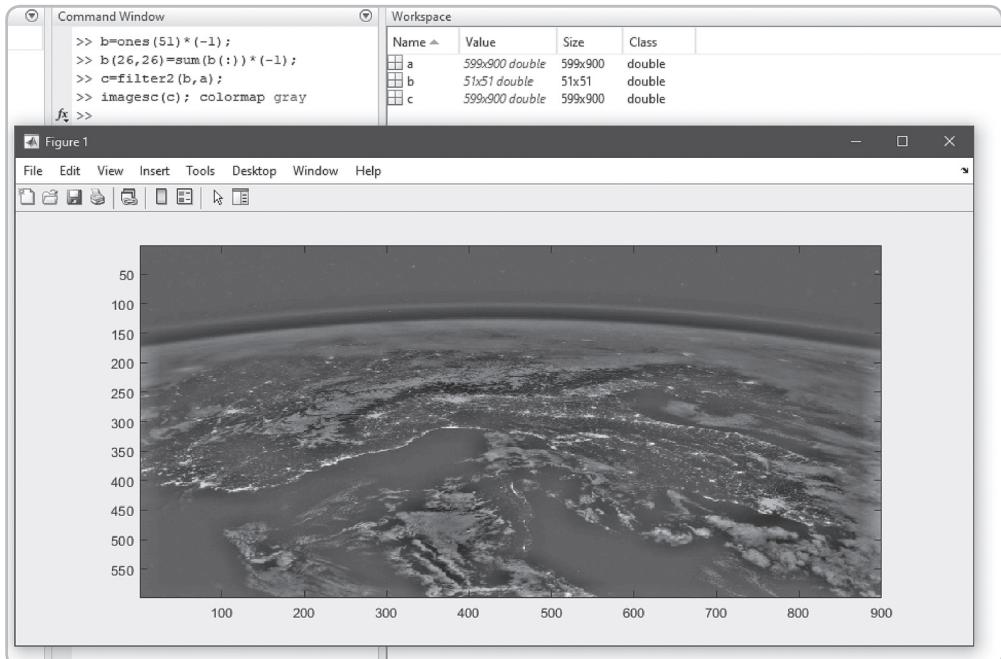


Рис. 1.67. Фильтрация изображений в ПО MATLAB с помощью функции `filter2` (поиск контуров на изображении)

Функция `filter2` подобная функции свертки, однако при ее использовании сохраняется размер исходного изображения. При этом в качестве первого аргумента выступает окно свертки, в качестве второго — переменная, соответствующая массиву изображения. Более подробно про процедуру пространственной фильтрации можно посмотреть в приложении А.3. Следует отметить, что изображение при использовании функции должно быть представлено в вещественном типе данных. Пример использования функции показан на рис. 1.67 и 1.68.

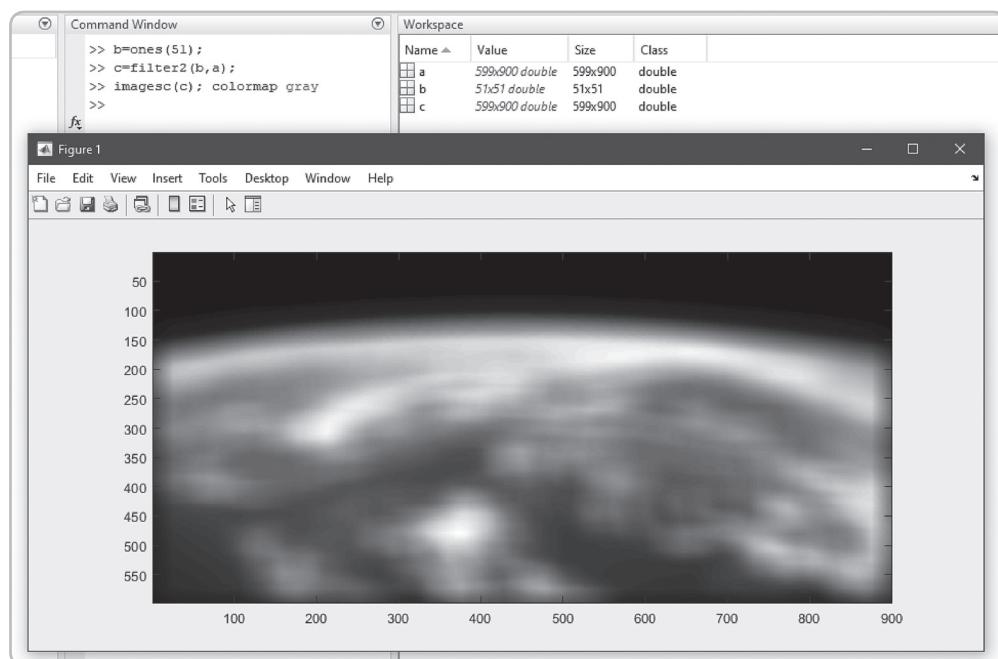


Рис. 1.68. Фильтрация изображений в ПО MATLAB с помощью функции `filter2` (размытие изображения)

1.5.4. Запись изображений

Для записи полученного в ходе обработки изображения на диск используется функция `imwrite`, которая требует двух обязательных аргументов: имени переменной, ассоциированной с сохраняемым изображением, и строки, содержащей полный путь и имя файла с указанием расширения. Если запись массива осуществляется в текущий каталог MATLAB, то достаточно указать только имя файла с расширени-

ем. Список поддерживаемых форматов совпадает с функцией `imread` (см. таблицу на с. 42); для записи изображения в отличный от перечня формат необходимо использовать функцию `multibandwrite` [1]. Для некоторых форматов сохраняемых изображений возможно использование дополнительных параметров. В частности, при сохранении изображения в формат `jpg` с использованием свойства `'Quality'` возможна настройка степени сжатия, для изображения в формате `tiff` можно задать разрешение изображения с помощью свойства `'Resolution'`, для `gif`-файлов можно настроить анимацию, к ряду форматов возможно добавить текстовой комментарий и настроить прозрачность содержимого и т. д. [1].

Следует отметить, что функция `imwrite` по умолчанию поддерживает только массивы с целочисленными элементами, поэтому при записи изображений дробные и отрицательные элементы изображения будут отброшены (рис. 1.69).

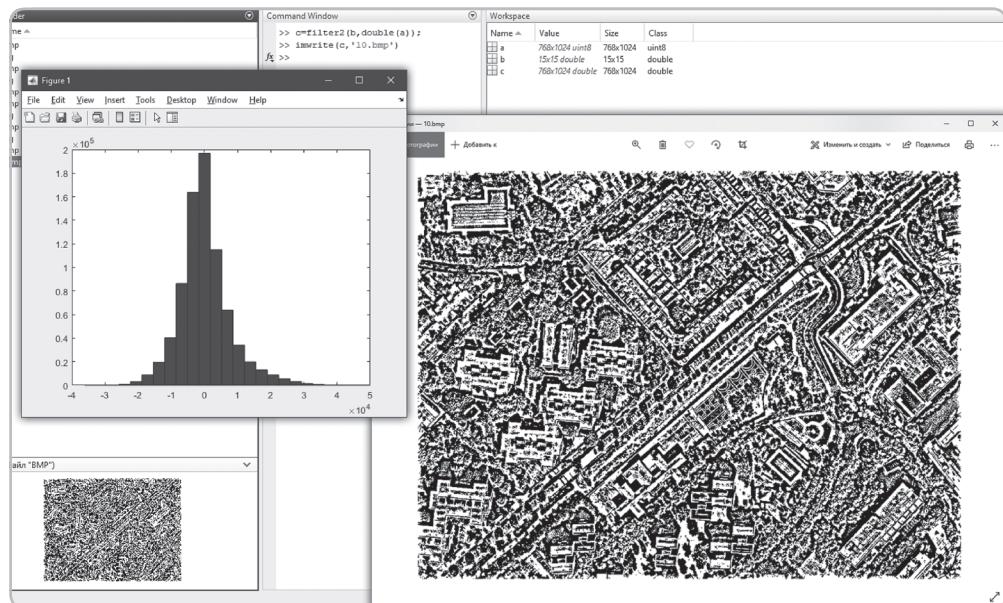


Рис. 1.69. Пример записи изображения в ПО MATLAB с помощью функции `imwrite` с неверно выставленным динамическим диапазоном (результат применения фильтра усиления резкости: появление области отрицательных значений)

Динамический диапазон данных в принципе может быть произвольным и определяется спецификой формата сохраняемого изо-

бражения, однако для подавляющей части общепринятых форматов (за исключением bmp-, hdf- и tiff-файлов) ограничивается 8 битами. Поэтому перед использованием функции `imwrite` рекомендуется, во-первых, убедиться, что яркости элементов находятся в диапазоне значений от 0 до 255 (например, построить гистограмму изображения с помощью функций `hist` или `imhist`), во-вторых, преобразовать элементы массива изображения в тип `uint8` (рис. 1.70).

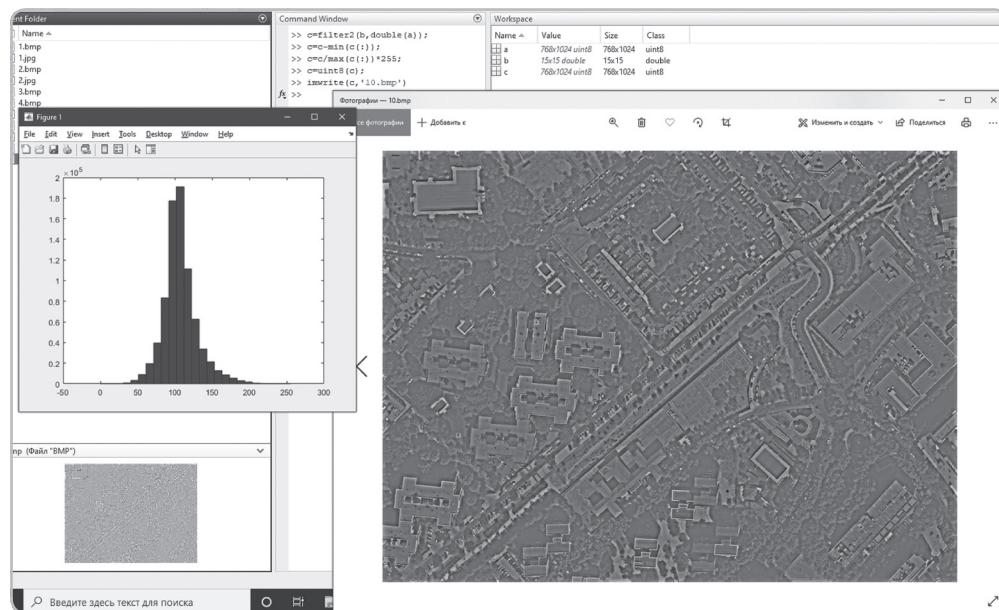


Рис. 1.70. Пример записи изображения в ПО MATLAB с помощью функции `imwrite` с корректным динамическим диапазоном (из результата на рис. 1.69 вычтено значение с минимальной яркостью, после чего диапазон значений растянут до 255)

Контрольные вопросы к главе 1

1. Какой из способов описания мнимой единицы является более предпочтительным и почему?
2. Почему при использовании выражения `uint8 ('Щ')` откликом будет числовое значение 255?

3. Как рассчитать среднее арифметическое значение числовых элементов массива, в котором присутствуют элементы NaN без использования циклов?
4. Как рассчитать дисперсию числовых элементов массива только для положительных величин без использования циклов?
5. Как сформировать массив, состоящий из нулей и единиц, при чем единицы присутствуют с вероятностью 75 % (без использования циклов)?
6. Как в массиве длины N расположить элементы в случайном порядке без использования циклов?
7. По умолчанию в ПО MATLAB операция сшивки производится по столбцам двумерного массива. Как реализовать операцию сшивки по строкам без использования циклов?
8. Как в ПО MATLAB проверить, содержит ли числовое значение мнимую часть? Как проверить, является ли числовое значение чисто мнимым?
9. Каким образом реализуется фильтрация изображения с использованием функции filter2 на его границе?
10. Как избежать переполнения динамического диапазона при перемножении двух изображений?
11. В чем разница процедур умножения $X * Y$, $X . * Y$, если X , Y — числовые значения? Если X , Y — двумерные массивы?
12. Какой будет ответ при выполнении следующей операции $1+2:3+4$? Почему?
13. Имеется массив вида $X=1:10$. Что будет представлять собой массив X в результате выполнения операций $X(end+1)=100$; $X(end+2)=200$?

2. Формирование радиолокационных изображений и особенности их обработки

Существует обширное многообразие растровых цифровых изображений, различаемых по типу формирующего сигнала [5], среди которого отдельного внимания заслуживают изображения, полученные с применением радиолокационных методов. Особым пунктом следует отметить достаточно широкое применение таких изображений в сфере дистанционного зондирования Земли из космоса, поскольку в сравнении с изображениями, полученными в оптическом диапазоне, радиолокационные изображения (РЛИ) обладают рядом существенных преимуществ, таких как невосприимчивость к погодным условиям и времени суток [6]. Данные преимущества побуждают повышенный интерес к их использованию на территории РФ, где, с одной стороны, достаточно низкий процент ясных дней, с другой стороны, значительная часть страны располагается в высоких северных широтах, для которых характерна низкая естественная освещенность в зимний и осенний периоды времени. Как правило, именно РЛИ лежат в основе решения различных социально-значимых задач, начиная от обновления топографических карт и заканчивая мониторингом природных и антропогенных объектов. Перечень наиболее широко используемых коммерческих космических систем, реализующих наблюдение поверхности Земли из космоса в радиодиапазоне, приведен в главе 3.

В настоящее время подавляющее большинство снимков Земли из космоса в радиодиапазоне формируются с применением технологии синтезирования апертуры (радиолокаторы с синтезированной апертурой), позволяющей многократно увеличивать линейную разрешающую способность системы наблюдения вдоль направления движения платформы [7], достигая сопоставимого с изображениями оптическо-

го диапазона пространственного разрешения. На рис. 2.1 приведены фрагменты снимков Земли из космоса, полученные как в оптическом, так и в радиолокационном диапазонах.

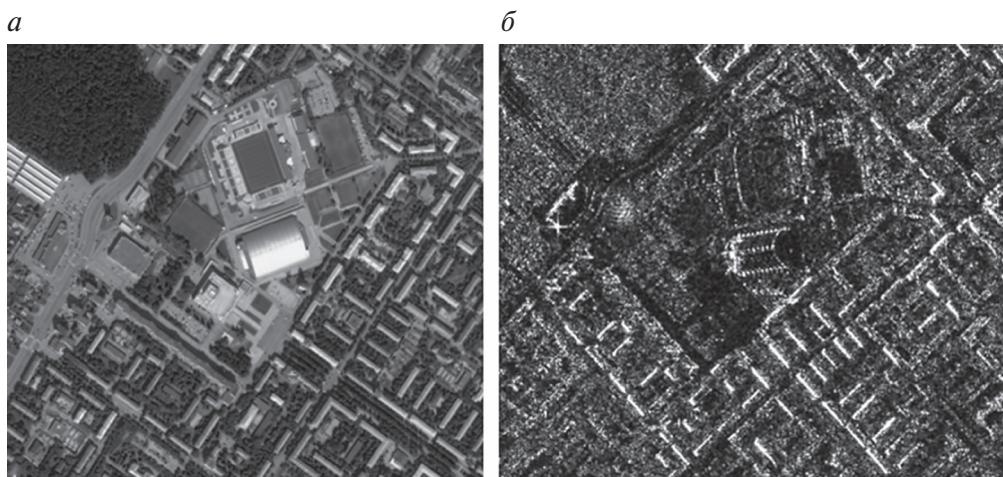


Рис. 2.1. Фрагменты космических снимков территории города Екатеринбурга:

a — снимок, полученный с космического аппарата WorldView-2 (пространственное разрешение 2 м) [8]; *б* — снимок, полученный с космического аппарата RADARSAT-2 (пространственное разрешение 3 м) [9]

Из рисунка видно, что различные объекты местности для обоих типов изображений сопоставимы друг с другом, однако радиолокационное изображение обладает рядом специфических свойств, таких как выраженный шум на всей области снимка, наличие ярких точек и характерные искажения образов сооружений, возвышающихся над общим уровнем рельефа. Поскольку структурные и яркостные свойства любых цифровых изображений проявляются в результате процедуры их получения, для корректной интерпретации данных при проведении различных работ требуется понимание специфики процессов, лежащих в основе формирования изображений. Настоящая глава посвящена процедуре формирования радиолокационных изображений Земли из космоса, а также анализу их геометрических и яркостных свойств.

Применительно к системам наблюдения Земли из космоса технология синтезирования апертуры практически всегда реализуется на радиолокаторах бокового обзора. Таким образом, анализ этапов формирования РЛИ целесообразно начать именно с таких радиолокаторов.

2.1. Принцип работы радиолокатора бокового обзора

Наблюдения за Землей в радиодиапазоне впервые начали осуществляться в 50-х гг. прошлого века [10] с применением управляемых летательных аппаратов, что позволило получить изображения земной поверхности сравнительно низкого (порядка нескольких сотен метров) пространственного разрешения. Геометрическая конфигурация такой системы наблюдения представлена на рис. 2.2.

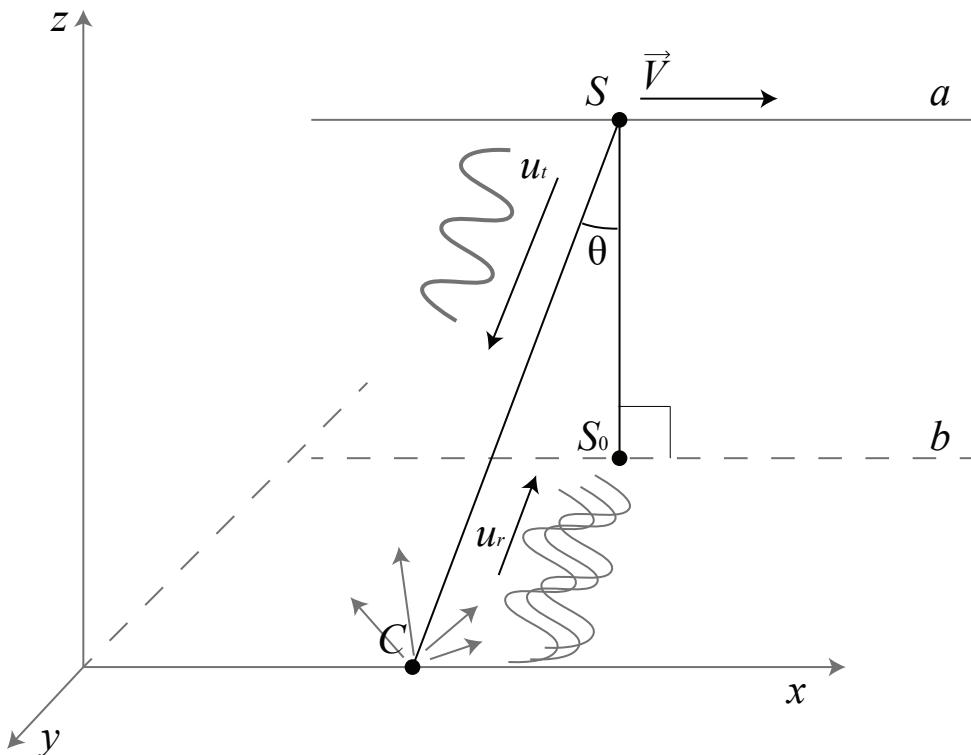


Рис. 2.2. Геометрическая конфигурация станции радиолокационного бокового обзора

Для простоты будем рассматривать Землю как плоскую поверхность, при этом платформа S с радиолокационной станцией движется на неизменной высоте SS_0 с постоянной скоростью \vec{V} вдоль линии Sa , которая называется траекторией движения платформы. Направление, вдоль которого осуществляется движение платформы, приня-

то называть *азимутальным*. Проекция траектории платформы на земную поверхность (плоскость (xy)) называется *трассой*, при этом точка S_0 , образуемая пересечением нормали к платформе и плоскости (xy) , называется *подспутниковой точкой* [11]. Наблюдение всегда осуществляется под некоторым углом θ , называемым *углом бокового обзора* [6], таким образом, что в каждый момент времени непосредственно с движущейся платформы возможно наблюдение некоторой окрестности точки C . Направление от платформы на точку C называется *дальностным*, а само расстояние SC принято называть *наклонной дальностью*.

Для обнаружения цели станцией бокового обзора посыпается радиосигнал в направлении на точку C , называемый *зондирующими импульсом* [6]. На поверхности Земли в точке C происходит частичное поглощение и отражение излученной энергии, в результате чего от точки C в общем случае по всем направлениям, в том числе и в направлении на точку S , происходит отражение зондирующего сигнала. Сигнал, вернувшийся обратно в точку S , называется *отраженным сигналом* (эхосигнал). Связь мощностей зондирующего и принимаемого сигналов определяется с помощью уравнения радиолокации [6]

$$P_r = \frac{P_t G A \sigma \Xi}{4\pi R_t^2 4\pi R_r^2}, \quad (2.1)$$

где P_r — мощность принятого сигнала; P_t — мощность зондирующего сигнала; G — коэффициент усиления приемной (приемопередающей) антенны; A — эффективная площадь (апертура) приемной (приемопередающей) антенны; σ — эффективная поверхность рассеяния цели при заданном ракурсе ее наблюдения; Ξ — коэффициент потерь, возникающий при распространении сигнала в атмосфере до цели и обратно (преимущественно в тропосфере и ионосфере); R_t — наклонная дальность от передатчика до цели; R_r — наклонная дальность от приемника до цели. Ниже приведенные параметры будут рассмотрены более подробно.

Величина P_t определяется только свойствами радиопередатчика и для современных систем радионаблюдения составляет порядка от 0,5 до 1 кВт [6]. Коэффициент усиления передающей антенны по сути определяется шириной диаграммы направленности антенны и показывает, во сколько раз необходимо увеличить мощность P_t в случае замены антенны на идеальную ненаправленную таким образом, что-

бы значение мощности излучаемой антенной электромагнитной волны в точке наблюдения не изменилось [12]. Коэффициент усиления является безразмерной величиной и для систем наблюдения Земли из космоса имеет значение от нескольких сотен до нескольких тысяч единиц. *Эффективная площадь антенны* представляет собой площадь эквивалентной плоской антенны с точно таким же максимальным значением коэффициента направленного действия⁴, что и для рассматриваемой антенны [13], измеряется в квадратных метрах, характерные величины составляют от единиц до десятков квадратных метров. *Эффективная площадь рассеяния* (ЭПР) цели представляет собой площадь идеальной плоскости, которой можно заменить реальную цель так, чтобы в передатчик после отражения от этой плоскости возвращалась та же мощность, что при отражении от реальной цели [14]. Как следует из определения, данный параметр полностью характеризуется свойствами наблюдаемого объекта, единица измерения — квадратный метр. ЭПР определяет способность того или иного объекта рассеивать электромагнитную волну определенной длины и зависит от формы, размера, материала, а также достаточно часто обладает анизотропией, т. е. меняет свое значение в зависимости от ракурса наблюдения. Чем больше значение ЭПР объекта, тем ярче на итоговом изображении будет его радиолокационный образ. Так, металлический объект достаточно большого размера (например, автомобиль) будет выглядеть ярким на радиолокационном изображении, поскольку обладает большим значением ЭПР, т. е. в терминологии радиолокации при формировании РЛИ такой объект может быть заменен достаточно большой по площади поверхностью. Напротив, морская гладь, как правило, на радиолокационном изображении выглядит темной, следовательно, несмотря на большой физический размер, ей будет сопоставлена небольшая по площади поверхность. Ниже приведены некоторые типичные значения ЭПР, м^2 , [6, 14, 15] для некоторых целей:

⁴ Коэффициент направленного действия – отношение квадрата напряженности поля, создаваемого антенной в данном направлении, к среднему значению квадрата напряженности поля по всем направлениям [12].

Транспортный самолет.....	40–70	Человек.....	0,5–1 (2 балла)...	Море 0,0001–0,0016
Малозаметный истребитель	0,3–0,4	Сизый голубь.....	0,01	Снег0,005–0,040
Катер.....	50	Домовый воробей.....	0,0008	Трава0,0003–0,0040
Подводная лодка (на поверхности моря).....	10–200	Лебедь-шипун	0,0228	Лес0,040–0,063

Коэффициент потерь Ξ зависит от длины волны и для диапазона волн от 1 до 30 см составляет около 30 % [16]. Далее коэффициент потерь не будет рассматриваться, поскольку заложенные в нем эффекты несопоставимо меньше, чем потери мощности при отражении сигнала от цели.

Следует отметить, что в современных радиолокационных системах наблюдения Земли из космоса практически повсеместно радиопередатчик и приемник пространственно совмещены. С учетом вышесказанного выражение (2.1) можно переписать в виде

$$P_r = \frac{P_t G A \sigma}{(4\pi)^2 R^4}.$$

В качестве антennы в системах космического мониторинга используются фазированные антенные решетки прямоугольной формы (рис. 2.3), в которых ориентация диаграммы направленности регулируется с помощью полей возбуждения на излучающих элементах, а не за счет изменений геометрической формы конструкции [13].

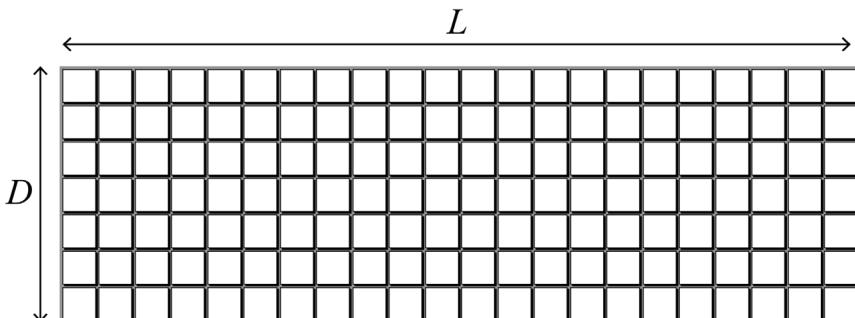


Рис. 2.3. Схематическое изображение фазированной антенной решетки

Размер прямоугольной фазированной антенной решетки характеризуется двумя параметрами: L — продольным размером антенны, ориентированным вдоль направления азимута (направления движения платформы), D — поперечным размером антенны. При этом в качестве размера апертуры (эффективной площади антенны) на данном этапе можно рассматривать ее фактическую площадь, т. е. произведение величин L и D . Линейные размеры антенны в значительной мере (без учета коэффициента использования поверхности⁵ и коэффициента полезного действия⁶) определяют ширину диаграммы направленности в соответствующих плоскостях:

$$\theta_D \cong \frac{\lambda}{D}, \quad \theta_L \cong \frac{\lambda}{L}, \quad (2.2)$$

где λ — рабочая длина волны радиолокационной системы.

Отметим, что углы в выражении (2.2) измеряются в радианах. Таким образом, чем больше линейный размер антенны в одном из направлений, тем меньше будет ширина диаграммы направленности в соответствующей ему плоскости (рис. 2.4); вектор U показывает направление движения платформы. Отметим, что антенны конструируют таким образом, чтобы выполнялось соотношение $L > D$, при этом величина продольного размера составит 10 м, а размер поперечный варьируется в диапазоне от 1 до 5 м. В этом случае ширина диаграммы направленности по азимуту будет намного меньше, чем по дальности, что позволяет в ходе мониторинга достичь достаточно широкой полосы обзора (от десятков до сотен километров).

С учетом приведенных выше свойств используемой в радиолокационном наблюдении аппаратуры становится возможным более детально представить область наблюдения (рис. 2.5). При пересечении диаграммы направленности антенны и земной поверхности вокруг точки C возникает фигура, называемая *пятном засветки*. В предположении, что земная поверхность представляет собой плоскость, а форма диаграммы направленности характеризуется только двумя взаимно перпендикулярными углами и не обладает побочными лепестками, пятно

⁵ Коэффициент использования поверхности — отношение эффективной площади антенны к ее геометрической площади [13].

⁶ Коэффициент полезного действия — отношение мощности радиоизлучения, создаваемого антенной, к мощности радиочастотного сигнала, подводимого к антенне [17].

засветки будет представлять собой эллипс, большая полуось которого δd расположена в направлении дальности, а малая δx — в направлении азимута. В действительности отклик системы от пятна засветки и будет представлять собой один элемент (пиксель) формируемого РЛИ, т. е. точки, расстояние между которыми меньше величины δd , не будут разрешимы на радиолокационном изображении. Для $\lambda = 10$ см, $D = 2$ м, $L = 10$ м и высоты платформы, равной 400 км, получаем, что размеры пятна засветки составляют $\delta x \approx 10$ км и $\delta d \approx 50$ км. При использовании первых радиолокационных станций бокового обзора действительно получались РЛИ с низким пространственным разрешением. Например, один из первых спутников серии «Космос» с аппаратурой активного бокового обзора «Чайка» (высота орбиты около 270 км, длина антенны около 10 м, $\lambda = 3,75$ см) обладал пространственным разрешением, равным 2 км [6], что оказывалось вполне пригодным, например, для решения задач мониторинга кораблей на открытых водных пространствах. Однако в настоящее время спрос на радиолокационные изображения возникает в самых разных отраслях человеческой деятельности, поэтому со временем встала необходимость повысить пространственное разрешение РЛИ.

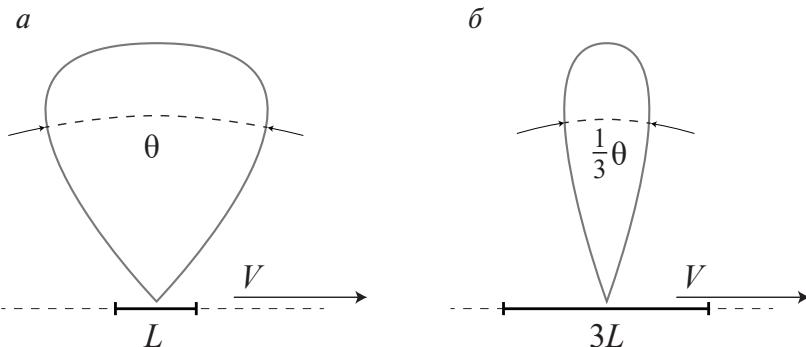


Рис. 2.4. Влияние продольного размера антенны на ширину диаграммы направленности по азимуту (вид в плоскости, проходящей через орбиту платформы и цель):

a — малый продольный размер антенны;
б — увеличенный в три раза продольный размер антенны

Благодаря геометрической конфигурации станции бокового обзора осуществить разрешение по дальности можно уже на этом этапе. Фиксация приемником отраженного импульса происходит на протяжении некоторого конечного времени, при этом составляющая им-

пульса, пришедшая в начальный момент времени, будет соответствовать наименьшей из возможных наклонных дальностей, а составляющая, пришедшая в конечный момент времени, будет относиться к наибольшей из возможных наклонных дальностей (рис. 2.6). Таким образом, благодаря «запоминанию» времени прихода элементов отраженного сигнала становится возможным соотнести их с положением в пространстве. Современная аппаратура позволяет разрешить по времени отраженный импульс на величину до 30000 отсчетов и выше [18], что позволяет получить величину $\delta d' \approx 1...5$ м, являющуюся приемлемой для решения большинства задач, связанных с мониторингом земной поверхности из космоса.

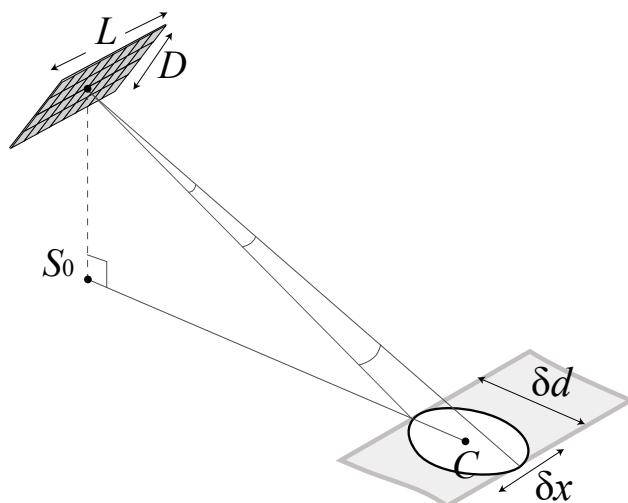


Рис. 2.5. Формирование элемента РЛИ при боковом обзоре

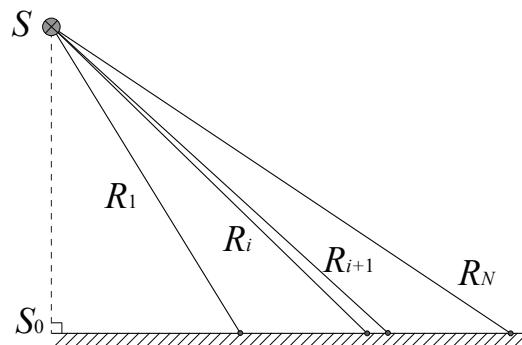


Рис. 2.6. Принцип разрешения пятна засветки по дальности

Однако увеличение разрешения итогового РЛИ только вдоль одной из осей не позволит достичь результатов, сопоставимых с возможностями использования данных оптического диапазона, поэтому обозначенный подход мало применялся вплоть до изобретения технологии синтезирования апертуры.

2.2. Аналитическая запись отраженного сигнала

На основании рассмотренных ранее параметров радиолокационной системы наблюдения можно вывести выражение для отраженного сигнала. В самом общем виде функция, описывающая взаимосвязь между отраженным и зондирующими импульсами, выглядит следующим образом [19]:

$$\dot{u}_r(t) = |\dot{u}_r| \int_{\Omega} \sigma_k(\vec{x}) \frac{G(\vec{x}, t)}{R(\vec{x}, t)} s \left\{ t - \frac{2R(\vec{x}, t)}{c} \right\} \times \\ \times \exp \left\{ -j \left(\frac{2\pi \cdot 2}{\lambda} R(\vec{x}, t) + \varphi_{ref}(\vec{x}, t) \right) \right\} d\vec{x} + \dot{N}(t), \quad (2.4)$$

где Ω — область, в которой располагается цель; $\sigma_k(\vec{x})$ — ЭПР цели \vec{x} ; $G(\vec{x}, t)$ — функция, описывающая форму диаграммы направленности в направлении на цель \vec{x} и в момент времени t ; s — комплексная амплитуда функции зондирующего сигнала; $2\pi/\lambda$ — волновое число; $\varphi_{ref}(\vec{x}, t)$ — случайный сдвиг фазы при отражении сигнала, лежащий в диапазоне $[-\pi, \pi]$; $\dot{N}(t)$ — комплексная амплитуда аддитивного шума радиолокационного тракта и среды распространения.

Изменением дальности за время распространения электромагнитной волны до цели и обратно можно пренебречь (коэффициент 2 перед $R(\vec{x}, t)$). Необходимо отметить, что в выражении (2.4) учитывается значительное количество эффектов, являющихся несущественными при формировании РЛИ, поэтому для дальнейшего анализа связь между зондирующими и отраженным сигналами может быть упрощена.

Для начала рассмотрим комплексную амплитуду аддитивного шума $\dot{N}(t)$. Его появление обусловлено в основном двумя факторами. Во-первых, в выражении для описания шума $\dot{N}(t)$ учены помехи

при распространении сигнала в пространстве, в том числе шумы внеземных источников излучения, шумы, вызванные тепловым излучением Земли, и т. п. [20]. Величина шума внеземных источников излучения прямо пропорциональна длине волны и для частот выше 3–5 ГГц является несущественной. Шум, вызванный тепловым излучением Земли на частотах ниже 10–15 ГГц, также можно считать несущественным. Флуктуационный характер распространения радиоволн является низкочастотным процессом и не успевает оказать заметного влияния на отраженный сигнал за время формирования элемента РЛИ. Тем не менее при интерферометрической обработке изменчивость атмосферы может заметно сказываться на точности измерений. Наконец, помехи, связанные с грозовыми разрядами, являются единственными факторами, существенно искажающими качество формируемой РЛИ. Однако, во-первых, такие изображения редко используются, во-вторых, для съемки в условиях грозовых помех существуют специальные рекомендации, выходящие за рамки настоящего курса [20].

Вторая причина появления аддитивного шума заключается в свойствах аппаратуры радиолокационной станции, которые характеризуются наличием различных шумов электронных приборов (тепловой шум, дробовый шум, фликкер-шум [21]) и наводки. Обозначенные шумы являются неотъемлемой частью любой радиоэлектронной аппаратуры и принципиально неустранимы, однако их суммарное влияние на свойства формируемого РЛИ оказывает существенно меньше, чем эффект от присутствия случайной отраженной фазы $\phi_{ref}(\vec{x}, t)$. Таким образом, далее слагаемое $\dot{N}(t)$ в выражении (2.3) может быть опущено.

Ниже рассмотрим более подробно функцию зондирующего сигнала, ее типичную форму в радиолокационных системах наблюдения, а также приведем обоснование выбора тех или иных параметров. В современных радиолокационных системах в качестве зондирующего сигнала используется последовательность импульсов прямоугольной формы (рис. 2.7, *a*). Огибающую таких импульсов можно охарактеризовать двумя параметрами: τ — длительностью зондирующего импульса, T_r — периодом повторения зондирующих импульсов.

В основе формирования зондирующего сигнала прямоугольной формы лежит его заполнение последовательностью гармонических

колебаний очень высокой частоты, в результате чего образуются радиоимпульсы (рис. 2.7, б). Существует связь между частотой гармонических колебаний f_0 и рабочей длиной волны системы радиолокационного наблюдения:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda}.$$

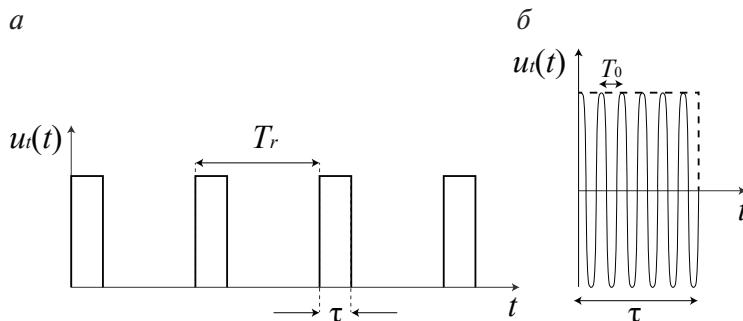


Рис. 2.7. Структура зондирующих импульсов:

- а — огибающая последовательность зондирующих импульсов прямоугольной формы;
б — одиночный радиоимпульс

Для большинства современных систем дистанционного зондирования Земли рабочая длина волны лежит в диапазоне от нескольких единиц до десятков сантиметров, что определяется присутствием на этих длинах окон прозрачности в атмосфере [22]. Таким образом, частота гармонических колебаний f_0 составляет порядка нескольких гигагерц период колебаний T_0 , как правило, равен нескольким наносекундам. Длительность зондирующего импульса τ устанавливается таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить как можно более высокое разрешение по дальности ($\tau c \approx \delta d'$), с другой стороны, ее значение должно превышать T_0 в несколько сотен раз. Как правило, величина τ составляет порядка 10^{-7} – 10^{-8} с. Период повторения зондирующих импульсов T_r выбирается так, чтобы выполнялось соотношение $|\tilde{V}|T_r \approx \delta x'$, где $\delta x'$ — разрешение по азимуту с учетом синтезирования апертуры (подробнее будет рассмотрено ниже). В противном случае на итоговом РЛИ может возникать ситуация пропуска цели, когда при движении спутника возникают разрывы между областями поверхности, с которых формируется отклик. При $\delta x' = 5$ м период повторения импульсов составляет приблизительно 0,5 мс.

Следует отметить, что использование импульсных сигналов позволяет достичь существенной экономии радиолокационной станции, а также упрощает дальнейшую цифровую обработку принятых сигналов. Прямоугольная форма обусловлена, во-первых, простотой генерации, во-вторых, простотой математического представления. С учетом нормировки прямоугольный импульс может быть представлен в следующем виде:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_0(t - nT_r) = \begin{cases} 1 & |t| \in [nT_r - \tau/2, nT_r + \tau/2], \\ 0 & |t| \notin [nT_r - \tau/2, nT_r + \tau/2], \end{cases} \quad (2.4)$$

тогда выражение для отраженного сигнала может быть представлено в следующем виде:

$$\dot{u}_r(t) = |\dot{u}_r| \int_{\Omega} \sigma_k(\vec{x}) \frac{G(\vec{x}, t)}{R(\vec{x}, t)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_0 \left\{ t - nT_r - \frac{2R(\vec{x}, t)}{c} \right\} \times \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} R(\vec{x}, t) + \varphi_{ref}(\vec{x}, t) \right) \right\} d\vec{x}. \quad (2.5)$$

В выражении (2.5) дополнительное слагаемое в функции для описания огибающей сигнала имеет физический смысл времени задержки, т. е. показывает, на сколько запаздывает каждый конкретный n -й импульс отраженного сигнала по отношению к зондирующему. На следующем этапе примем, что диаграмму направленности по азимуту можно аппроксимировать функцией вида

$$G(\vec{x}, t) = \begin{cases} G_0 & |x| \in \Omega_x, \\ 0 & |x| \notin \Omega_x, \end{cases}$$

где Ω_x — некоторая окрестность цели. Данное допущение справедливо практически всегда, поскольку большая часть мощности отраженного сигнала поступает на приемное устройство с направлений, лежащих вдоль направления сигнал—цель (линия SC , см. рис. 2.2).

Далее рассмотрим более подробно множитель $1/R(\vec{x}, t)$ в выражении (2.5) у функции диаграммы направленности. Он характеризует неравномерное ослабление амплитуды отраженного импульса при наблюдении обширной территории вокруг точки C . Тем не менее в пределах пятна засветки данный эффект оказывается достаточно слабо выраженным (порядка долей процента), поэтому можно принять его

равным величине наклонной дальности на траверзе⁷ R_0 (рис. 2.8) и далее считать неизменным:

$$\dot{u}_r(t) = |\dot{u}_t| \frac{G_0}{R_0} \int_{\Omega} \sigma_k(\vec{x}) \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_0 \left\{ t - nT_r - \frac{2R(\vec{x}, t)}{c} \right\} \times \\ \times \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} R(\vec{x}, t) + \varphi_{ref}(\vec{x}, t) \right) \right\} d\vec{x}.$$

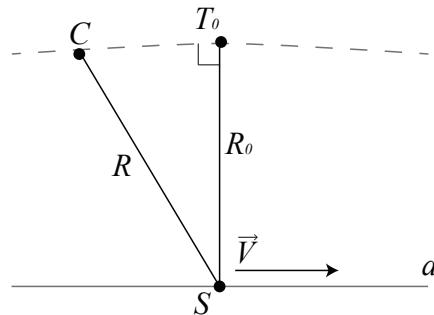


Рис. 2.8. Геометрическое расположение точечной цели в плоскости, проходящей через орбиту платформы и цель:

R_0 — наклонная дальность в направлении траверзы; T_0 — точка пересечения направления на траверзу и линии равной дальности

Отметим, что отрезок CT_0 на рис. 2.8 лежит не на прямой линии, а на дуге окружности, поскольку линии равной дальности на плоской земной поверхности представляют собой окружности (подробнее будет рассмотрено ниже).

Также следует учесть, что фаза отраженного сигнала слабо меняется за время наблюдения элементов цели, т. е. цель рассматриваем как неизмененную во времени:

$$\varphi_{ref}(\vec{x}, t) \rightarrow \varphi_{ref}(\vec{x}).$$

Таким образом, получаем

$$\dot{u}_r(t) = |\dot{u}_t| \frac{G_0}{R_0} \int_{\Omega} \sigma_k(\vec{x}) \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_0 \left\{ t - nT_r - \frac{2R(\vec{x}, t)}{c} \right\} \times \\ \times \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} R(\vec{x}, t) + \varphi_{ref}(\vec{x}) \right) \right\} d\vec{x}. \quad (2.6)$$

⁷ Траверза — линия, перпендикулярная курсу судна, самолета или его диаметральной плоскости. Соответствует курсовому углу 90° [23].

Поскольку в современных радиолокационных станциях наблюдения используются только импульсные сигналы, имеет смысл в дальнейшем использовать для записи не непрерывное время наблюдения t , а дискретное, таким образом, чтобы фиксировать значения отраженного сигнала, например, в середине каждого принятого импульса (т. е. проведем дискретизацию сигнала с переменным шагом):

$$t \rightarrow nT_r + \frac{\tau}{2} + \frac{2R(\vec{x}, t)}{c} \rightarrow nT_r + \frac{\tau}{2} + t_d(\vec{x}). \quad (2.7)$$

Рассмотрим более подробно выражение (2.7). Слагаемое nT_r соответствует времени между неким начальным импульсом и n -м импульсом, отвечающим за наблюдение в определенный момент времени, и характеризует общую длину интервала наблюдений. Слагаемое $\tau/2$ необходимо для того, чтобы фиксировать наблюданную цель строго на середине отраженного импульса, поскольку в реальных системах наблюдения отраженный импульс обладает не вполне прямоугольной формой и в его середине сконцентрирован максимум энергии. Таким образом, данный выбор обеспечивает наилучшее соотношение сигнал-шум. Последнее слагаемое характеризует время задержки импульса $t_d(\vec{x})$ от конкретного элемента наблюдаемой цели (рис. 2.9).

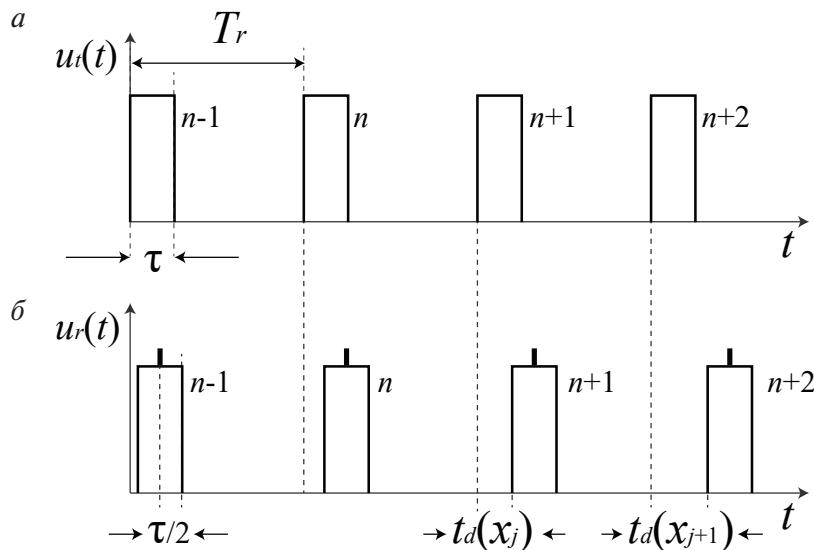


Рис. 2.9. Процедура дискретизации сигнала:
а — зондирующий импульс; б — отраженный импульс

Таким образом, с учетом нормировки (см. формулу (2.4)) получаем

$$\begin{aligned}\dot{u}_r(n) &= |\dot{u}_t| \frac{G_0}{R_0} \int_{\Omega} \sigma_k(\vec{x}) \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_0 \left\{ \frac{\tau}{2} \right\} \times \\ &\quad \times \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} R \left(\vec{x}, nT_r + \frac{\tau}{2} + t_d(\vec{x}) \right) + \varphi_{ref}(\vec{x}) \right) \right\} d\vec{x} = \\ &= |\dot{u}_t| \frac{G_0}{R_0} \int_{\Omega} \sigma_k(\vec{x}) \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} R \left(\vec{x}, nT_r + \frac{\tau}{2} + t_d(\vec{x}) \right) + \varphi_{ref}(\vec{x}) \right) \right\} d\vec{x}.\end{aligned}$$

Для простоты будем далее рассматривать цель как точечную, т. е. обладающую пренебрежимо малыми размерами. В этом случае ЭПР можно представить в виде

$$\sigma_k(\vec{x}) = \sigma_0 \delta(\vec{x} - \vec{x}_C), \quad (2.8)$$

где \vec{x}_C однозначно задает положение точечной цели в пространстве. После этого выражение (2.6) может быть преобразовано к виду

$$\dot{u}_r(n) = |\dot{u}_t| \frac{\sigma_0 G_0}{R_0} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} R \left(\vec{x}_C, nT_r + \frac{\tau}{2} + t_d(\vec{x}_C) \right) + \varphi_{ref}(\vec{x}_C) \right) \right\}. \quad (2.9)$$

Следует обратить внимание на размерность полученного выражения. Поскольку размерность дельта-функции обратна величине аргумента, в результате интегрирования получаем безразмерную величину, при этом, как следует из уравнения (2.8), размерность коэффициента σ_0 — в метрах. Таким образом, множитель перед экспонентой в выражении (2.9) будет измеряться в вольтах.

Для точечной цели появляется возможность представить выражение для дальности с учетом текущего положения спутника в пространстве (см. рис. 2.8). Как следует из рисунка, выражение для наклонной дальности может быть записано в следующем виде:

$$R \left(\vec{x}_C, nT_r + \frac{\tau}{2} + t_d(\vec{x}_C) \right) = \sqrt{R_0^2 + (VnT_r)^2} = R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{VnT_r}{R_0} \right)^2}. \quad (2.10)$$

Выражение под знаком радикала представляет собой сумму единицы и очень малого слагаемого, поскольку дальность вдоль направления траверзы (сотни километров и более) намного больше, чем расстояние, которое успевает пролететь платформа за время обзора точечной

цели (несколько километров). В связи с чем появляется возможность представить выражение (2.10) в виде ряда Маклорена:

$$R_0 \sqrt{1 + \left(\frac{VnT_r}{R_0} \right)^2} \cong R_0 \left(1 + \frac{(VnT_r)^2}{2R_0^2} \right) = R_0 + \frac{(VnT_r)^2}{2R_0}. \quad (2.11)$$

После подстановки выражения (2.11) в формулу (2.9) получаем

$$\dot{u}_r(n) = |\dot{u}_t| \frac{\sigma_0 G_0}{R_0} \exp \left\{ -j \left(\frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + \frac{(VnT_r)^2}{2R_0} \right) + \varphi_{ref}(\vec{x}_C) \right) \right\}. \quad (2.12)$$

Постоянное слагаемое под экспонентой в выражении (2.12) может быть исключено ввиду того, что при сложении со случайной компонентой $\varphi_{ref}(\vec{x}_C)$ оно не влияет на форму и фазовое соотношение отраженного сигнала. Таким образом, получаем итоговое выражение для записи принятого отраженного сигнала от точечной цели (постоянные множители обозначены как \sqrt{A}):

$$\dot{u}_r(n) = \sqrt{A} \exp \left\{ -j \left(\frac{2\pi(VnT_r)^2}{\lambda R_0} + \varphi_{ref}(\vec{x}_C) \right) \right\}. \quad (2.13)$$

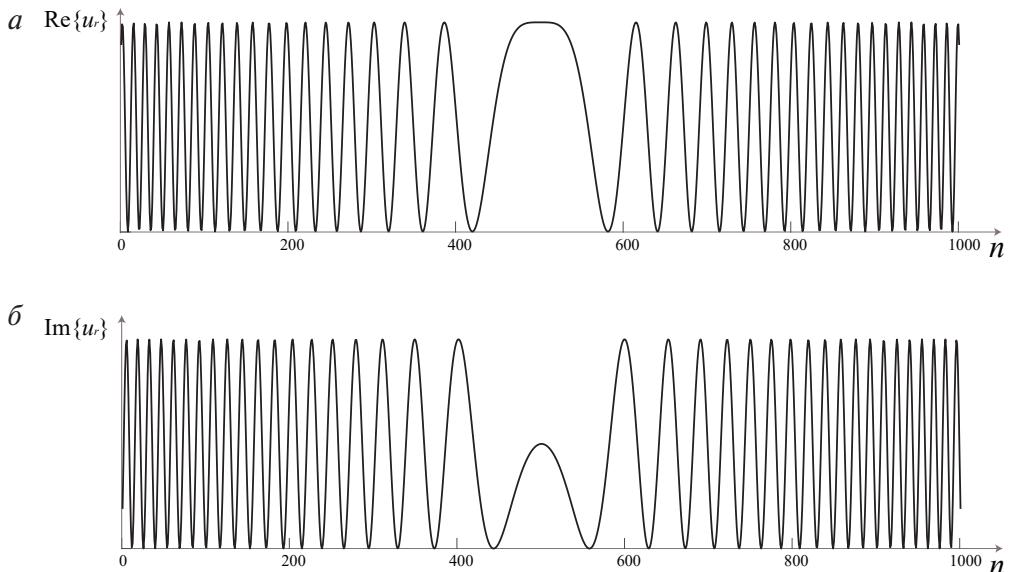


Рис. 2.10. Структура отраженного сигнала для точечной цели:

a — действительная часть; *b* — мнимая часть

Полученная форма записи для отраженного сигнала будет использована в качестве примера при дальнейшем рассмотрении процедуры синтезирования апертуры. На рис. 2.10 представлен типичный вид функции $\dot{u}_r(n)$ для точечной цели. При моделировании использовались следующие параметры: скорость движения платформы $V = 7,5 \text{ км/с}$, период повторения зондирующих импульсов $T_r = 0,5 \text{ мс}$, наклонная дальность вдоль направления траверзы $R_0 = 1000 \text{ км}$, $\lambda = 23 \text{ см}$, количество отсчетов n положено равным 1000.

2.3. Технология синтезирования апертуры

Технология синтезирования апертуры позволяет получить РЛИ с пространственным разрешением, сопоставимым с изображениями оптического диапазона (от 1 до 5 м). Данная технология применяется повсеместно начиная с 1960-х годов прошлого века, а с использованием управляемых летательных аппаратов в качестве платформы — начиная с конца 1970-х [6]. В основе технологии синтезирования апертуры лежит факт наличия движущейся платформы, благодаря чему становится возможным фиксировать не только время задержки сигнала до цели, но и изменение частоты сигнала при движении платформы вдоль линии азимута за счет эффекта Доплера.

Рассмотрим последнее утверждение более подробно. Если частота зондирующего сигнала равна f_0 , то в моменты времени, предшествующие прохождению линии траверзы, частота отраженного импульса будет равна $f_0 + f_D$, где f_D представляет собой доплеровский сдвиг частоты, являющийся функцией времени. Таким образом, в обозначенный временной промежуток частота будет несколько выше по отношению к зондирующему сигналу и уменьшаться по мере приближения платформы к моменту прохождения строго над целью. В этот момент $f_D = 0$, т. е. частота зондирующего импульса будет совпадать с частотой отраженного сигнала. По мере удаления платформы от цели частота будет продолжать уменьшаться, становясь ниже значения f_0 .

Рассчитаем точное значение доплеровского сдвига частоты f_D . Для этого необходимо найти составляющую скорости платформы \tilde{V} относительно цели вдоль наклонной дальности до цели в каждый момент

времени, т. е. найти радиальную составляющую скорости. Для этого перейдем в систему координат, в которой платформа неподвижна, тогда цель будет перемещаться со скоростью $-\vec{V}$, т. е. в противоположном относительно платформы направлении. Рисунок представлен в плоскости, содержащей траекторию платформы и цель (рис. 2.11).

Точка T_0 соответствует направлению вдоль траверзы. В этом случае составляющая скорости цели в направлении линии равной доплеровской частоты может быть найдена как

$$V_D = V \cos(\pi / 2 - \gamma) = V \sin \gamma, \quad (2.14)$$

где γ — угол между направлением на цель и направлением траверзы.

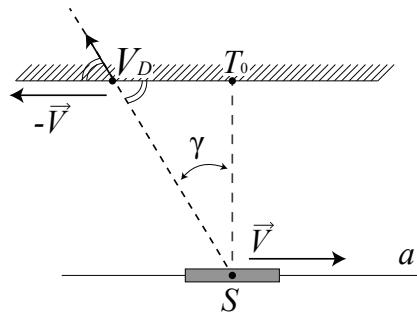


Рис. 2.11. Определение радиальной составляющей скорости точечной цели

Полученное выражение (2.14) справедливо без учета вращения Земли, которое приводит к возникновению дополнительной составляющей доплеровского сдвига. Тем самым нулевое смещение частоты наблюдается не в момент пролета над целью, а несколько в стороне от нее (угловое расстояние составляет несколько градусов). Данный эффект учитывается при синтезировании апертуры в реальных практических задачах, однако в дальнейшем нами рассматриваться не будет ввиду его вторичности по отношению к остальным аспектам формирования РЛИ. Также выражение (2.14) является некорректным при рассмотрении движущихся целей, в этом случае к основной радиальной составляющей добавляются дополнительные компоненты, соответствующие собственному движению цели. Более подробно этот эффект будет рассмотрен в прил. 1.

На данном этапе появляется возможность рассмотреть структуру пространства, формируемого РЛИ. На рис. 2.12 представлена деталь-

ная геометрия пространства под пятном засветки (участок, показанный светлым эллипсом) [24]. Будем называть линиями равной дальности такие линии на земной поверхности, вдоль которых наклонная дальность остается неизменной, при этом каждая линия равной дальности будет ориентирована параллельно направлению азимута. Аналогично будем называть линиями равного доплеровского смещения те линии на земной поверхности, вдоль которых радиальная составляющая скорости остается неизменной; каждая такая линия будет ориентирована параллельно направлению дальности.

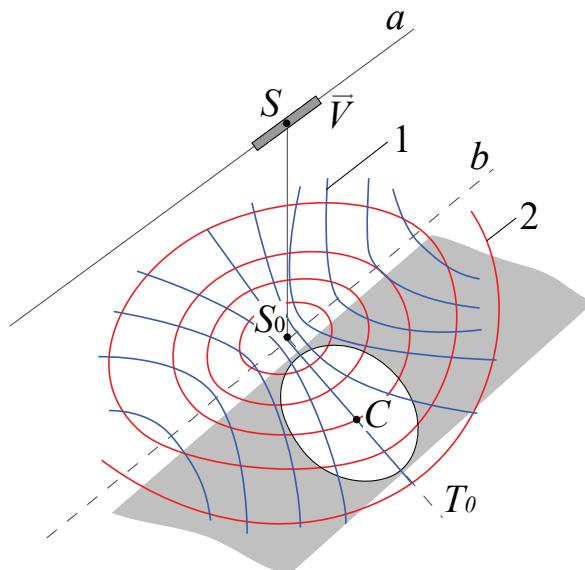


Рис. 2.12. Пространство линий при формировании РЛИ:

- 1 — линии равного доплеровского сдвига (синие);
- 2 — линии равной дальности (красные)

Рассмотрим более подробно форму линий равной дальности и равных доплеровских смещений. Для удобства введем прямоугольную систему координат, начало которой совпадает с положением подспутниковой точки. Ось x направлена вдоль вектора движения относительной скорости цели \vec{V} , направление на траверзу соответственно будет совпадать с направлением оси y (рис. 2.13). Тогда координаты платформы будут равны $\{0, 0, H\}$, где H — высота полета платформы, являющаяся постоянной величиной, координаты вектора скорости соответственно $\{V, 0, 0\}$, координаты произвольной точки C

на поверхности Земли определим как $\{x_C, y_C, 0\}$. Для того чтобы найти геометрию формируемого РЛИ, необходимо рассмотреть поведение зависимости величин x_C и y_C в условиях фиксированной дальности и фиксированных радиальных скоростей.

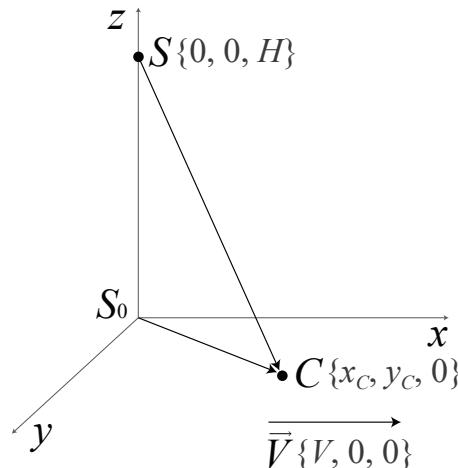


Рис. 2.13. Пространственная конфигурация съемки
(к объяснению геометрии пространства РЛИ)

Как видно из рис. 2.13, наклонная дальность представляет собой не что иное, как расстояние между точками S и C . Несложно показать, что в приведенной системе координат наклонная дальность будет описываться вектором $\{x_C, y_C, -H\}$ и его длина в текущий момент может быть найдена как

$$R_{SC} = \sqrt{x_C^2 + y_C^2 + H^2}.$$

Линии равной дальности соответствуют тем положениям точек C в пространстве, при которых величина R_{SC} остается неизменной. Таким образом, получаем следующее уравнение:

$$x_C^2 + y_C^2 = R_{SC}^2 - H^2. \quad (2.15)$$

Очевидно, что величина наклонной дальности будет всегда больше, чем высота съемки, поэтому правая часть уравнения (2.15) всегда будет положительной. Таким образом, получаем, что линии равной дальности на земной поверхности представляют собой концентрические окружности с центром в подспутниковой точке.

Аналогично найдем уравнение, описывающее радиальную составляющую скорости для произвольной точки C . Несложно показать, что в системе координат, приведенной на рис. 2.13,

$$V_D = \frac{x_C V}{\sqrt{x_C^2 + y_C^2 + H^2}}.$$

Линии равного доплеровского смещения соответствуют тем положениям точек C в пространстве, при которых величина V_D остается неизменной. После очевидных преобразований получаем

$$x_C^2 \left(1 - \left(\frac{V_D}{V} \right)^2 \right) - y_C^2 \left(\frac{V_D}{V} \right)^2 = H^2. \quad (2.16)$$

Поскольку величина V_D по определению есть проекция скорости V , отношение V_D/V всегда будет меньше единицы, а значит, множитель перед x_C^2 в выражении (2.16) всегда будет положительным. Таким образом, линии равного доплеровского смещения на земной поверхности представляют собой семейство гипербол, причем чем дальше точка от направления траверзы, тем меньше будет ее эксцентриситет. В точках, лежащих на линии траверзы, радиальная составляющая скорости V_D будет равна нулю, поэтому гипербола окажется вырожденной в прямую линию.

Таким образом, геометрия пространства пятна засветки не является прямоугольной, что находит свое отражение при вторичной обработке формируемого РЛИ (рис. 2.14).

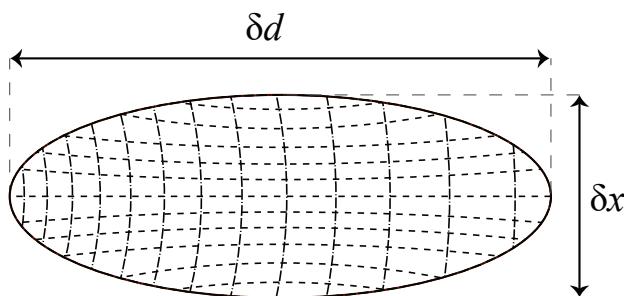


Рис. 2.14. Геометрия внутри пятна засветки

С использованием выражения (2.14) возможно рассчитать значения для величин доплеровских сдвигов [6]:

$$\frac{f_D}{f_0} = 2 \frac{V_D}{c},$$

тогда $f_D = 2 \frac{V_D}{\lambda}$.

Итоговое выражение для частоты отраженного сигнала имеет вид

$$f_r = f_0 \pm 2 \frac{V \sin \gamma}{\lambda}. \quad (2.17)$$

Знак «+» в выражении (2.17) соответствует тем интервалам времени, когда спутник находится перед моментом прохождения цели (положение 1 и 2, рис. 2.14), знак «-» — после момента прохождения цели (положение 4 и 5, рис. 2.14). Положение 3 соответствует тому моменту, когда наблюдаемая точечная цель находится точно в направлении траверзы спутника, при этом $f_r = f_0$. Угол ζ на рис. 2.15 есть не что иное, как ширина диаграммы направленности — то угловое расстояние, в пределах которого точка C «видна» с платформы, соответственно положение 1 и 5 является граничным для состояний видимости и невидимости цели. При этом расстояние D_{SAR} соответствует линейному расстоянию вдоль азимута, которое успевает преодолеть платформа от положения 1 до положения 5 и называется *длиной синтезированной апертуры*.

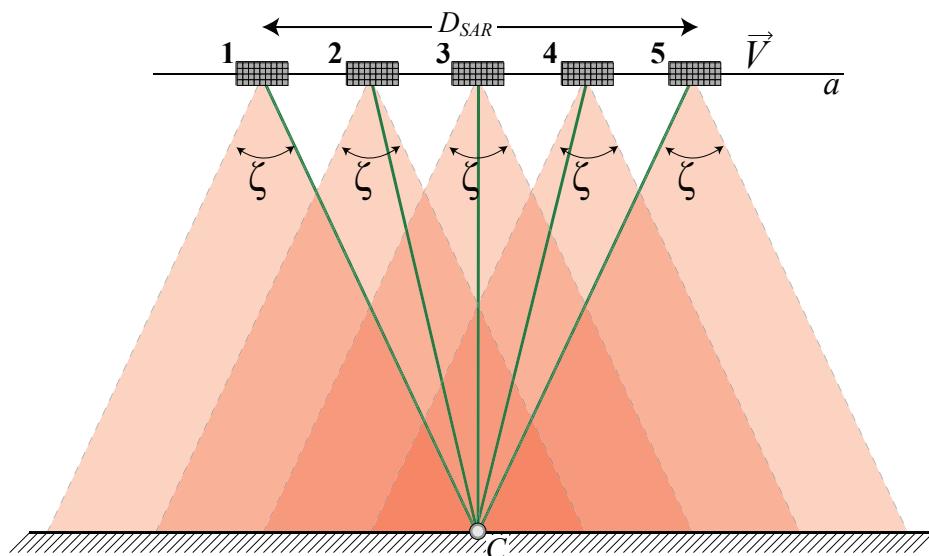


Рис. 2.15. Наблюдение точечной цели при синтезировании апертуры (вид сбоку)

На рис. 2.16 приведен принцип изменения частоты отраженного сигнала при фиксации точечной цели для положения спутника, показанного на рис. 2.15. Поскольку угол γ между направлением на траверзу и на цель в процессе синтезирования апертуры достаточно мал (порядка нескольких градусов), можно считать, что с течением времени частота меняется линейно, т. е. отраженный импульс будет иметь линейную частотную модуляцию (ЛЧМ). Отметим, что на рис. 2.10 отраженный сигнал как раз представляет собой «гетеродинированный» (с частоты f_0 на нулевую частоту) ЛЧМ-сигнал.

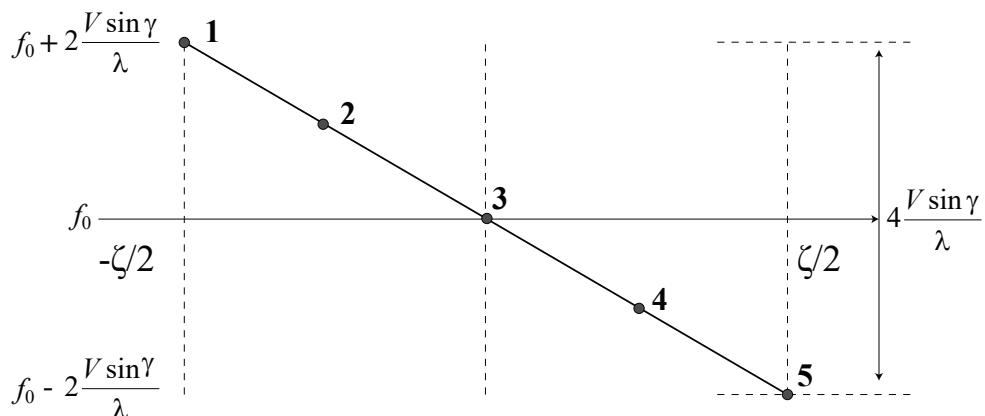


Рис. 2.16. Изменение частоты отраженного сигнала при движении платформы

Использование приведенного подхода позволяет разрешить точечные цели в случае, если они в некоторые моменты времени располагаются в пределах диаграммы направленности (рис. 2.17, а).

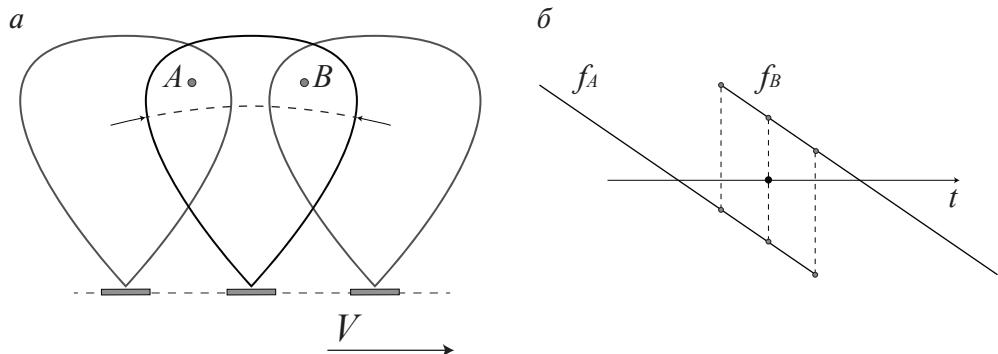


Рис. 2.17. Наблюдение близко расположенных точечных целей A и B:
а — геометрия съемки; б — изменение частоты отраженных сигналов
от целей A и B с течением времени

Несмотря на то что дальность для точек A и B будет всегда одинаковой и за счет движения платформы в пространстве частоты отраженных сигналов f_A и f_B будут изменяться по одному закону, в каждый фиксированный момент времени они будут численно различными (рис. 2.17, б).

Для обнаружения точечной цели в ЛЧМ-сигнале используется принцип согласованной фильтрации. При этом импульсная характеристика согласованного фильтра представляет собой отраженную и комплексно-сопряженную функцию относительно сигнала, с которым согласован фильтр (рис. 2.18). Следует отметить, что многие виды сигналов при согласованной фильтрации «сжимаются», т. е. эффективная длительность может становиться в десятки и сотни раз меньше в сравнении с исходным сигналом, что в последствии выражается в увеличении разрешающей способности системы в те же самые сотни и десятки раз.

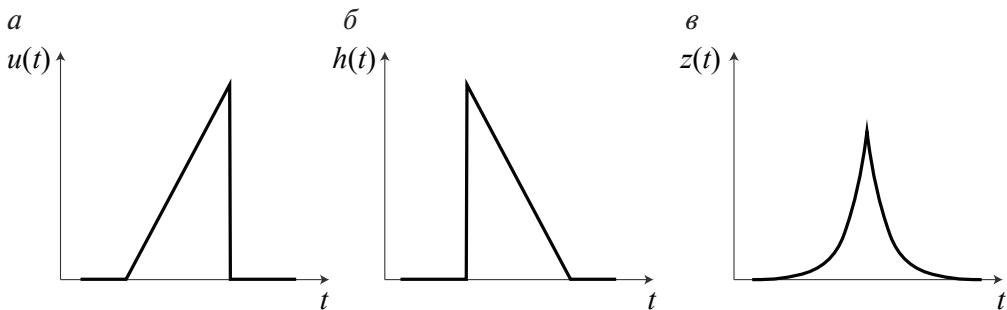


Рис. 2.18. Общая схема принципа согласованной фильтрации:
а — исходный сигнал; б — импульсная характеристика фильтра; в — результат фильтрации

Предположим, что на вход устройства поступает сигнал $u(t)$, форма которого считается известной. Тогда импульсная характеристика фильтра при согласованной фильтрации задается следующим образом:

$$h(t) = \alpha_0 u^*(t_0 - t),$$

где α_0 — произвольный ненулевой коэффициент из области действительных чисел; t_0 — отсчетный момент времени, превышающий длительность сигнала $u(t)$. Результат фильтрации будет представлять собой свертку исходного сигнала с импульсной характеристикой фильтра

$$z(t) = \int_{-\infty}^t s(\tau) h^*(t - \tau) d\tau$$

либо в случае дискретной формы сигнала

$$z(k) = \sum_{n=-N}^N s(n)h^*(n-k),$$

где N — количество отсчетов дискретного сигнала, определяемое шагом дискретизации. В случае, если сигнал задается выражением (2.13), передаточная функция фильтра (опорная функция) при согласованной фильтрации будет иметь вид

$$\dot{h}(n) = K_0 \sqrt{A} \exp\left\{\frac{j2\pi(VnT_r)^2}{\lambda R_0}\right\},$$

где K_0 — произвольный коэффициент, тогда в результате фильтрации получим выражение для РЛИ точечной цели:

$$\begin{aligned} \dot{z}(k) &= (\dot{u} * \dot{h})(n) = \\ &= A \sum_{n=-N}^N \exp\left\{-j\left(\frac{2\pi(VnT_r)^2}{\lambda R_0} + \varphi_{ref}(\vec{x}_c)\right)\right\} \exp\left\{\frac{j2\pi(VT_r)^2(n-k)^2}{\lambda R_0}\right\} = \quad (2.18) \\ &= A \exp\left\{\frac{j2\pi(VT_r)^2 k^2}{\lambda R_0}\right\} \exp\left\{j\varphi_{ref}(\vec{x}_c)\right\} \sum_{n=-N}^N \exp\left\{\frac{-j2\pi(VT_r)^2 2kn}{\lambda R_0}\right\}. \end{aligned}$$

Таким образом, ввиду особенностей обработки отраженного сигнала РЛИ всегда является массивом из комплексных чисел, поэтому для получения итогового изображения необходимо взять модуль выражения (2.18). Второй множитель в этом выражении представляет собой некоторую случайную последовательность комплексных чисел, модуль которых всегда будет равен единице, поэтому далее его можно опустить. Таким образом, получаем выражение

$$\dot{z}(k) = \dot{A} \sum_{n=-N}^N \exp\left\{\frac{-j2\pi(VT_r)^2 2kn}{\lambda R_0}\right\}, \quad (2.19)$$

причем в качестве постоянного множителя использована комплексная амплитуда \dot{A} , представляющая собой результат объединения действительной компоненты со случайной фазой. Отметим, что в общем случае количество отсчетов отраженного сигнала N не совпадает с количеством отсчетов результата фильтрации.

Фактически выражение (2.19) и представляет собой радиолокационное изображение точечной цели. На рис. 2.19 представлен результат использования согласованной фильтрации для сигнала, приведенного на рис. 2.10.

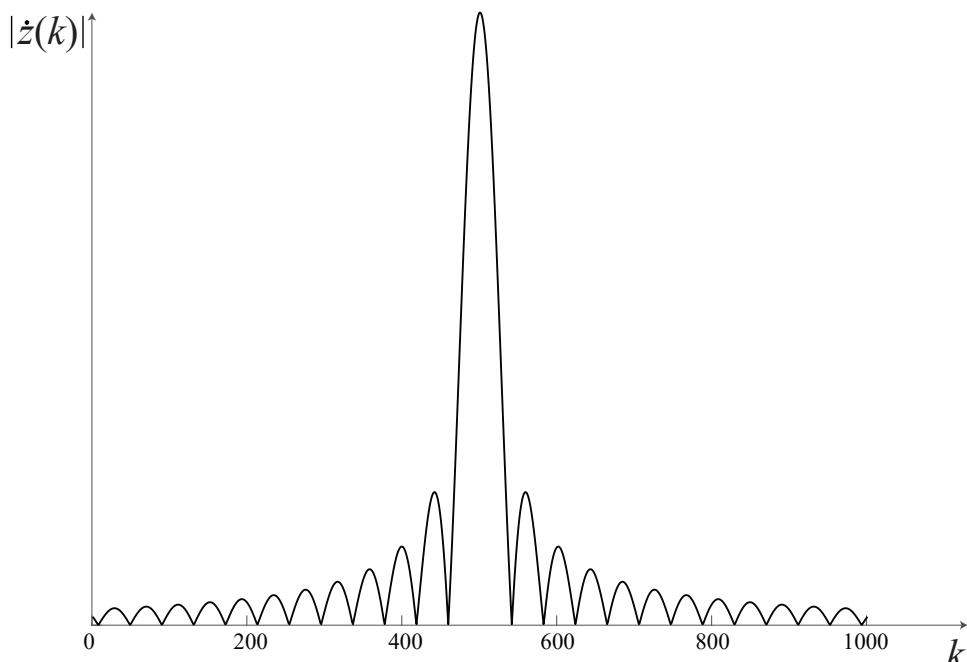


Рис. 2.19. Модуль результата фильтрации сигнала — РЛИ точечной цели

Рассмотрим подробнее влияние множителя \dot{A} на результат фильтрации. Все параметры данного множителя являются неизменными для фиксированной точечной цели (ЭПР σ_0 , параметр, характеризующий диаграмму направленности G_0 , дальность вдоль траверзы R_0 и модуль зондирующего импульса $|\dot{u}_t|$), за исключением фазы отраженного сигнала, которая в пределах серии наблюдений точечной цели может принимать случайное значение в диапазоне $[-\pi, \pi]$. Ее конкретное значение не влияет на положение отклика фильтрации, однако изменяет максимум его величины. На рис. 2.20 приведены три разных отклика одной и той же точечной цели при различных значениях отраженной фазы. Применительно к точечной цели этот эффект не оказывает заметного влияния, однако является существенным при рассмотрении множественных целей.

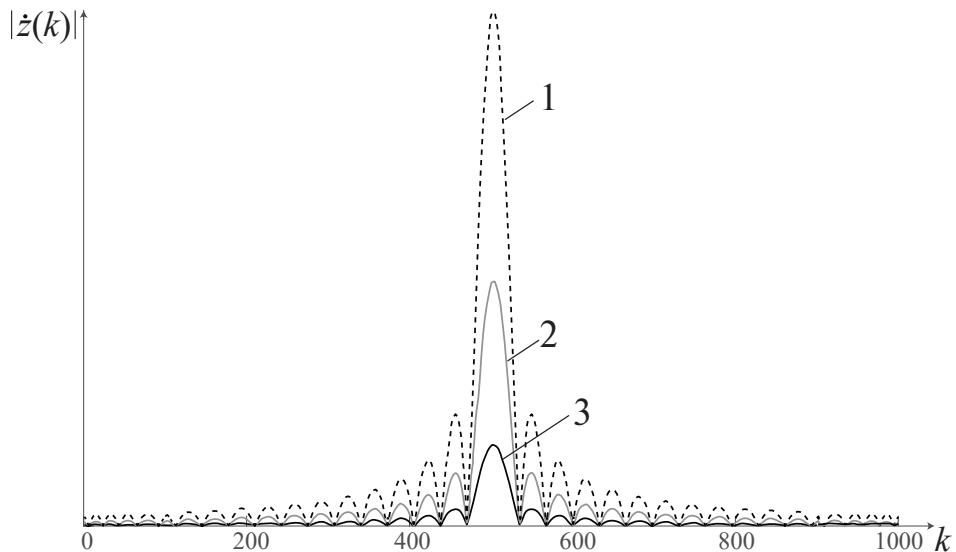


Рис. 2.20. Влияние величины фазы отраженного сигнала на величину отклика точечной цели на РЛИ:

1 — $\varphi_{ref}(\vec{x}_1)$; 2 — $\varphi_{ref}(\vec{x}_2)$; 3 — $\varphi_{ref}(\vec{x}_3)$

Можно заметить, что отклик точечной цели на РЛИ обладает серией симметричных побочных лепестков, что является следствием исходной структуры сигнала, обладающего линейной частотной модуляцией. Покажем это аналитически. Очевидно, что выражение под экспонентной в (2.19) представляет собой не что иное, как сумму геометрической прогрессии. Можно показать, что [25]

$$\dot{z}(k) \cong A \frac{\sin\left(\frac{4\pi(VT_r)^2 Nk}{\lambda R_0}\right)}{\sin\left(\frac{4\pi(VT_r)^2 k}{\lambda R_0}\right)},$$

причем знак \cong обусловлен тем, что суммирование производится по конечному числу отсчетов. Рассмотрим подробнее поведение функции $|\sin(Nx)/\sin(x)|$. Очевидно, что она является четной, поэтому отклик от точечной цели на РЛИ всегда будет симметричным вдоль направления азимута. Далее проанализируем функцию на предмет периодичности: поскольку и числитель, и знаменатель являются периодическими функциями, для нахождения главного периода функции

$|\sin(Nx)/\sin(x)|$ необходимо найти наименьшее общее кратное периодов функций $|\sin(Nx)|$ и $|\sin(x)|$. Очевидно, что эта величина составляет π , т. е. положение главных максимумов определяется следующими номерами отсчетов:

$$k_{\max} = \frac{l\lambda R_0}{4(VT_r)^2}, \quad l = \pm 1, \pm 2, \pm 3\dots \quad (2.20)$$

В выражении (2.20) опущен параметр $l = 0$, поскольку отсчеты опорной функции всегда начинаются с единицы. Также функция обладает побочными максимумами, значение которых определяется положением максимумов функции числителя, т. е. величиной $N\pi/2$. Таким образом,

$$k_{\max}^s = \frac{m\lambda R_0}{8(VT_r)^2 N}, \quad m = 2l + 1, \quad l = \pm 1, \pm 2, \pm 3\dots$$

Следует отметить, что по мере удаления от главного максимума высота побочных максимумов снижается, что объясняется увеличением величины знаменателя. Найдем условия, при которых знаменатель в выражении (2.20) будет равен нулю. Такие условия задаются простым соотношением

$$k_{zero} = \frac{l\lambda R_0}{4(VT_r)^2 N}, \quad l = \pm 1, \pm 2, \pm 3\dots$$

Таким образом, функция обладает бесконечным количеством нулей и максимумов, что и объясняет присутствие на изображении точечной цели побочных лепестков, причем по мере удаления от главного максимума их интенсивность будет снижаться. В результате изображение точечной цели на РЛИ в предельном случае (использование все-направленной антенны) фактически бесконечно растянуто вдоль направления азимута. Практически же количество видимых побочных лепестков ограничено шириной диаграммы направленности антенны.

Рассмотрим влияние величины шага дискретизации на качество изображения точечной цели на РЛИ. Чем больше общее количество отсчетов отраженного сигнала N (и соответственно меньше шаг дискретизации), тем меньше будет расстояние между побочными максимумами. На рис. 2.21 приведены РЛИ точечной цели при использовании различного количества шагов дискретизации N ; условия моделирования те же, что и для сигнала, представленного на рис. 2.10, количество отсчетов опорной функции положено равным 1000.

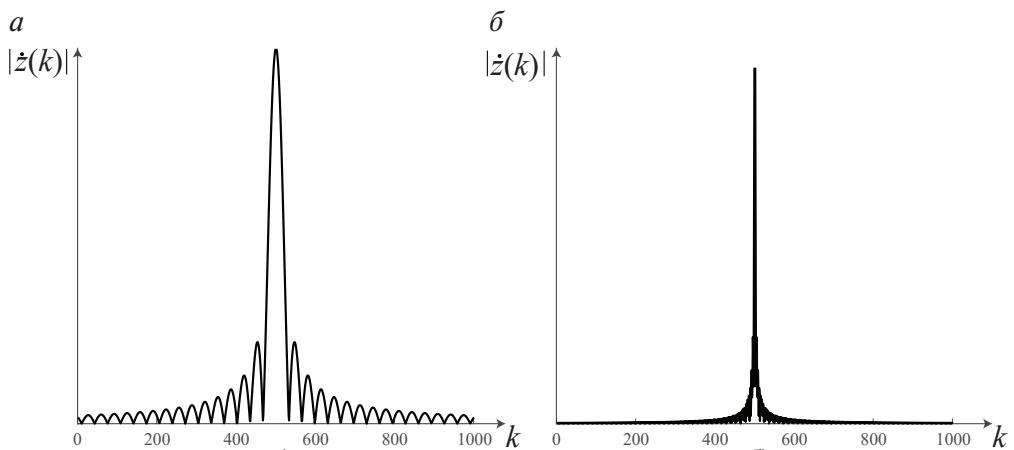


Рис. 2.21. Влияние величины общего количества отсчетов отраженного сигнала на вид отклика точечной цели на РЛИ:

a — $N = 10$; *b* — $N = 100$

Из рис. 2.21 видно, что, чем выше частота дискретизации отраженного сигнала, тем более ярко будет выражен главный максимум на РЛИ и тем качественнее будет итоговое изображение.

Эффект, вызываемый условиями уравнения (2.20) о положении главных максимумов функции $|\sin(Nx)/\sin(x)|$, называется эффектом муара на радиолокационном изображении (рис. 2.22). В практических ситуациях при использовании узконаправленных антенн он проявляется себя при условии, что длина синтезирования апертуры больше, чем размер пятна засветки воль направления азимута, т. е. количество отсчетов опорной функции значительно превышает шаг дискретизации.

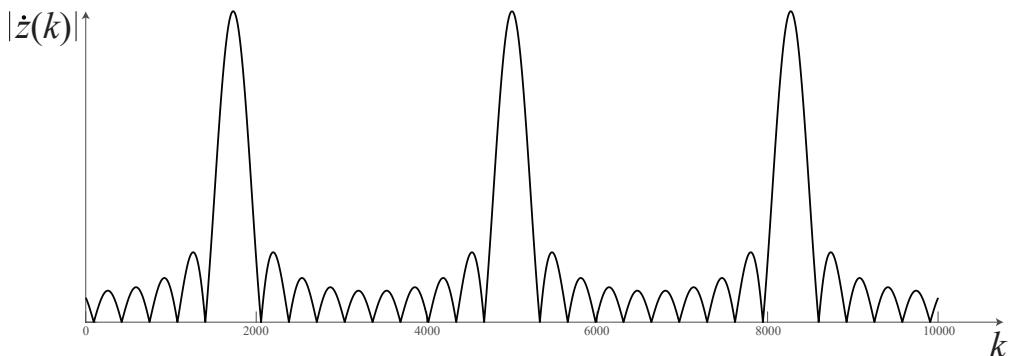


Рис. 2.22. Эффект муара на радиолокационном изображении точечной цели (шаг дискретизации $N = 10$, количество отсчетов опорной функции 10000)

Эффект муара часто встречался на изображениях ранних радиолокационных систем, когда технически невозможно было достичь малого шага дискретизации по времени. Пример такого изображения представлен на рис. 2.23, где кружками показаны основное изображение объекта (1) и его ложный образ (2), возникающий в следствие эффекта муара [6].

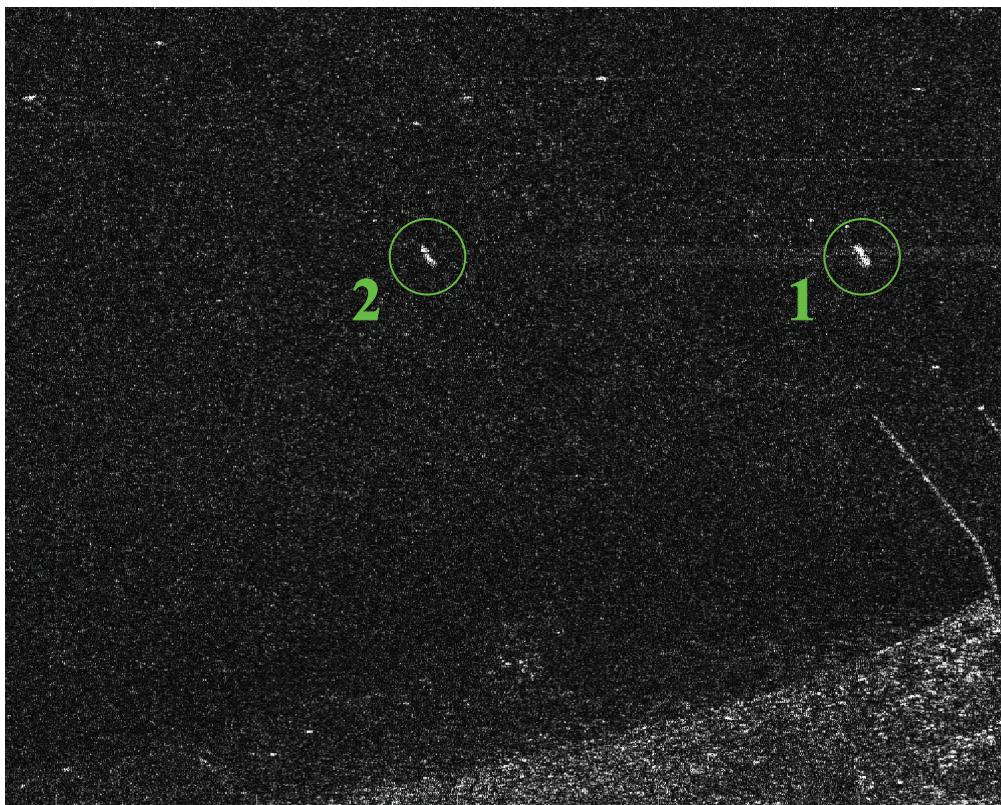


Рис. 2.23. Фрагмент изображения, полученного с помощью космического аппарата «Алмаз», радиолокатор «Меч»

Наконец, представилась возможность дать точную оценку величине разрешения радиолокационной системы по азимуту. Для этого построим модуль отклика точечной цели в системе координат, в которой по оси абсцисс отложено линейное расстояние, которое успевает преодолеть платформа за время периода повторения зондирующих импульсов T_r , а ось ординат проходит через максимум функции (рис. 2.24).

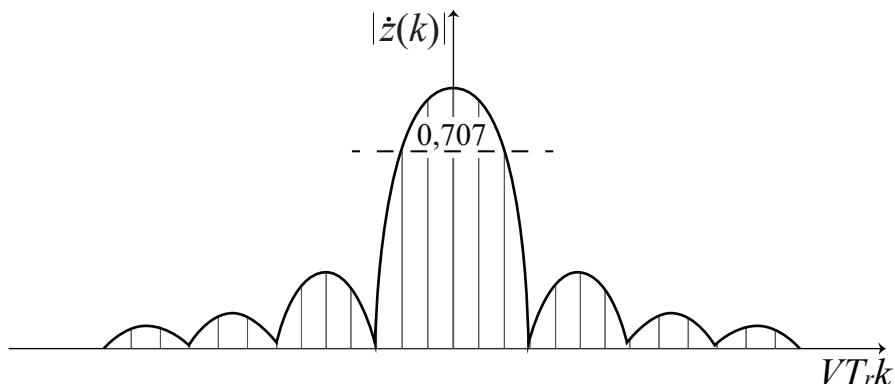


Рис. 2.24. Величина отклика точечной цели на РЛИ вдоль направления азимута с указанием величины разрешающей способности

Разрешающей способностью системы по азимуту называется расстояние вдоль оси абсцисс, на которое приходится интервал функции $|\dot{z}(k)|$, ограниченный диапазоном 0,707 от ее максимума. Такой выбор обусловлен тем фактом, что данный уровень соответствует половине максимума мощности принятого сигнала. Следовательно, в зависимости от конкретных параметров радиолокационной станции при использовании технологии синтезирования апертуры разрешение по азимуту составляет от нескольких единиц до нескольких десятков метров. На практике данная величина означает, что две точечные цели, расстояние между которыми меньше, чем пространственное разрешение по азимуту, на итоговом РЛИ разрешаться не будут. Примеры разрешаемых и неразрешаемых точечных целей приведены на рис. 2.25.

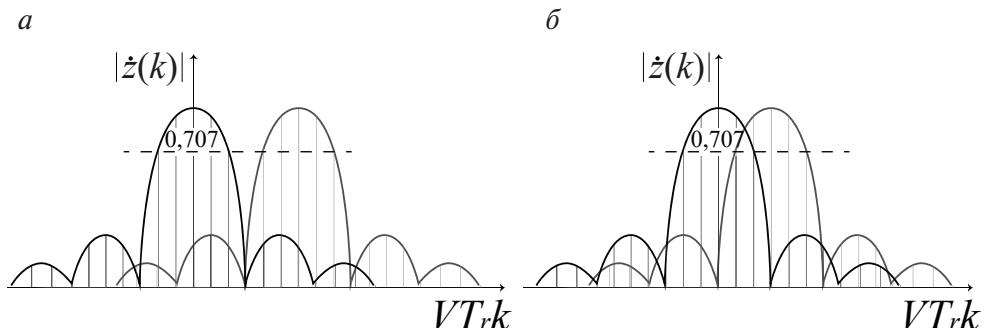


Рис. 2.25. Отклики двух близкорасположенных точечных целей на РЛИ вдоль направления азимута:

а — разрешаемые точечные цели;

б — неразрешаемые точечные цели

Таким образом, обеспечение высокого пространственного разрешения вдоль направления азимута является технически более сложной задачей в сравнении с пространственным разрешением вдоль направления дальности. Именно эта величина и определяет эффективность радиолокационной системы дистанционного зондирования с точки зрения разрешающей способности, являясь основным параметром при проектировании радиолокаторов с синтезированной апертурой. Величину разрешающей способности по дальности можно рассматривать как вторичную, увеличение которой достигается более простыми средствами. При описании характеристик РЛИ конкретных систем наблюдения обычно указывают величину пространственного разрешения по азимуту.

Для РЛИ достаточно высокого разрешения может возникать эффект, называемый миграцией дальности. Связан он с тем, что в таком случае точечная цель при наблюдении во время движения платформы попадает в разные каналы дальности, поскольку расстояние до цели на трапеции и на краях синтезированной апертуры будет отличаться на величину порядка десятков—сотен метров, что превышает значение пространственного разрешения по дальности для большинства современных систем радионаблюдения. На рис. 2.26 показан пример смещения точечной цели в соседние каналы дальности.

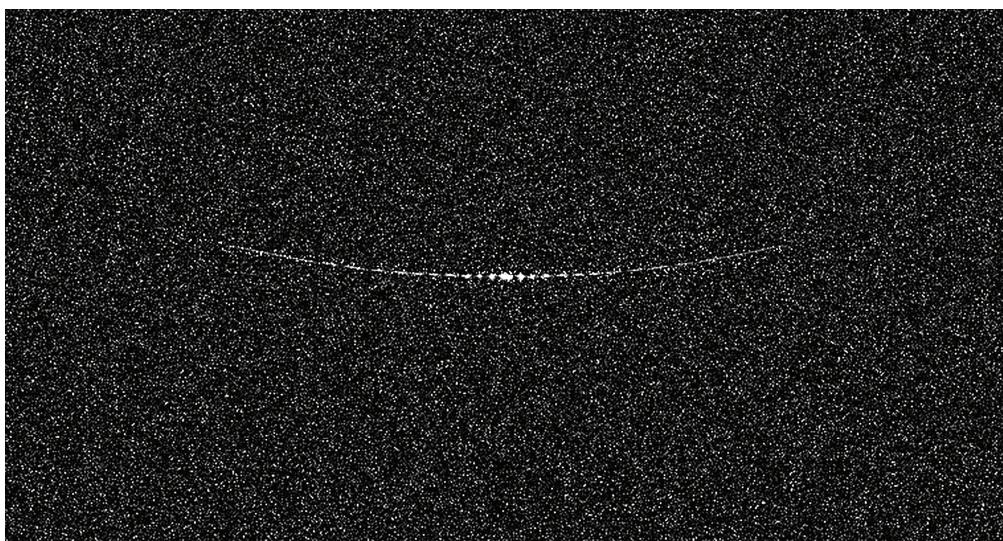


Рис. 2.26. Эффект миграции дальности для точечной цели
(фрагмент модельного РЛИ)

Эффект миграции дальности осложняет процесс дальнейшего синтезирования апертуры, поскольку при сжатии по азимуту возникает необходимость считывания данных не вдоль строки, а вдоль линии равной дальности, представляющей собой в общем случае дугу параболического типа. Синтезирование апертуры с учетом миграции дальности требует ввода специальных методов коррекции, заключающихся в модификации выражения (2.19), либо постобработки радиоголограммы таким образом, чтобы данное выражение стало корректным [6].

2.4. РЛИ пространственно-распределенных объектов

Приведенные выше аспекты формирования РЛИ относятся к точечным целям, однако на практике такой тип целей встречается достаточно редко (уголковые отражатели, элементы металлических конструкций на зданиях и сооружениях, небольшие металлизированные объекты). Большая же часть целей является пространственно-распределенными, т. е. обладающей значением ЭПР, распределенной в пределах некоторого участка с размерами, многократно превышающими элемент разрешения. Далее будут рассмотрены некоторые особенности РЛИ таких объектов.

Представим пространственно-распределенную цель как совокупность близкорасположенных точечных целей в фиксированном канале дальности. Отраженный сигнал от каждой из этих целей может быть описан выражением (2.13), причем все параметры будут одинаковыми, за исключением величины отраженной фазы $\varphi_{ref}(\bar{x})$. Таким образом, в i -й и $(i+1)$ -й моменты времени (интервал между i -м и $(i+1)$ -м моментами времени равен T_r) от одних и тех же точек цели будут приходить разные наборы значений отраженных фаз (рис. 2.27). Вертикальные линии соответствуют положению диаграммы направленности в i -й и $(i+1)$ -й моменты времени, индекс k относится к элементам разрешения на местности.

Поскольку в каждый момент времени величина $\varphi_{ref}(k)$ оказывается независимой, можно утверждать, что за общее время синтезирова-

ния апертуры итоговое распределение этой величины будет соответствовать нормальному распределению⁸.

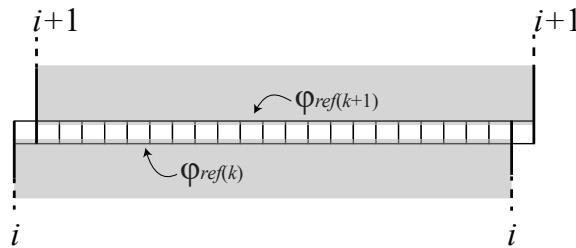


Рис. 2.27. РЛИ пространственно-распределенной цели в фиксированном канале дальности

Рассмотрим подробнее, по какому закону будут распределены элементы РЛИ для приведенного случая. Пусть даны две независимые случайные величины x_1 и x_2 с нормальным законом распределения:

$$p(x_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x_1^2}{2\sigma^2}},$$

$$p(x_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x_2^2}{2\sigma^2}}.$$

Набор величин x_1 соответствует действительной составляющей, x_2 — мнимой составляющей РЛИ. Найдем закон распределения величины z , связанной с x_1 и x_2 следующим образом:

$$z = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}, \quad (2.21)$$

причем величина z будет соответствовать амплитуде РЛИ. Поскольку величины x_1 и x_2 независимы, становится возможным записать выражение для их совместной плотности распределения [26]:

$$p(x_1, x_2) = p(x_1) \times p(x_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x_1^2 + x_2^2}{2\sigma^2}}.$$

⁸ Данное утверждение справедливо только в отсутствие преобладающего фактора, т. е. цель является пространственно-распределенной с приблизительной одинаковой величиной ЭПР. Данное условие не справедливо при наличии одной или нескольких точечных целей с отличным значением ЭПР.

Для нахождения плотности распределения амплитуды запишем связь между действительными и мнимыми частями изображения с их амплитудой z и фазой ϕ (прил. 2):

$$\begin{aligned}x_1 &= z \cos \phi, \\x_2 &= z \sin \phi.\end{aligned}\quad (2.22)$$

Общая формула нового закона распределения в координатах z и ϕ выглядит следующим образом:

$$p(z, \phi) = |J| p\left(z^{-1}(x_1, x_2), \phi^{-1}(x_1, x_2)\right),$$

где $|J|$ — якобиан преобразования; z^{-1} , ϕ^{-1} — обратные функции, представленные в формуле (2.22). Найдем якобиан преобразования от набора координат x_1 и x_2 к набору координат z и ϕ согласно выражению (2.22):

$$|J| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_1}{\partial z} & \frac{\partial x_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial x_2}{\partial z} & \frac{\partial x_2}{\partial \phi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \phi & -z \sin \phi \\ \sin \phi & z \cos \phi \end{vmatrix} = z (\cos^2 \phi + \sin^2 \phi) = z.$$

Таким образом, получаем распределение вероятностей для амплитуды и фазы сигналов:

$$p(z, \phi) = \frac{z}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.23)$$

Для того чтобы получить итоговое распределение только амплитуды, необходимо избавиться от координаты ϕ в выражении (2.23), т. е. проинтегрировать по всей ее области определения. Поскольку фаза распределена равномерно на всей области определения $[-\pi, \pi]$, ее интеграл будет численно равен величине 2π . Итоговое выражение для распределения амплитуды z выглядит следующим образом:

$$p(z) = \int_{-\pi}^{\pi} p(z, \phi) d\phi = \frac{z}{\sigma^2} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}. \quad (2.24)$$

Выражение (2.24) есть не что иное, как распределение Релея [26], и именно оно определяет распределение яркости пикселей на РЛИ в случае пространственно-распределенной цели с фиксированным значением ЭПР. На рис. 2.28 приведено изображение элементов яркости, распределенных по релеевскому закону, а также их гистограм-

ма. Следует отметить, что согласно выражению (2.21) все значения элементов яркостей будут положительными.

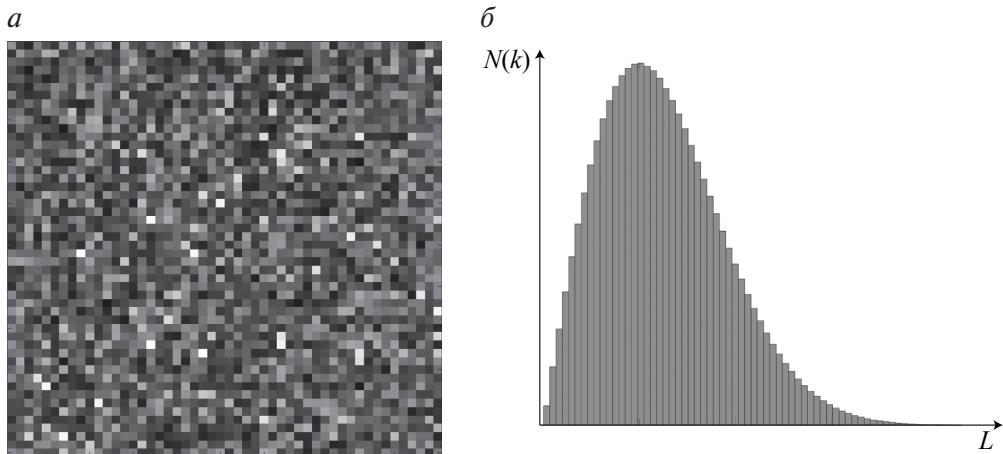


Рис. 2.28. Амплитудное РЛИ с однородным ЭПР:

а — фрагмент кадра;
б — гистограмма распределения яркостей

Если на фоне пространственно-распределенной цели со значением ЭПР σ_0 будет присутствовать точечная цель с иным значением ЭПР (σ), то закон распределения фрагмента изображения в окрестности точечной цели будет подчинен распределению Релея — Райса:

$$p(z) = \frac{z}{\sigma^2} e^{-\frac{z^2 + \sigma^2}{2\sigma_0^2}} J_0\left(\frac{z\sigma}{\sigma_0^2}\right),$$

где J_0 — модифицированная функция Бесселя 1-го рода нулевого порядка.

Структура на рис. 2.28, *a* называется спекл-шумом, и РЛИ фактически представляет собой сочетание участков спекл-шумов, определяемых различным значением ЭПР (рис. 2.29). Кружками показаны участки изображения, соответствующие различным значениям ЭПР.

Иногда для анализа яркостных свойств РЛИ удобно использовать понятие мощности

$$I = z^2.$$

Найдем закон распределения мощности радиолокационного изображения. Используем для этого формулу преобразования закона распределения случайной величины [26]

$$p(I) = p(z^{-1}(I)) \frac{\partial z}{\partial I}.$$

Учитывая, что производная амплитуды z по величине мощности I

$$\frac{\partial z}{\partial I} = \frac{1}{2\sqrt{I}},$$

получим следующее:

$$p(I) = \frac{1}{2\sqrt{I}} p(z^{-1}(I)) = \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{I}{2\sigma^2}}.$$

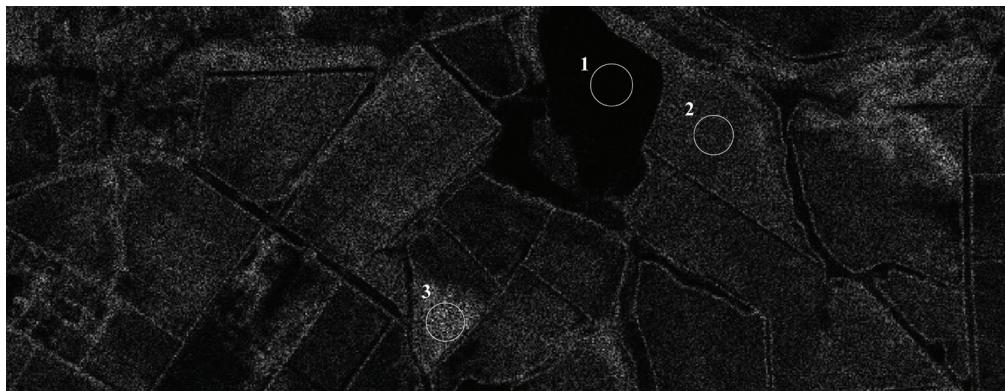


Рис. 2.29. Фрагмент РЛИ, полученного с помощью системы CosmoSkyMed [18]

Таким образом, мощность РЛИ будет распределена по экспоненциальному закону (рис. 2.30). Мощностное РЛИ, как правило, обладает большим контрастом, т. е. точечные яркие цели будут хорошо различимы на темном фоне.

Рассмотрим подробнее процесс формирования РЛИ для пространственно-распределенных целей. Форма огибающей зондирующего импульса является прямоугольной, причем длительность зондирующего импульса будет равна величине τ . Импульс, отраженный от пространственно-распределенной цели, будет иметь «расплющивающуюся» форму из-за того, что от разных элементов цели отклики будут приходить в разное время. Такая сложная форма получается из-за суперпозиции отраженных импульсов от отдельных элементов пространственно-протяженной цели, которую можно аппроксимировать совокупностью элементарных (точечных) отражающих площадок. Длительность отраженного импульса определяется размером пространственно-рас-

пределенной цели в направлении дальности, ограниченным временами задержки t_d^{\min} и t_d^{\max} (рис. 2.31).

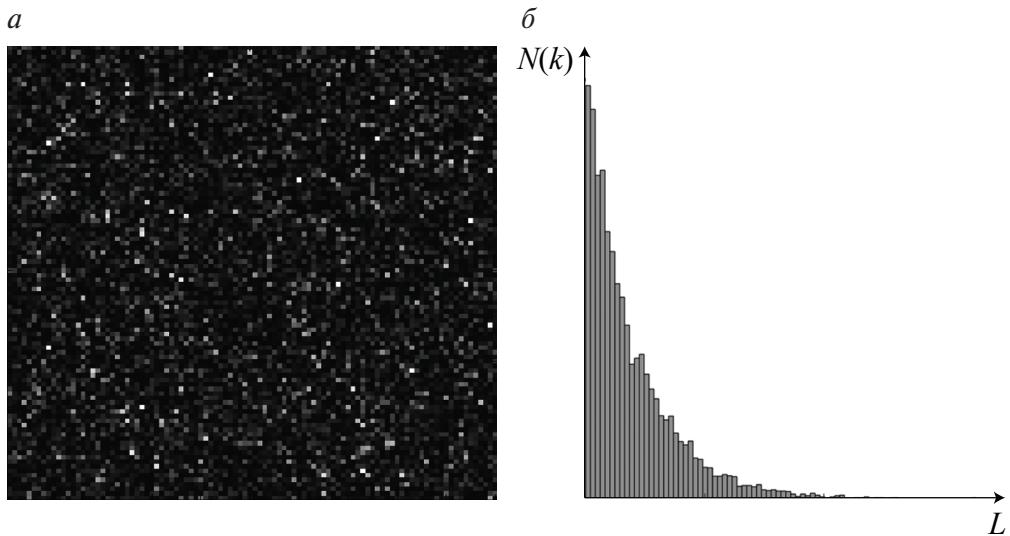


Рис. 2.30. Мощностное РЛИ с однородным ЭПР:

а — фрагмент кадра;
б — гистограмма распределения яркостей

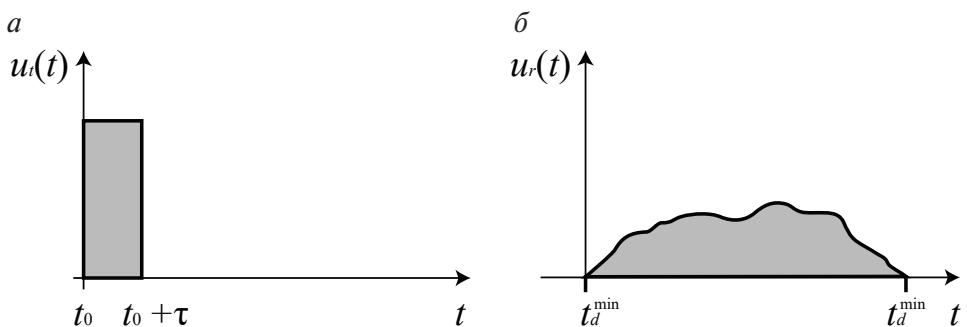


Рис. 2.31. Формирование образа пространственно-распределенной цели на РЛИ:

а — огибающая зондирующего импульса; *б* — огибающая импульса, отраженного от пространственно-распределенной цели

Форма огибающей отраженного импульса в общем случае может быть произвольной и определяется вариациями ЭПР цели в направлении дальности. Отметим, что частота отраженного импульса не будет в точности соответствовать f_0 (частоте зондирующего импульса) из-за эффекта Доплера, в следствие которого разные участки пространственно-распределенной цели будут отражать сигнал с разным до-

плеровским сдвигом. В целом по мере продвижения к концу импульса (время t_d^{\max}) частота будет увеличиваться, поскольку относительно более удаленных точек цели скорость платформы будет выше.

При дискретизации такого отраженного импульса будет получена одна строка двумерной записи принятого сигнала. По мере наблюдения цели при движении носителя каждый следующий импульс при дискретизации будет давать новую строку, таким образом формируя цельное изображение — радиоголограмму (рис. 2.32), стрелкой показано направление движения платформы.

При этом i -й столбец радиоголограммы соответствует результату дискретизации одинаковых моментов времени, соответствующих некоторой фиксированной дальности, называемой каналом дальности.

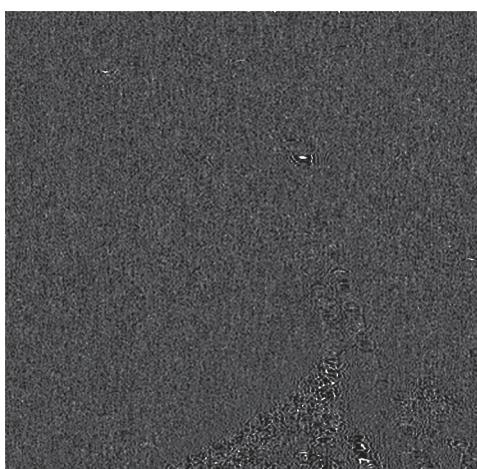
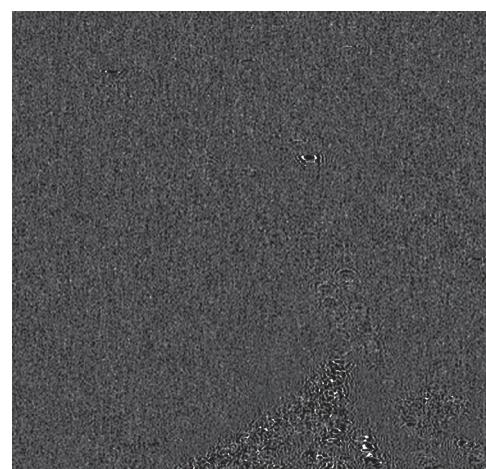
a*b*

Рис. 2.32. Радиоголограмма реального объекта:

a — действительная часть; *б* — мнимая часть

Далее сформированная радиоголограмма проходит процедуру сжатия по азимуту, т. е. свертку с опорной функцией. Получаемое в результате радиолокационное изображение представляет собой адекватный способ отображения земной поверхности, позволяющий решать самые разные задачи космического мониторинга: фиксация наличия либо отсутствия объектов, обнаружение изменений на местности, классификация типов поверхностей, выделение границ пространственно-протяженных участков.

2.5. Особенности построения радиолокационных станций с синтезированной апертурой для систем дистанционного зондирования Земли

Рассмотрим некоторые аппаратные особенности современных систем радиовидения земной поверхности, основанные на использовании технологии синтезирования апертуры. Технологическое оснащение таких систем основано на двух базовых принципах:

- использовании цифрового представления сигнала;
- применении когерентных зондирующих сигналов.

Первый принцип тесно связан с современной методологией теории обработки изображений, в основе которой лежит дискретная форма представления информации (т. н. цифровые растровые изображения), что существенно упрощает процедуры передачи, хранения и преобразования данных, а также проектирование и изготовление систем формирования сигналов, в том числе и в области радиолокации. Второй принцип предполагает отслеживание поведения фазы принятого сигнала, что связано с необходимостью ее дальнейшего анализа для повышения разрешающей способности радиолокационных систем.

Для начала рассмотрим устройство приемопередающего тракта типичного радиолокатора с синтезированной апертурой. Для формирования зондирующих импульсов применяется когерентный приемопередатчик, он же осуществляет предварительную высокочастотную обработку (селекция и усиление) принятого сигнала. На практике приемопередатчик представляет собой достаточно сложное радиоэлектронное устройство, в которое также входят опорный генератор (гетеродин, генерирующий колебания, использующиеся как при формировании зондирующих импульсов, так и при фазовом детектировании принятых импульсов), усилители и умножители частоты, устройства согласования и развязки. Сигнал, принимаемый антенной, после прохождения приемопередатчика поступает на усилитель промежуточной частоты (УПЧ), сигнал с выхода которого подается на квадратурную схему фазового детектирования (ФД). При этом в процедуре фазового детектирования используется тот же опорный сигнал, что и при генерации зондирующего импульса. Квадратурная схема позволяет обрабатывать гармонические сигналы с неизвестной начальной фазой [7, 27]. Она представляет собой два фазовых детектора, причем их опорные

колебания смешены друг относительно друга на величину $\pi/2$, в результате чего выходные сигналы с квадратурой схемы могут быть интерпретированы как действительная и мнимая составляющие огибающей отраженного радиолокационного сигнала. Далее они поступают на аналого-цифровой преобразователь (АЦП), в котором происходит их дискретизация по времени, в результате чего формируется радиоголограмма будущего изображения (рис. 2.33). Описанный процесс осуществляется в космическом сегменте, после чего сигнал, полученный с выхода АЦП, по каналу радиосвязи поступает в наземный сегмент, где с применением вычислительных систем происходит его дальнейшее преобразование (синтезирование апертуры).

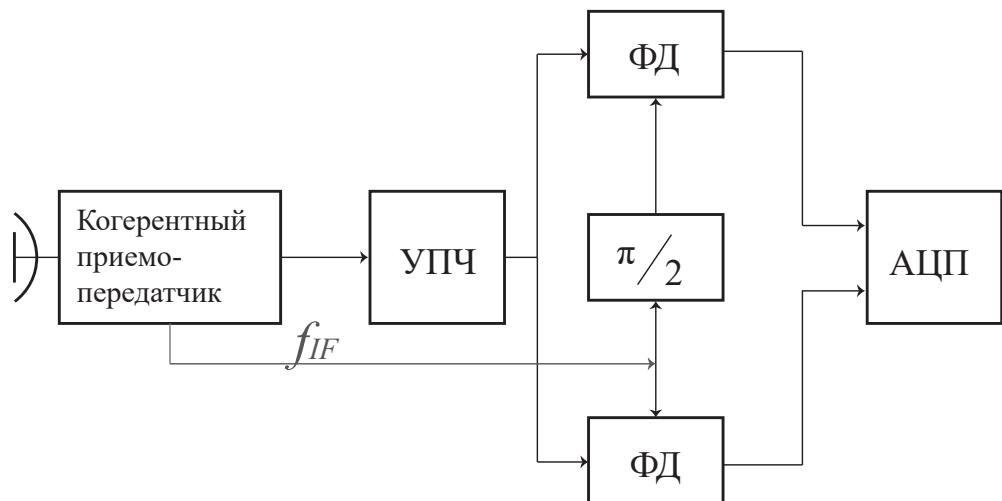


Рис. 2.33. Приемопередающий тракт радиолокатора с синтезированной апертурой
(f_{IF} — сигнал промежуточной частоты)

Синтезирование апертуры (свертка с опорной функцией) выполняется в цифровом процессоре, на который с АЦП (непосредственно с канала радиосвязи либо с устройства хранения) поступает полученная радиоголограмма. Хранение самой опорной функции осуществляется на запоминающем устройстве (ЗУ), причем ее построение выполняется заранее с использованием известных параметров орбиты, угла визирования и характеристик сигнала. Следует отметить, что для современных радиолокационных систем наблюдения опорная функция рассчитывается для заданного набора различных каналов дальности. После цифрового процессора сигнал поступает на ЗУ выходного

сигнала, в котором также может выполняться коррекция полученного РЛИ, включающая радиометрическую обработку и пространственную привязку. Затем сформированное РЛИ поступает на устройство отображения (рис. 2.34).

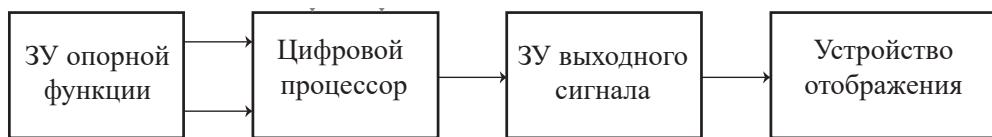


Рис. 2.34. Цифровая обработка сигнала, полученного с АЦП

Отметим, что в современных радиолокационных системах наблюдения Земли из космоса применяется зондирующий сигнал ЛЧМ-формы, который позволяет повысить разрешающую способность системы по дальности из энергетических соотношений при сохранении требуемой длительности импульса. При этом обработка радиоголограммы (рис. 2.35) при использовании такого зондирующего импульса подразумевает не только синтезирование апертуры (сжатие по азимуту), но сжатие по дальности. Для таких РЛИ характерно наличие побочных лепестков вокруг точечной цели не только в направлении азимута, но и в направлении дальности (рис. 2.36).

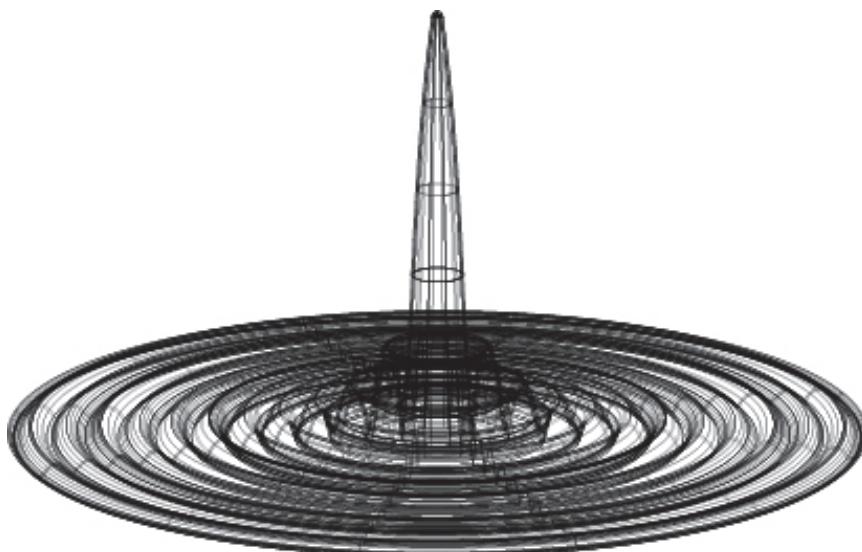


Рис. 2.35. Радиоголограмма точечной цели при использовании зондирующего сигнала с ЛЧМ



Рис. 2.36. Фрагмент РЛИ, полученного с использованием зондирующего сигнала с ЛЧМ (космоснимок спутника RADARSAT-1 [28])

2.6. Влияние параметров волны на свойства РЛИ

В радиолокационном дистанционном зондировании Земли принято выделять два параметра зондирующего сигнала, которые определяют свойства формируемого РЛИ и которые могут быть заложены на стадии проектирования радиолокационной системы — рабочая длина волны и тип поляризации.

Выбор рабочей длины волны для космических систем ограничен окном прозрачности атмосферы, в рамках которого возможно ее распространение без существенных энергетических потерь [6]. Для Земли диапазон рабочих длин волн лежит в пределах от 2,5 до 30 см, что соответствует следующим общепринятым обозначениям длин волн в радиолокации:

- X-диапазон (от 2,5 до 3,8 см);
- С-диапазон (от 3,8 до 7,5 см);
- S-диапазон (от 7,5 до 15 см);
- L-диапазон (от 15 до 30 см).

Чаще всего в коммерческих спутниковых радиолокационных системах наблюдения используются X-, С- и L-диапазоны. Выбор конкретной рабочей длины волны определяется в соответствии со следующими параметрами:

- разрешающей способностью проектируемой радиолокационной системы;
- мощностью передатчика;
- кругом решаемых задач.

Пространственное разрешение формируемых РЛИ ограничивается эффектом дифракции [29], при этом предельное разрешение будет определяться следующим выражением:

$$\Delta L = 1,22 \frac{\lambda}{D} R, \quad (2.25)$$

где λ — длина волны, на которой осуществляется наблюдение; D — размер апертуры системы наблюдения; R — расстояние от системы наблюдения до цели (наклонная дальность).

Следует отметить, что на практике пространственное разрешение оказывается хуже, чем предельное разрешение, поскольку выражение (2.25) характеризует именно предел возможностей аппаратуры, определяемый волновой природой электромагнитного излучения.

Таким образом, при одной и той же аппаратуре с увеличением длины волны предельное разрешение будет падать: если перед разработчиками радиолокационной системы поставлена задача создания датчика для мониторинга элементов антропогенных объектов (характерные размеры порядка 1 м), то использовать L-диапазон будет нецелесообразным, поскольку достижимая разрешающая способность согласно выражению (2.25) не будет лучше, чем 3–5 м.

Мощность передатчика определяет предельное возможное соотношение сигнал—шум на входе приемного устройства. Поскольку коэффициент усиления антенны обратно пропорционален квадрату рабочей длины волны [12], то с ее уменьшением эффективность излучения и приема уменьшается. Кроме того, чем короче рабочая длина волны, тем интенсивнее будет происходить рассеивание ее энергии в атмо-

сфере [30]. Оба обозначенных фактора будут приводить к уменьшению отношения сигнал–шум при уменьшении рабочей длины волны при прочих равных условиях. Таким образом, дистанционное зондирование с использованием X- и С-диапазонов оказывается наиболее энергозатратным и требует более дорогостоящей аппаратуры.

Наконец, выбор рабочей длины волны должен соотноситься с кругом решаемых задач, который для современных радиолокационных станций наблюдения варьируется от обычного мониторинга изменений на местности до тематической классификации наземных объектов. В качестве иллюстрации рассмотрим влияние рабочей длины волны на свойства РЛИ лесной растительности. Экспериментально установлено [30], что волны L-диапазона практически полностью проходят сквозь крону деревьев и отражение происходит преимущественно от подстилающей поверхности. Такие данные могут быть использованы для мониторинга рельефа, в том числе в задачах инерферометрической обработки изображений. В то же время рассеивание волн X-диапазона происходит в основном от верхушек кроны деревьев, что делает возможным использование таких РЛИ в решении задач по определению высоты лесной растительности и расчета биомассы.

В ряде случаев использование длинных радиоволн позволяет осуществлять подповерхностное зондирование, что, например, позволяет оценивать толщину ледового или снежного покрова. Также наблюдения за почвами с низким процентным содержанием влаги позволяют обнаруживать элементы подземной инженерной инфраструктуры [30]. На рис. 2.37 приведены некоторые особенности проникающей способности радиоволн для ряда наиболее типичных наблюдаемых типов поверхностей.

Вторым параметром, требования к которому должны анализироваться перед проектированием радиолокационной системы наблюдения, является поляризация волны. Поляризация электромагнитной волны — явление направленного колебания векторов напряженности электрического поля [29]. В дистанционном зондировании для волн радиодиапазона принято различать два базовых типа поляризации — вертикальная и горизонтальная (рис. 2.38). Помимо того, возможно использование различных сочетаний базовых типов поляризации: так, при сложении вертикальной и горизонтальной синфазных волн с произвольным соотношением амплитуд образуется волна диагональной поляризации; при сложении вертикальной и горизонталь-

ной волн одинаковой амплитуды и с разностью фаз между ними 90° получается волна круговой поляризации; если разность фаз колебаний составляет 90° , но амплитуда различается, то формируется волна эллиптической поляризации.

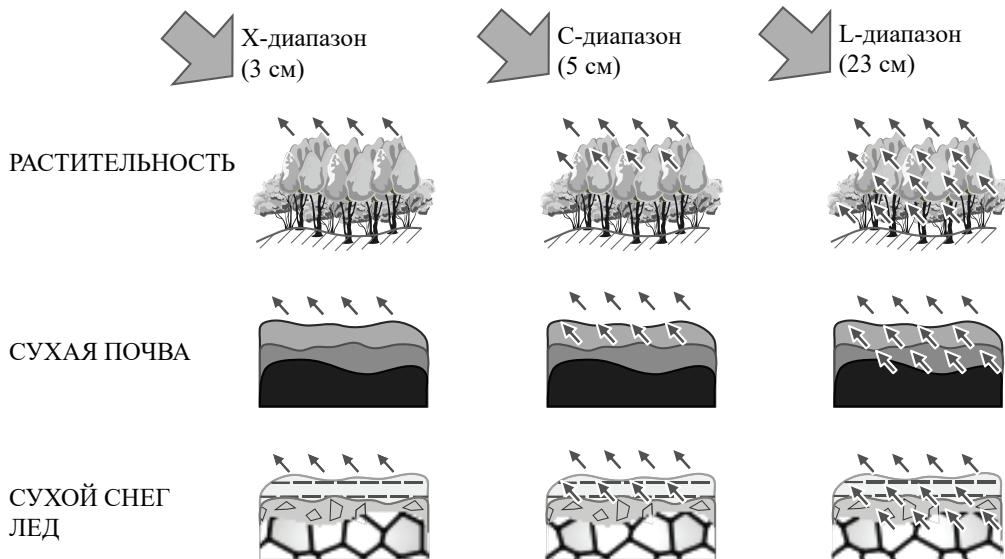


Рис. 2.37. Влияние длины рабочей волны радиолокационной системы на проникающую способность для различных объектов

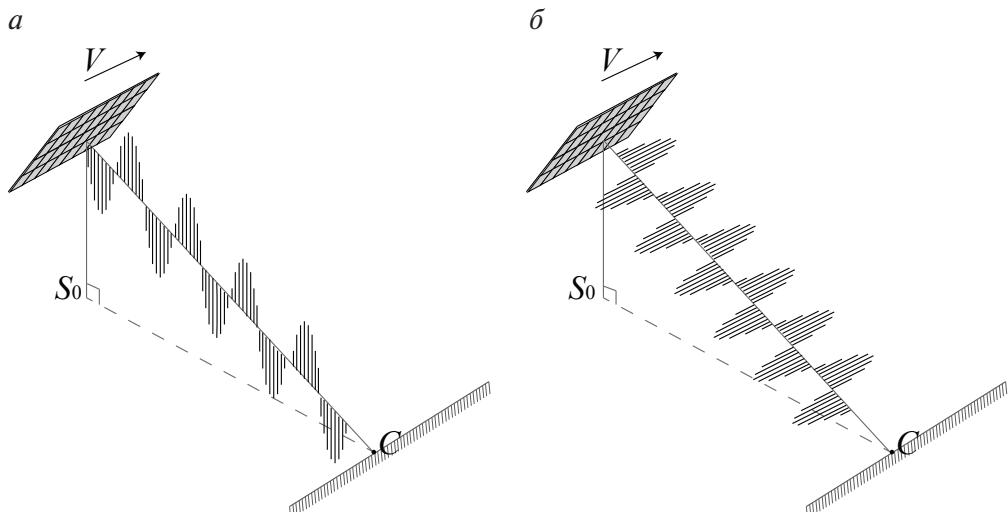


Рис. 2.38. Поляризация излучаемой электромагнитной волны:

a — вертикальная; *б* — горизонтальная; вектор V — направление движения платформы; точка S_0 — положение подспутниковой точки; точка C — положение наблюдаемой цели

Конкретный тип поляризации зондирующего сигнала определяется конструкцией антенны, она же определяет тип поляризации регистрируемой волны. В общем случае в современных радиолокационных системах наблюдения приемные и передающие элементы антенны могут работать независимо друг от друга, т. е. излучать один тип поляризации, а принимать другой. Если радиолокационная система принимает волну того же типа поляризации, что и излучает, то такой режим работы называется режимом согласованной поляризации. В противном случае — режимом кросс-поляризации.

Волны горизонтального типа поляризации принято обозначать буквой Н (в русскоязычной литературе встречается обозначение Г), волны вертикального типа поляризации — буквой V (B). Поскольку за свойства формируемого РЛИ отвечают поляризации как излученного, так и принятого сигналов, при указании типа поляризации конкретного режима съемки некоторой системы мониторинга используется двойное обозначение поляризации (например, VV, HV и др.), где первый символ отвечает за тип поляризации зондирующего импульса, второй символ — за тип поляризации принятого импульса. Такой метод съемки называется режимом одиночной поляризации. Также в более новых системах наблюдения встречается режим двойной поляризации — в этом случае при излучении импульса вертикальной либо горизонтальной поляризации происходит регистрация отраженной волны сразу в двух возможных типах поляризации. При этом один из них всегда будет согласованно-поляризованным, а второй — кросс-поляризованным. Начиная с конца 2000-х гг. стали появляться гражданские системы с возможностью съемки в режиме полного поляризационного базиса. В этом режиме происходит регистрация всех возможных сочетаний типов поляризации. Ниже представлены все общепринятые варианты поляризационных режимов съемки:

- режимы одиночной поляризации:
 - HH — излучается и принимается горизонтальная волна;
 - VV — излучается и принимается вертикальная волна;
 - HV — излучается горизонтальная волна, принимается вертикальная волна;
 - VH — излучается вертикальная волна, принимается горизонтальная волна;
- режимы двойной поляризации:
 - HH + HV — излучается горизонтальная волна, принимаются горизонтальная и вертикальная волны;

- VV + VH — излучается вертикальная волна, принимаются вертикальная и горизонтальная волны;
- HH + VV — излучается горизонтальная и вертикальная волны, принимаются вертикальная и горизонтальная волны;
- полный поляризационный базис:
 - HH+HV+VV+VH — излучаются вертикальная и горизонтальная волны, принимается вертикальная и горизонтальная, а также две кросс-поляризованные волны.

Комбинированные наблюдения при различных поляризациях волны позволяют извлекать принципиально новую информацию, недоступную при наблюдении в одном фиксированном типе поляризации. Например, одновременное использование двух типов поляризации позволяет осуществлять классификацию растительного покрова, поскольку для разных типов растительности эффект поворота плоскости поляризации (эффект Фарадея) выражен в разной степени. Также сочетание горизонтальной и вертикальной типов поляризации дает возможность оценивать высоту лесной растительности за счет того, что кросс-поляризация более подвержена объемному рассеянию в кронах деревьев в сравнении с согласованной поляризацией, и совместное использование таких РЛИ позволяет извлекать высотные и объемные характеристики.

На рис. 2.39 приведены фрагменты изображений одной и той же местности, полученные при различных поляризационных режимах съемки.

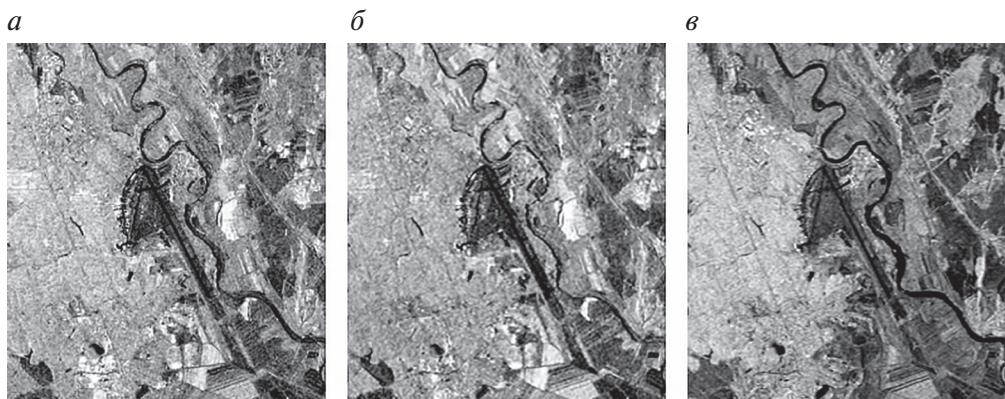


Рис. 2.39. Фрагменты космоснимка, полученного с помощью космического аппарата RADARSAT-2, в различных режимах поляризации:

a — НН; *б* — VV; *в* — HV [30]

Использование различных типов базовой поляризации также удобно для фиксации металлических объектов, обладающих определенной ориентацией в пространстве. С одной стороны, при использовании волн горизонтальной поляризации становятся более контрастными металлические объекты, ориентированные параллельно земной поверхности (трубопроводы, железные дороги, провода линии передач). Более того, в ряде случаев становится возможным наблюдение объектов размером меньше, чем пространственное разрешение, например провода с характерным диаметром, составляющим единицы миллиметров. С другой стороны, волны вертикальной поляризации позволяют более эффективно наблюдать вертикально ориентированные металлические объекты, такие как столбы и опоры. Пример РЛИ с яркими образами линий электропередач (регулярные пятна вдоль вертикальной линии) приведен на рис. 2.40.



Рис. 2.40. Использование вертикальной поляризации для обнаружения линий электропередач (фрагмент космоснимка, полученного с помощью спутника COSMO-SkyMed [18])

2.7. Режимы радиолокационной съемки

Современные радиолокационные станции наблюдения поддерживают, как минимум, три базовых режима съемки: маршрутный, сканирующий (широкозахватный) и прожекторный режимы. Обозначенные режимы различаются технологией излучения зондирующего импульса, а получаемые с их применением РЛИ — пространственным разрешением и шириной полосы обзора.

В маршрутном режиме (рис. 2.41) съемка земной поверхности проводится в пределах фиксированной полосы обзора шириной до нескольких десятков километров, пространственное разрешение при этом составляет от единиц до десятков метров. Такой режим работы современных радиолокационных систем является наиболее естественным. При этом съемка может осуществляться на протяжении неограниченного периода времени, поэтому размер кадра вдоль азимута может быть сколь угодно большим (в реальности ограничен радиусом зоны приема наземной станции).

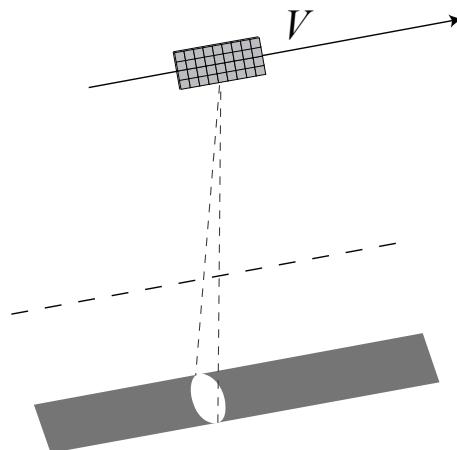


Рис. 2.41. Положение луча излучения антенны при маршрутном режиме съемки

В сканирующем режиме наблюдения формируется широкая полоса обзора за счет последовательного переключения направления зондирующего импульса за одну сессию наблюдения. Ширина полосы обзора при этом достигает нескольких сотен километров, пространственное разрешение достаточно низкое — от десятков до сотен метров, что

обусловлено переходом луча в течение съемочной сессии между полосами дальностей (рис. 2.42) и, как следствие, уменьшением количества накапливаемых импульсов в рамках конкретной полосы. Такой режим чаще всего применяется при решении задач мониторинга ледовой и водной обстановки на обширных территориях (Арктика и Антарктика), где к пространственному разрешению РЛИ не предъявляются высокие требования.

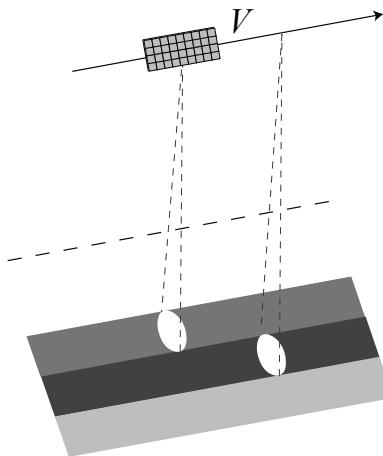


Рис. 2.42. Положение луча излучения антенны при сканирующем режиме съемки

При прожекторном режиме обязательно используется электрическое либо механическое сканирование фазированной антенной решетки вдоль направления азимута. При этом импульс в течение всего времени наблюдения излучается в направлении конкретной цели по мере движения платформы. Такой прием позволяет увеличивать временной интервал визирования цели и соответственно длину синтезированного апертуры в несколько раз. Пространственное разрешение при использовании прожекторного режима может достигать долей метра, размеры кадра при этом, как правило, фиксированы и не превышают 10–20 км. Такой режим применяется в случае необходимости детального анализа местности, в том числе при решении военных и разведывательных задач. Отметим, что прожекторный режим съемки требует более основательной подготовки аппаратуры и управляющего программного обеспечения станции со стороны оператора спутника, поэтому коммерческие заказы на такой тип съемки осуществляются заблаговременно.

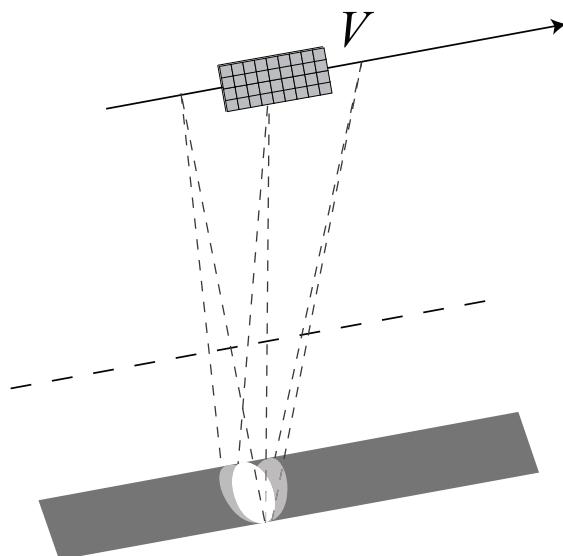


Рис. 2.43. Положение луча излучения антенны при прожекторном режиме съемки

Контрольные вопросы к главе 2

1. Как изменится вид опорной функции в случае применения бистатической системы наблюдения?
2. Как изменится форма пятна засветки при учете кривизны земной поверхности?
3. В современных радиолокационных системах наблюдения в качестве зондирующего импульса используется ЛЧМ-сигнал. Как в таком случае изменится выражение (2.13)?
4. Как влияет количество отсчетов опорной функции на свойства формируемого РЛИ?
5. Как изменится плотность распределения пространственно-распределенной цели на мощностной РЛИ в случае присутствия на ней деталей с сильно отличающимися значениями ЭПР?
6. Как можно улучшить разрешение по азимуту при использовании непрерывного зондирующего импульса?
7. Предложите способ исправления эффекта миграции дальности на РЛИ при использовании технологии синтезирования апертуры.

8. Предложите способ формирования четкого радиолокационного изображения в случае, если величина наклонной дальности известна с точностью до сотен метров.
9. Как организуется работа приемника и передатчика на одну и ту же антенну при применении радиолокатора?
10. Из каких соображений при проектировке радиолокатора с синтезированной апертурой устанавливается величина промежуточной частоты?

3. Основные радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли

За свою шестидесятилетнюю историю мониторинг земной поверхности в радиодиапазоне осуществлялся с использованием более чем сотни авиационных и космических платформ [6]. И если изначально это были устройства, основанные исключительно на принципах бокового обзора, то с течением времени методы совершенствовались, в аппаратах начали использовать когерентное накопление сигнала, а после — технологию синтезирования апертуры (РСА). Постепенно накапливался опыт обработки получаемых данных, а вместе с ним приходило осознание возможных направлений дальнейшего развития и улучшения качества РЛИ. С течением времени улучшалось пространственное разрешение, появились сенсоры, учитывающие поляризацию электромагнитных волн. Менялись и цели использования радиолокационных систем наблюдения — от военных разведывательных задач осуществлялся постепенный переход к гражданским миссиям, таким как мониторинг ледовой обстановки, наблюдения за природными и антропогенными объектами, прогнозирование чрезвычайных ситуаций и оценка последствий их ущерба и многое другое. Использование принципов интерферометрической обработки данных, полученных с различных витков орбиты, привело к появлению быстрого, практически полностью автоматизированного и сравнительно недорогого метода построения трехмерных моделей рельефа, создав альтернативу фотограмметрической стереообработке изображений оптического диапазона. С постепенным повышением пространственного разрешения круг потенциальных гражданских задач расширялся, что стимулировало запуск коммерческих космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В настоящей главе приведены наиболее распространенные коммерческие спутни-

ки ДЗЗ с указанием основных параметров и решаемых с их применением задач.

3.1. Advanced Land Observation Satellite (ALOS)

ALOS (Advanced Land Observation Satellite) — серия японских спутников ДЗЗ [31], включающая два космических аппарата, владельцем которых является Японское аэрокосмическое агентство JAXA. Первый спутник ALOS (ALOS-1) был запущен в январе 2006 г. и прослужил в общей сложности более 5 лет. Второй аппарат серии ALOS-2 был выведен на орбиту в мае 2014 г. и продолжил миссию своего предшественника. На начало 2020-х гг. ALOS-2 — один из немногих коммерческих спутников ДЗЗ (наряду с SAOCOM-1A и SAOCOM-1B [32]), поставляющих радиолокационные изображения в L-диапазоне, что делает его незаменимым при решении ряда специфических задач.

Аппарат ALOS располагался на солнечно-синхронной орбите⁹ высотой 692 км и наклонением¹⁰ 93,2°. В основные задачи спутниковой системы входили круглогодичный и всепогодный мониторинг земной поверхности и океанов, создание и обновление топографических карт масштабом 1:25000 и мельче, контроль использования природных ресурсов, создание высокоточных цифровых моделей рельефа, мониторинг природных катастроф, а также решение различных научных и прикладных задач. В полезную нагрузку ALOS входило три сенсора:

- AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometr);
- PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument of Stereo Mapping);
- PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar).

Сенсор AVNIR-2 представлял собой камеру, осуществлявшую съемку поверхности с полосой захвата до 70 км и пространственным разрешением до 10 м, обеспечивая получение многозональных космо-

⁹Солнечно-синхронная орбита — геоцентрическая орбита с такими параметрами, что объект, находящийся на ней, проходит над любой точкой земной поверхности приблизительно в одно и то же местное солнечное время [11].

¹⁰Наклонение — один из кеплеровских шести элементов орбиты, угол между плоскостью орбиты и базовой плоскостью [11]. Для искусственных спутников Земли в качестве базовой используется плоскость эклиптики.

снимков в четырех спектральных диапазонах (синий, зеленый, красный и ближний инфракрасный каналы). Сенсор PRISM — картографическая стереокамера для формирования триплетов изображений в оптическом диапазоне состояла из трех панхроматических камер, обеспечивающих пространственное разрешение до 2,5 м. Наконец, сенсор PALSAR представлял собой РСА-датчик L-диапазона (рабочая длина волны 23 см), обеспечивающий разрешение на местности до 7 м. Схема космического аппарата с основным оборудованием приведена на рис. 3.1 [33].

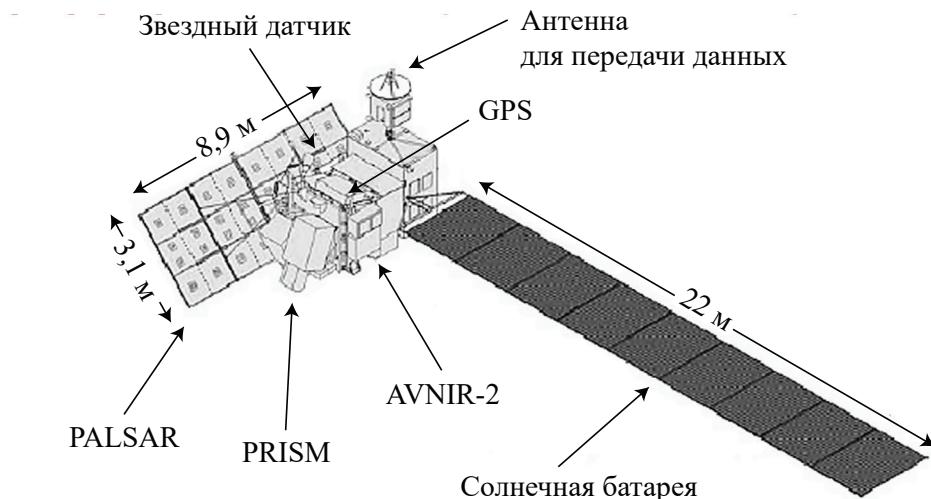


Рис. 3.1. Схематическое изображение космического аппарата ALOS

Рассмотрим характеристики сенсора PALSAR более подробно. Сенсор PALSAR изменял угол визирования от 8 до 60° относительно направления в nadir¹¹ благодаря технологии фазированных антенных решеток с 80 модулями приема (передачи) [34]. PALSAR поддерживал съемку в трех режимах работы:

- детальный (маршрутный) (Fine);
- режим сканирования (ScanSAR);
- поляризационный режим (Polarimetric).

Детальный режим использовался наиболее часто, позволяя получать изображения с пространственным разрешением до 7 м, что

¹¹ Надир — направление, совпадающее с направлением действия силы гравитации для конкретной точки [35].

на время начала работы спутника являлось рекордом среди РСА-систем. Именно этот режим использовался в целях получения данных для последующей интерферометрической обработки. Детальный режим разделялся на два подрежима: в первом (Fine 1) формировались высокодетальные изображения в режиме одиночной поляризации (HH либо VV), во втором (Fine 2) — изображения более низкого пространственного разрешения в режиме двойной поляризации (HH+HV либо VV+VH). С помощью режима ScanSAR осуществлялось наблюдение местности с полосой захвата от 250 до 350 км в низком пространственном разрешении; он предназначался для глобального природного мониторинга. В таком режиме была возможна реализация только одиночной поляризации (HH либо VV). Поляризационный режим на момент разработки аппарата ALOS являлся экспериментальным и использовал как вертикальную, так и горизонтальную поляризации электромагнитных волн, обеспечивая полный поляризационный базис (HH+HV+VH+VV). Формат получаемых данных в зависимости от уровня обработки — CEOS/GeoTIFF, радиометрическое разрешение¹² составляло 5 бит, периодичность съемки — 46 дней. Основные параметры приведенных режимов сенсора PALSAR даны в табл. 3.1 [31].

Таблица 3.1

Основные режимы работы сенсора PALSAR спутника ALOS

Режим	Пространственное разрешение ¹³ , м	Полоса обзора ¹⁴ , км	Угол визирования, °
Fine 1	7	70	8–60
Fine 2	14	70	8–60
ScanSAR	100	350	18–43
Polarimetric	24	65	8–30

На рис. 3.2 представлен фрагмент изображения, полученного с помощью космического аппарата ALOS сенсором PALSAR в детальном режиме съемки Fine 1.

¹² Радиометрическое разрешение — количество градаций значений оттенков серого, соответствующих переходу от яркости абсолютно «черного» к абсолютно «белому», и выражается в количестве бит на пиксел изображения [9].

¹³ Здесь и далее имеется в виду наименьший интервал пространственной дискретизации в направлении азимута.

¹⁴ Здесь и далее имеется в виду наибольшее значение размеров местности под пятном засветки в направлении дальности.



Рис. 3.2. Фрагмент изображения, полученного с помощью датчика PALSAR
(территория села Ачхой-Мартан, Чеченская республика, 2010 г. [9])

Спутник ALOS-2 выведен на солнечно-синхронную орбиту высотой 638 км и наклонением 97,9°. В отличие от своего предшественника, ALOS-2 не оснащен оптическими камерами наблюдения, представляя собой спутник ДЗЗ, выполняющий съемку исключительно в радиодиапазоне. На аппарате установлен РСА-датчик PALSAR-2, являющийся усовершенствованной версией сенсора PALSAR, а также система автоматической идентификации морских судов SPAISE2 и инфракрасная камера CIRC [36]. РСА-датчик ALOS-2 осуществляет наблюдение в трех режимах:

- сверхвысокого разрешения (SpotLight);
- высокого разрешения (StripMap);
- сканирующем режиме (ScanSAR).

В режиме SpotLight, по сути представляющем прожекторный режим, осуществляется съемка с пространственным разрешением до 1 м в режиме одиночной поляризации (HH, HV либо VV). StripMap явля-

ется основным рабочим режимом спутника и разделяется на три подрежима:

- UltraFine;
- High Sensitive;
- Fine.

Режим UltraFine обеспечивает съемку местности с пространственным разрешением до 3 м как в режиме одиночной (HH, HV либо VV), так и в режиме двойной поляризации (HH+HV либо VV+VH). В режиме High Sensitive возможно получение изображений земной поверхности с пространственным разрешением до 6 м в режиме одиночной (HH, HV либо VV) и двойной (HH+HV либо VV+VH) поляризации, а также в полном поляризационном базисе (HH+HV+VH+VV), причем в последнем случае область охвата снимка окажется меньше. Аналогично в режиме Fine возможно получить изображение земной поверхности с пространственным разрешением до 10 м во всех трех режимах поляризации, однако для полного поляризационного базиса охват местности будет меньше. Режим ScanSAR предназначен для получения изображений в низком пространственном разрешении при максимально возможном охвате местности. Различают два подрежима:

- стандартный (Normal);
- расширенный (Wide).

Для обоих режимов возможна как одиночная (HH, HV либо VV), так и двойная (HH+HV либо VV+VH) поляризация. Основные технические характеристики датчика PALSAR-2 приведены в табл. 3.2 [37].

Таблица 3.2

Основные режимы работы сенсора PALSAR-2 спутника ALOS-2

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
SpotLight	1	25	8–70
StripMap (UltraFine)	3	50	8–70
StripMap (High sensitive)	6	50 40 ¹⁵	8–70 20–40
StripMap (Fine)	10	70 30 ¹⁵	8–70 23,7
ScanSAR (N)	100	350	8–70
ScanSAR (W)	60	490	8–70

¹⁵ При съемке в полном поляризационном базисе (HH+HV+VH+VV).

На рис. 3.3 представлен фрагмент изображения, полученного с помощью датчика PALSAR-2, режим съемки Fine.

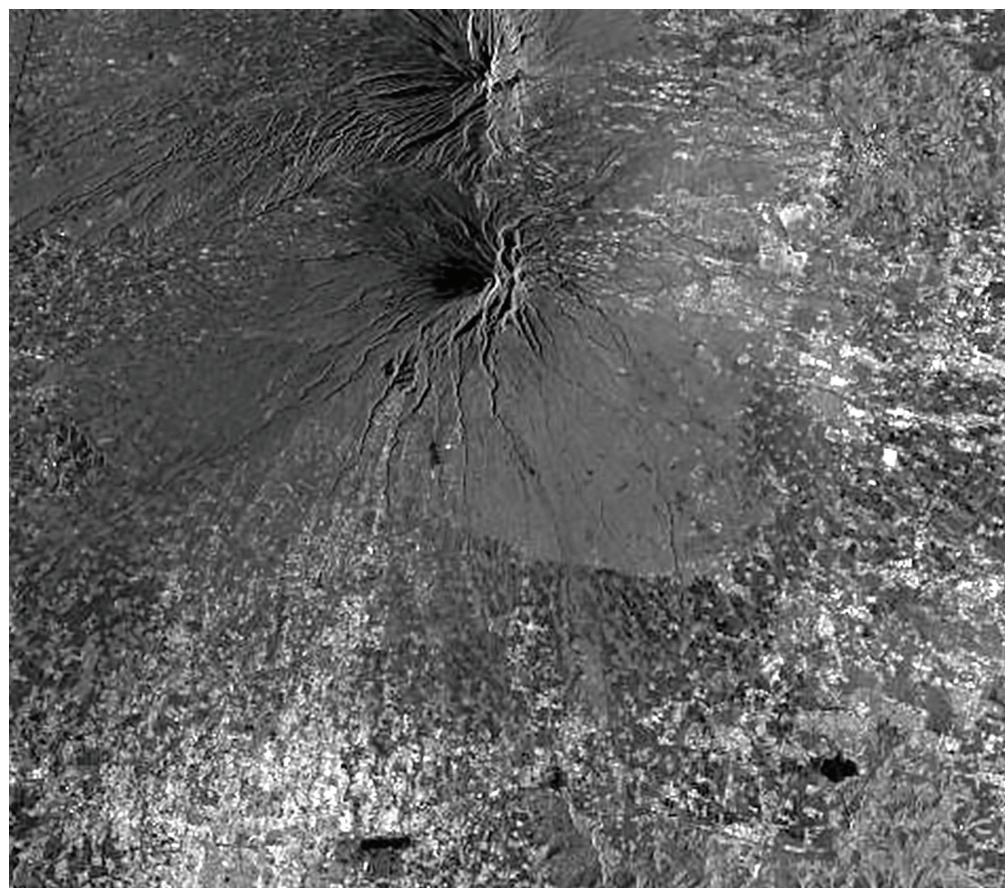


Рис. 3.3. Фрагмент изображения, полученного с помощью датчика PALSAR-2 (вулкан Мерапи, остров Ява, Индонезия, 2014 г. [37])

В конце 2020 г. на орбиту планируется вывести следующий аппарат миссии — ALOS-3 [38]. Спутник будет оснащен оборудованием, предназначенным для мониторинга исключительно в оптическом диапазоне: стереокамерой PRISM-2, обеспечивающей высокодетальную панхроматическую съемку местности с пространственным разрешением 0,8 м и шириной полосы обзора 50 км; мультиспектральным сканером HISUI (Hyperspectral Imager Suite), формирующим изображения в пяти спектральных диапазонах (видимые и ближний инфракрасный) с пространственным разрешением до 5 м.

3.2. Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation (COSMO-SkyMed)

COSMO-SkyMed (Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation, сокращенное название COS) — группировка четырех идентичных итальянских спутников, предназначенных для всепогодного мониторинга земной поверхности в военных и научных целях [18]. Отдельные аппараты принято обозначать как COSMO-SkyMed-1, -2, -3 и -4. В период с июня 2007 г. по ноябрь 2010 г. все четыре спутника были выведены на общую солнечно-синхронную орбиту высотой 619 км и наклонением 97,9°. Среди основных гражданских задач группировки COSMO-SkyMed можно выделить следующие:

- создание и обновление топографических карт масштаба 1:10 000 и мельче;
- получение высокоточных цифровых моделей рельефа¹⁶ (ЦМР);
- непрерывный мониторинг природных и антропогенных объектов;
- прогнозирование землетрясений и извержений вулканов.

Все аппараты созвездия в каждый момент находятся в одной плоскости, при этом возможны два варианта конфигурации спутников на орбите: номинальный и интерференционный [39]. В номинальном режиме все аппараты расположены на равных угловых расстояниях, составляющих 90° (рис. 3.4, а). Благодаря такой конфигурации наблюдения за интересующей областью могут быть проведены до нескольких раз в день, также имеется возможность быстрого реагирования в случаях чрезвычайных ситуаций. Интерферометрический режим используется для получения трехмерных моделей местности, в этом случае два аппарата группировки располагаются на достаточно близком угловом расстоянии (рис. 3.4, б). В такой конфигурации осуществля-

¹⁶ Цифровая модель рельефа — цифровое представление земной поверхности как непрерывного явления, описывающее ее с определенной точностью. Для хранения цифровых моделей рельефа могут использоваться как растровые форматы (представление является регулярным), так и векторные (представление будет нерегулярным). Точность ЦМР принято характеризовать двумя параметрами: точностью плановой привязки, показывающей, насколько хорошо ЦМР соответствует положению в определенной геодезической системе координат, и точностью по высоте, характеризующей степень соответствия полученного продукта реальной картине местности.

ется съемка одной и той же территории с двух спутников с несколько различающихся ракурсов, при этом расстояние между орбитами спутников выступает в роли интерферометрического базиса. Следует иметь в виду, что из-за различных погрешностей (запуск, движение в условиях атмосферы Земли, управление космическим аппаратом и т. д.) орбиты спутников совпадают только в некоторой степени, реально расстояние между ними составляет от сотен метров до единиц километров. Данное расстояние между орбитами и образует интерферометрический базис, что позволяет использовать получаемые данные в задачах измерения рельефа. Последующая обработка полученных изображений позволяет восстановить трехмерную картину местности, а также исследовать ее подвижки. Для ЦМР, получаемых с использованием данных аппаратов COSMO-SkyMed, относительная точность измерения высоты составляет от 3,8 до 76 м в зависимости от режима съемки.

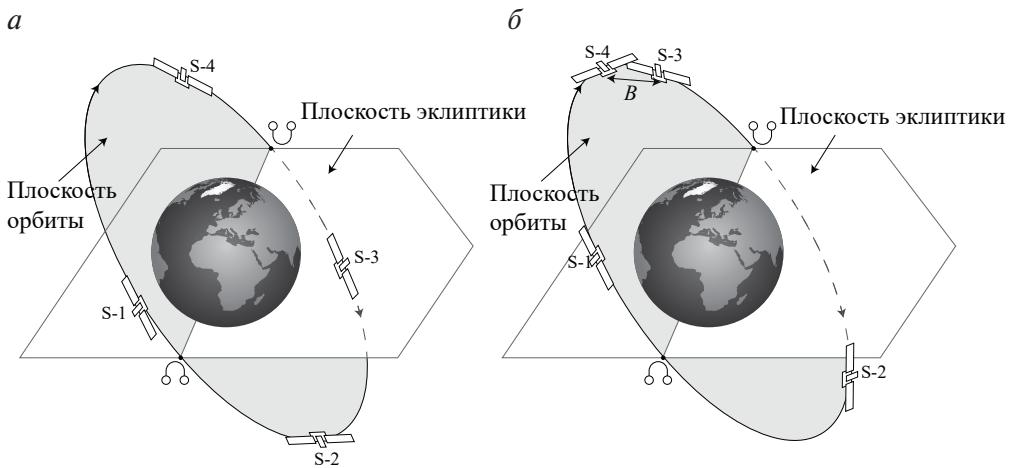


Рис. 3.4. Конфигурация аппаратов группировки COSMO-SkyMed (обозначены как S-1... S-4):

а — номинальный режим; *б* — интерференционный режим (линия *B* — интерферометрический базис съемки; ♂ — восходящий узел орбиты¹⁷; ♀ — нисходящий узел орбиты¹⁸)

Каждый спутник COSMO-SkyMed оснащен РСА-датчиком Х-диапазона (рабочая длина волны 3,1 см); сам сенсор представля-

¹⁷ Восходящий узел орбиты (северный) — точка, в которой движущееся по орбите тело пересекает условную плоскость в северном направлении [22].

¹⁸ Нисходящий узел орбиты (южный) — точка, в которой движущееся по орбите тело пересекает условную плоскость в южном направлении [22].

ет собой фазированную решетку размерами $1,4 \times 5,7$ м [40]. Различают три основных режима работы:

- сверхвысокого разрешения (SpotLight);
- высокого разрешения (StripMap);
- среднего (низкого) разрешения (ScanSAR).

Режим SpotLight (прожекторный режим) предназначен для выполнения съемки сверхвысокого пространственного разрешения. В нем различают два подрежима:

- SpotLight-1, применяющийся только решения для военных задач;
- SpotLight-2, применяющийся в гражданских миссиях.

Съемка осуществляется в одиночной поляризации (HH либо VV). Для режима StripMap (маршрутный режим) возможны две модификации:

- Himage, обеспечивающий съемку в более высокой детализации;
- PingPong, формирующий изображения с пространственным разрешением до 20 м.

Для подрежима Himage возможна только одиночная поляризация (HH, HV, VH либо VV), для PingPong — двойная (HH+VV, HH/HV либо VV+VH). Наконец, режим ScanSAR предназначен для получения изображений местности с максимально широким пространственным охватом. В нем также различают два подрежима:

- Wide с охватом местности 100 км;
- Huge с охватом местности 200 км.

В режиме ScanSAR (сканирующий режим) возможна только одиночная поляризация (HH, HV, VH либо VV). Радиометрическое разрешение данных составляет 8 бит, скорость передачи данных на наземный сегмент — 310 Мбит/с, периодичность съемки в номинальной конфигурации — 10 ч. Основные параметры различных режимов работы сенсоров приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Основные режимы работы РСА-датчиков спутников группировки COSMO-SkyMed

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
SpotLight-2	1	10	20–60
StripMap (Himage)	5	40	18–60
StripMap (PingPong)	20	30	19–59
ScanSAR (Wide)	30	100	18–60
ScanSAR (Huge)	100	200	18–60

На рис. 3.5 приведен фрагмент изображения, полученного одним из аппаратов группировки COSMO-SkyMed в режиме высокого разрешения.

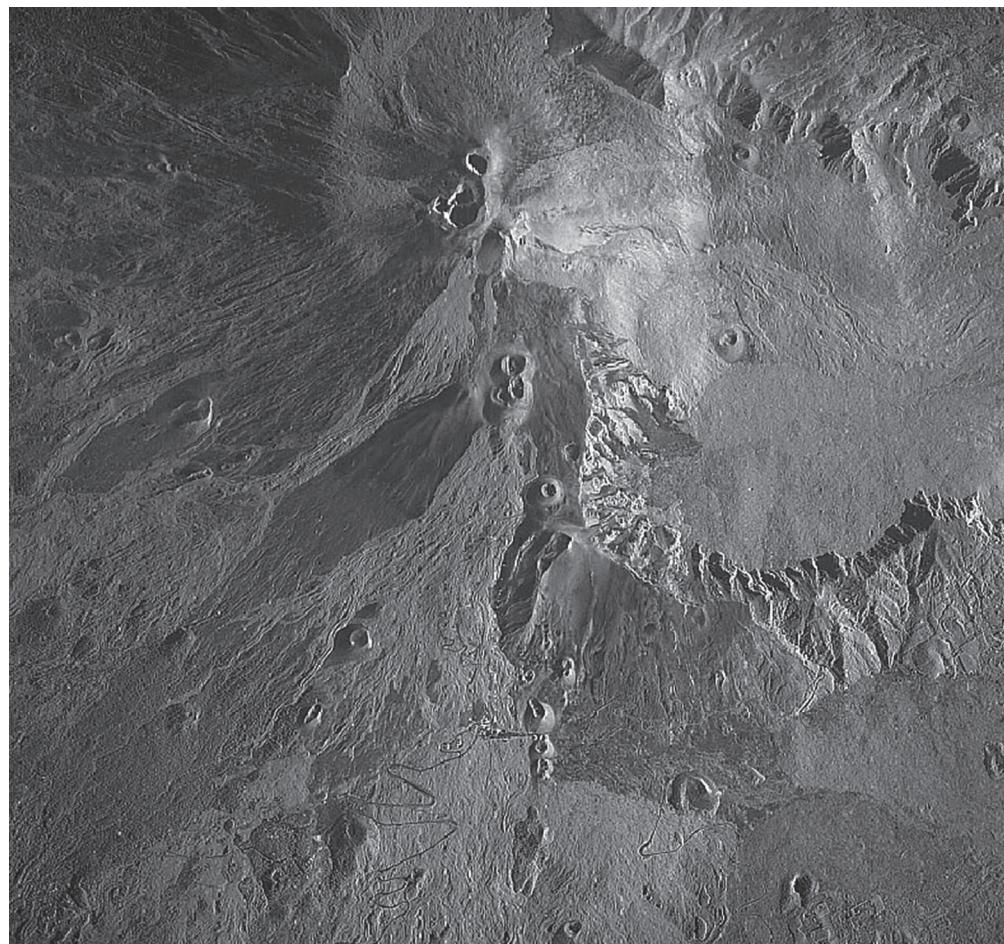


Рис. 3.5. Фрагмент изображения, полученного с помощью спутника COSMO-SkyMed (режим StripMap) (вершины горы Этна, Сицилия [39])

Для задач дополнения и постепенного замещения спутников группировки COSMO-SkyMed Итальянское космическое агентство ведет разработку аппаратов серии COSMO-SkyMed второго поколения — CSG [18]. Основное отличие аппаратов нового поколения заключается в том, что группировка будет состоять только из двух спутников — CSG-1 и CSG-2, целевая аппаратура которых будет представлять собой

улучшенные версии сенсоров спутников первого поколения. Орбита аппаратов второго поколения будет полностью совпадать с уже имеющейся. Запуск CSG-1 осуществлен в декабре 2019 г., запуск CSG-2 осуществлен в октябре 2020 г.

3.3. European Remote-Sensing Satellite (ERS)

ERS (European Remote-Sensing Satellite) — серия из двух космических аппаратов Европейского космического агентства, предназначенных для мониторинга земной поверхности и атмосферы [41]. Спутник ERS-1 был выведен на солнечно-синхронную орбиту в июле 1991 года, прослужив в общей сложности почти 9 лет. Высота орбиты составляла 758 км, наклонение — 98,5°. Несмотря на то что изначально бортовая аппаратура предназначалась для изучения атмосферы и водной поверхности, спустя некоторое время после запуска ERS-1 продемонстрировал свою эффективность в решении задач геологии, картографии и мониторинга растительного покрова. Поэтому через три года после запуска ERS-1 в апреле 1995 г. на ту же самую орбиту был запущен второй спутник серии ERS-2. По большей части этот аппарат был идентичен ERS-1, за исключением одного нового сенсора. Эксплуатация ERS-2 завершилась в сентябре 2011 г.

Рассмотрим более подробно инструменты аппарата ERS-1 [42]. Высотометр RA (Radar Altimeter) представлял собой одночастотный направленный в nadir радиолокатор Ku-диапазона и предназначался для высокоточного измерения уровня морей и океанов, различных параметров ледяного покрова, а также скорости океанических ветров. Прибор ATSR-1 (Along-Track Scanning Radiometer) состоял из четырехканального инфракрасного радиометра и микроволнового излучателя, применялся для измерения температуры водной поверхности, а также температуры и влажности облаков. Наконец, датчик AMI представлял собой PCA-радиолокатор С-диапазона (рабочая длина волны 5,66 см) и предназначался для всепогодного мониторинга земной поверхности, обеспечивая формирование РЛИ с пространственным разрешением до 10 м.

Спутник ERS-2 был оснащен тем же самым оборудованием, что и ERS-1, однако также включал дополнительный инструмент — спек-

трометр ультрафиолетового и видимого диапазона GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) [43], предназначавшийся для глобального мониторинга озонового слоя. Кроме того, совместное использование данных с обоих спутников позволяло решать задачи по обнаружению подвижек рельефа, обеспечивая субмиллиметровую точность согласно спецификации. Основная целевая аппаратура спутника ERS-2 представлена на рис. 3.6.

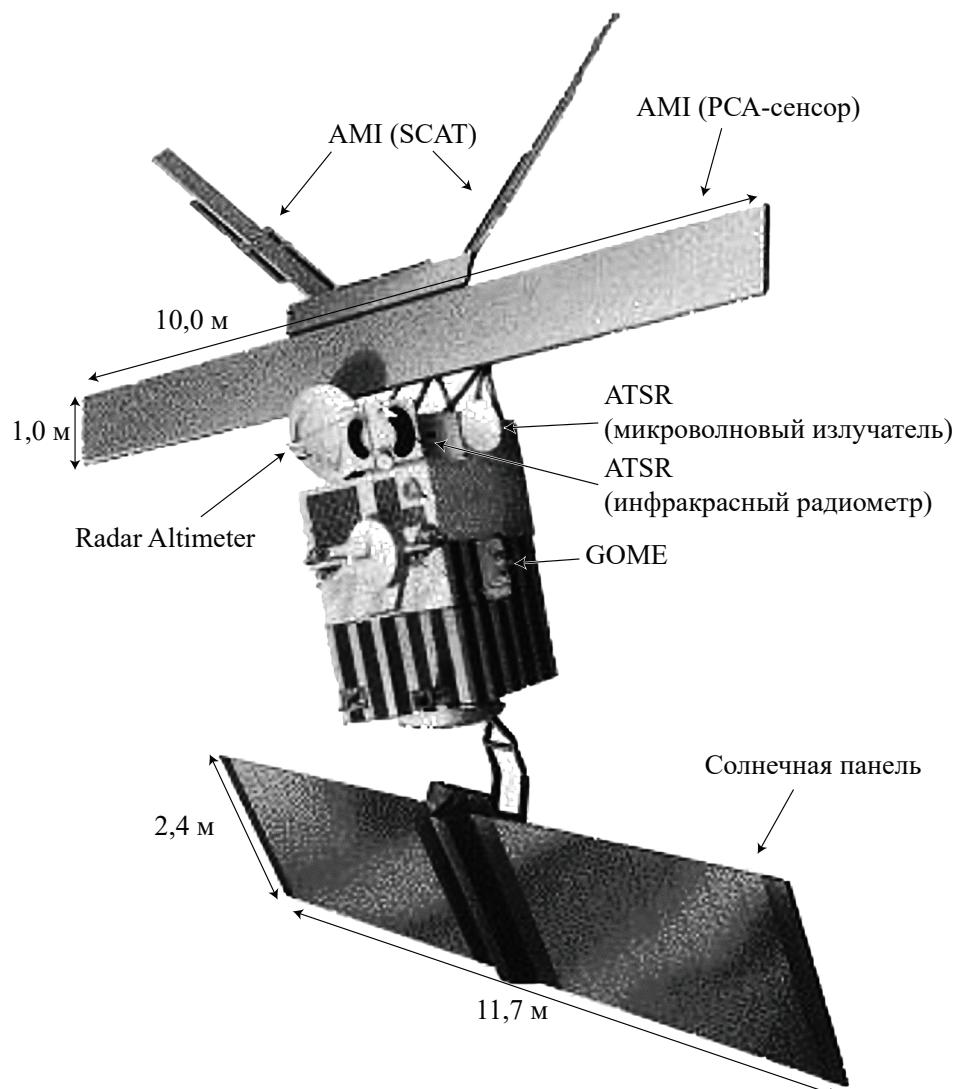


Рис. 3.6. Схематическое изображение космического аппарата ERS-2 [44]

Рассмотрим подробнее инструмент AMI [42]. Фактически он представлял собой два независимых датчика: собственно РСА-сенсор (AMI-SAR), выполнявший работу в двух режимах наблюдения — режиме изображения (Imaging mode) и волновом режиме (Wave Mode), а также радиолокационный рефлектометр (AMI-SCAT), предназначавшийся для сбора информации о скорости и направлении ветров. Режим изображения использовался для формирования РЛИ высокого разрешения (от 10 до 30 м) и предоставлял собой традиционную маршрутную съемку. На рис. 3.7 приведен фрагмент изображения, полученного в данном режиме. Волновой режим датчика предназначался для получения двумерного изображения спектра морских и океанических волн. В этом режиме сенсор осуществлял запись участков поверхности в рамках ширины кадра (5×5 км) с интервалом повторения каждые 200–300 км. Спектральное представление позволяло напрямую извлечь данные о размере волн и их ориентации в пространстве. Первоначально полученные данные использовались при прогнозировании погоды, однако в последствии оказались также применимы для обнаружения таких явлений, как пленки на поверхности, приповерхностные течения и лед. Размер антennы AMI-SAR составлял 10×1 м, радиометрическое разрешение данных — 5 бит. В обоих режимах сенсора использовался только одиночный тип поляризации (VV).

Прибор AMI-SCAT включал в себя три независимые боковые антennы для измерения скорости приповерхностных морских и океанических ветров (рис. 3.8). Принцип работы заключался в фиксации изменений ЭПР водной поверхности, обусловленной появлением ряби определенного типа при наличии ветров. Результаты съемки использовались в качестве опорных модельных данных при решении задач прогнозирования климатических изменений. Точность данных составляла 20° по направлению скорости и 2 м/с по величине скорости. Пространственное разрешение данных SCAT было достаточно низким и составляло 50 км. Следует отметить, что датчики SCAT и SAR не могли работать одновременно. Основные параметры режимов съемки представлены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Основные режимы работы инструмента AMI спутников ERS

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Imaging mode	10	100	23 ¹⁹
Wave Mode	30	5	23
SCAT	5000	500	18–47

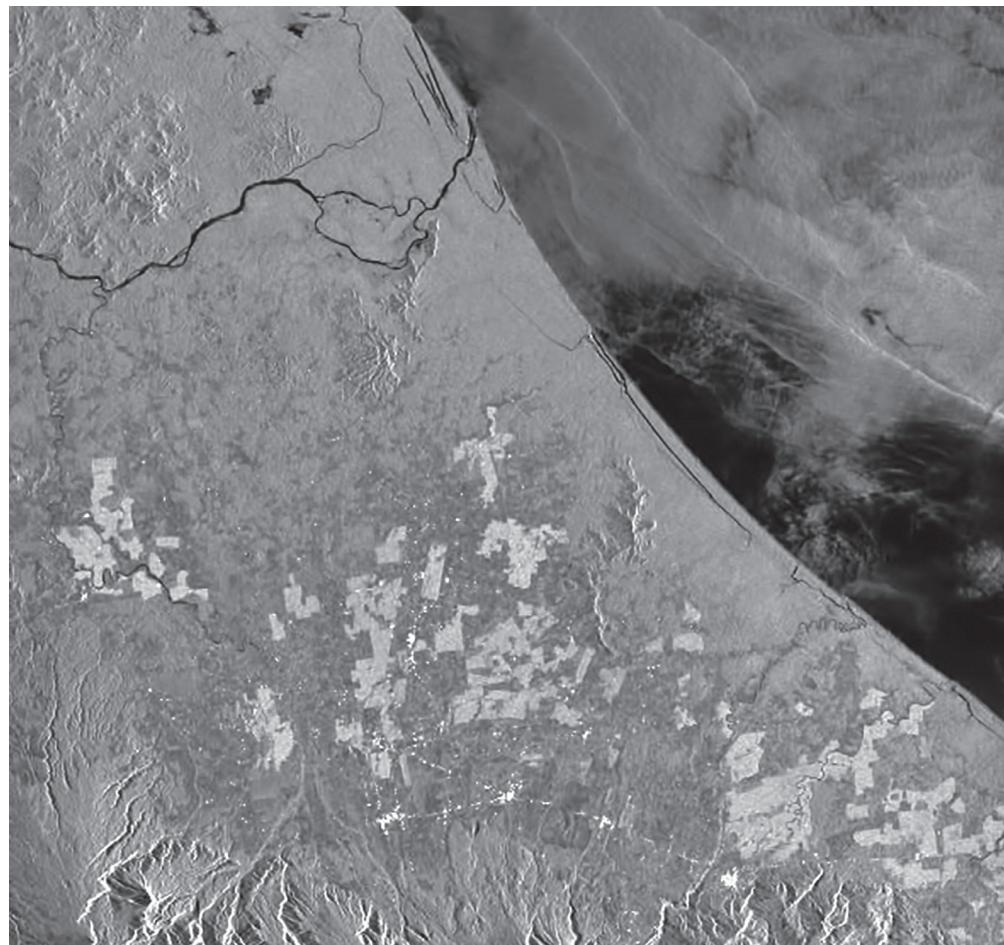


Рис. 3.7. Фрагмент изображения, полученного с помощью сенсора AMI спутника ERS-2 (режим Imaging mode) (атлантическое побережье северной Коста-Рики и южной Никарагуа [43])

¹⁹ После апреля 1992 г. спутник ERS-1 перешел в режим «разворотов и наклонов» (RTM Roll-tilt mode), что позволило увеличить угол визирования до 35°.

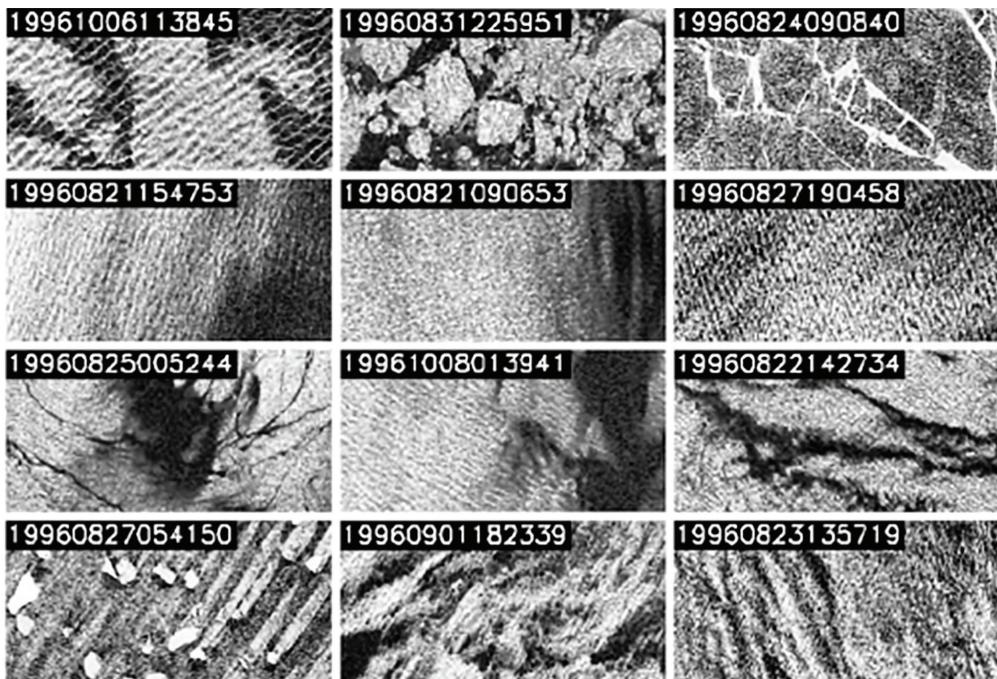


Рис. 3.8. Фрагмент изображений, полученных с помощью сенсора AMI (режим SCAT) (атлантическое побережье северной Коста-Рики и южной Никарагуа [45])

Несмотря на то что спутники ERS-1 и ERS-2 прекратили свою деятельность к началу 2010-х гг., полученные с их помощью данные до сих пор находят широкое применение в различных научных и прикладных областях деятельности. Можно сказать, что миссия ERS положила начало регулярным наблюдениям поверхности Земли из космоса в радиодиапазоне под началом Европейского космического агентства. Наработки, использованные при проектировании аппаратов серии ERS, а также анализ эксплуатационного опыта легли в основу разработки и запуска последующих радиолокационных миссий, предназначенных для мониторинга территории Европы. Некоторые из них будут рассмотрены ниже.

3.4. Envisat

Envisat — спутник Европейского космического агентства, предназначенный для исследования Земли из космоса [46]. По своей сути Envisat являлся преемником миссии спутников серии ERS. Выведен

на солнечно-синхронную полярную орбиту в марте 2002 г., апоцентр²⁰ орбиты составлял 791 км,periцентр²¹ — 785 км, наклонение — 98,6°. Основная миссия аппарата состояла в обеспечении непрерывности полетов европейских спутников Д3З и предоставлении дополнительных данных для выполнения экологических исследований, в частности для исследования химического состава и динамики атмосферы, мониторинга гидрографической обстановки (температура и цвет воды, волны, гидрология), мониторинга сельского и лесного хозяйства, изучения снежных и ледовых покровов, а также создания цифровых моделей рельефа (в тандеме с данными, получаемыми с помощью аппаратов ERS-1, -2) и картографической продукции. В апреле 2012 г. была потеряна связь с космическим аппаратом, после чего Европейское космическое агентство официально объявило о завершении миссии спутника.

На период с 2000 по 2010 гг. Envisat являлся одним из самых крупных спутников Д3З: суммарная масса аппарата составляла более 8000 кг, при этом он был оснащен девятью различными инструментами для мониторинга земной поверхности и атмосферы, включающими в себя спектрометры MERIS, MIPAS и SCIAMACHY, сенсоры AATSR и GOMOS, радарный высотомер RA-2, радиометр MWR, систему слежения DORIS и PCA-датчик ASAR [46] (рис. 3.9). Спектрометр MERIS (MEdium Resolution Imaging Spectrometer) предназначался для выполнения съемки водной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (длины волн от 390 до 1040 нм). Основная задача заключалась в мониторинге цвета воды океанов в целях последующего анализа ее химического состава. Сенсор AATSR (Advanced Along Track Scanning Radiometer) представлял собой улучшенную версию инструментов ATSR космических аппаратов миссии ERS и использовался для измерения температуры морской поверхности с точностью до 0,3 К. Полученные данные в основном использовались в качестве опорных при прогнозировании климатических измерений. Также среди вторичных задач сенсора следует отметить мониторинг состава и динамики растительности. Радар RA-2 (Radar Altimeter 2) осуществлял надирные наблюдения в Ku- и S-диапазонах и преиму-

²⁰ Апоцентр — наиболее удаленная от центрального тела точка орбиты небесного тела [11].

²¹ Перицентр — ближайшая к центральному телу точка орбиты небесного тела [11].

щественно применялся для изучения океанического рельефа, также осуществлял наблюдения за ледовым покрытием.

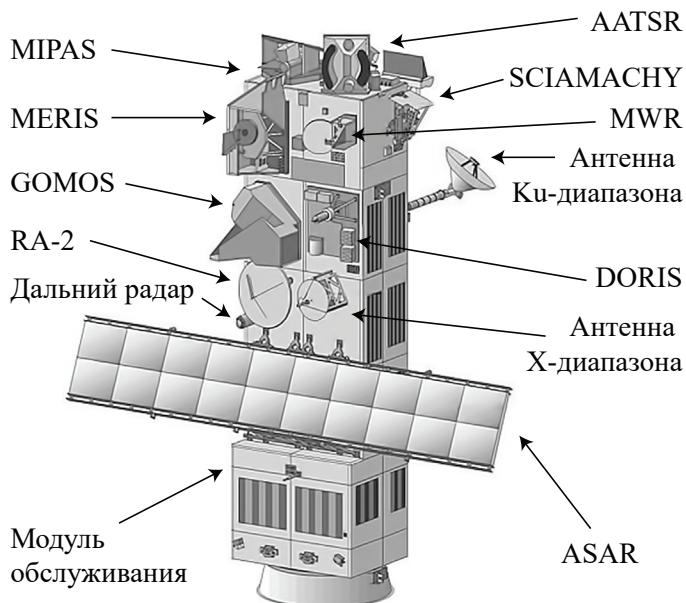


Рис. 3.9. Схематическое изображение целевой аппаратуры спутника Envisat [48]

Радиометр MWR (Microwave Radiometer) предназначался для измерения процентного содержания водяного пара в атмосфере. Микроволновая следящая система DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) выполняла задачу по позиционированию спутника на орбите, при этом заявленная точность определения координат составляла 10 см. Сенсор GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) осуществлял наблюдение за изображениями звезд через толщу высоких слоев атмосферы²². Сравнивая цвет полученных образов с эталонными изображениями, можно было сделать выводы о процентном соотношении и пространственном распределении различных атмосферных компонент. Фурье-спектрометр среднего инфракрасного диапазона MIPAS (Michelson Interferometer

²² Обозначенный метод измерения основан на приеме покрытия — явления, во время которого, с точки зрения наблюдателя из определенной точки, одно небесное тело проходит перед другим небесным телом, заслоняя его полностью или частично [47].

for Passive Atmospheric Sounding) применялся для измерения давления и температуры различных соединений (диоксид азота NO_2 , закись азота N_2O , метан CH_4 , азотная кислота HNO_3 , озон O_3) в стратосфере. Спектрометр SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartographY) применялся для построения карт распределения различных газов и аэрозолей в тропо- и стратосфере. Наконец, ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) представлял собой РСА-датчик С-диапазона (рабочая длина волны 5,6 см).

Сенсор ASAR осуществлял съемку в пяти различных режимах:

- режим изображения (Image Mode);
- режим переменной поляризации (Alternating Polarisation);
- полосовой режим (Wide Swath);
- режим глобального мониторинга (Global Monitoring);
- волновой режим (Wave Mode).

Режим изображения использовался для получения РЛИ высокого пространственного разрешения (до 30 м) и являлся наиболее часто используемым для спутника Envisat. Полосовой режим по сути был сканирующим с возможностью получения изображения среднего пространственного разрешения с полосой обзора до 405 км. В режиме глобального мониторинга осуществлялось формирование изображений низкого разрешения (1 км), применяющихся для решения задач наблюдения ледовой и водной поверхности, лесных вырубок, а также анализа влажности почв. Волновой режим представлял собой прожекторный режим съемки, формирование данных происходило с интервалом между кадрами 100 км, а пространственное разрешение составляло до 10 м. Режим переменной поляризации позволял получать изображения земной поверхности в двойной поляризации ($\text{HH} + \text{VV}$, $\text{HH} + \text{HV}$, $\text{VV} + \text{VH}$). Остальные четыре режима позволяли осуществлять съемку только в режиме одиночной поляризации (HH либо VV). Скорость передачи всех данных составляла 100 Мбит/с, радиометрическое разрешение 8 бит, периодичность съемки от 2,5 до 35 дней [49]. Технические параметры режимов работы сенсора приведены в табл. 3.5. На рис. 3.10 приведен фрагмент изображения, полученного с помощью датчика ASAR космического аппарата Envisat в режиме изображения.

Таблица 3.5

Основные режимы работы сенсора ASAR спутника Envisat

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Image Mode	30	105	15–45
Wave Mode	10	10	15–45
Global Monitoring	1000	1000	17–42
Wide Swath	150	405	17–42
Alternating Polarisation	30	105	15–45

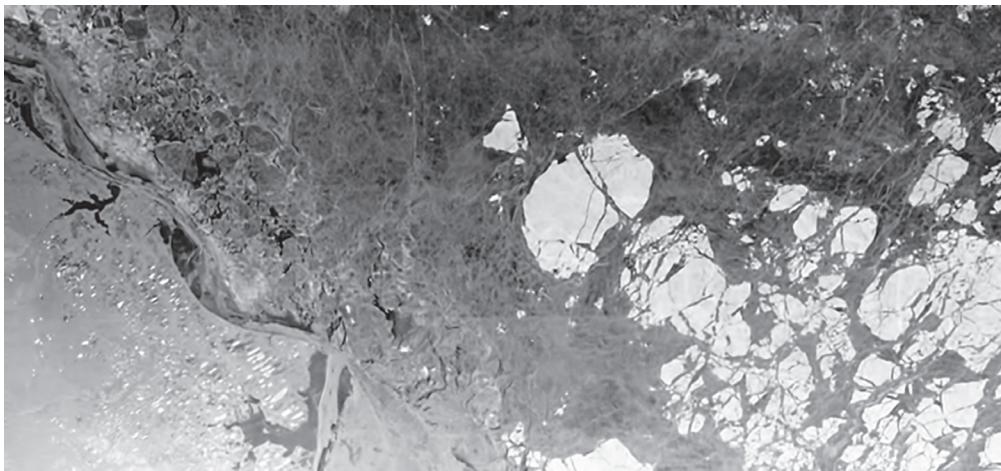


Рис. 3.10. Фрагмент изображения, полученного с помощью сенсора ASAR спутника Envisat (северный берег Аляски (нижний левый угол) и морской лед в море Бофорта [50])

3.5. RADARSAT

RADARSAT — канадская программа спутников ДЗЗ, разработанная для мониторинга земной поверхности в радиодиапазоне, а также решения задач наблюдения за климатом. Владельцем аппаратов является Канадское космическое агентство. Первый из спутников программы RADARSAT-1 был выведен на солнечно-синхронную орбиту (апоцентр 821 км,periцентр 793 км, наклонение 98,6°) в ноябре

1995 г. [28]. В последствии было установлено, что данные космического аппарата могут быть применимы во многих научных и практических отраслях, таких как контроль качества агрокультур, мониторинг гидрографической и ледовой обстановок, растительности, также получаемые РЛИ нашли широкое применение в картографии, океанологии и геологии. Основным инструментом RADARSAT-1 являлся PCA-сенсор С-диапазона (рабочая длина волн 5,6 см), обеспечивающий получение изображений с пространственным разрешением до 8 м. Следует отметить, что на момент запуска спутника обозначенный сенсор был первым, поддерживающим возможность изменения угла визирования за счет использования антенных фазированных решеток. RADARSAT-1 прекратил передачу данных в марте 2013 г., прослужив в общей сложности более 17 лет.

Следующим аппаратом миссии становится RADARSAT-2, выведенный на ту же орбиту в декабре 2007 г. [28] и продолжающий сбор данных по настоящее время. Характеристики PCA-сенсора второго спутника миссии во многом превосходят параметры своего предшественника, в том числе обеспечивают более высокое пространственное разрешение РЛИ (до 3 м) и возможность выбора типа поляризации импульса. Кроме того, на аппарате реализована возможность съемки областей как с левой, так и с правой стороны относительно траектории полета, что позволяет увеличить временное разрешение поставляемых данных. Применение его снимков включает картирование морских льдов и геологических пород, наблюдение за сельскохозяйственными культурами, контроль загрязнений окружающей среды и береговую охрану территории Канады.

Наконец, группировка RADARSAT Constellation Mission (RCM) представляет собой систему из трех идентичных спутников, продолжающих задачи аппаратов более ранних поколений, а также предлагающих широкий спектр всевозможных задач практического использования за счет уменьшения интервалов между съемками [51]. В перспективе планируется увеличить количество аппаратов до шести. Спутники выведены на общую солнечно-синхронную орбиту в июне 2019 г., высота орбиты составила 600 км, наклонение 97,74°. Угловое расстояние между аппаратами одинаковое и составляет 120° (рис. 3.11).

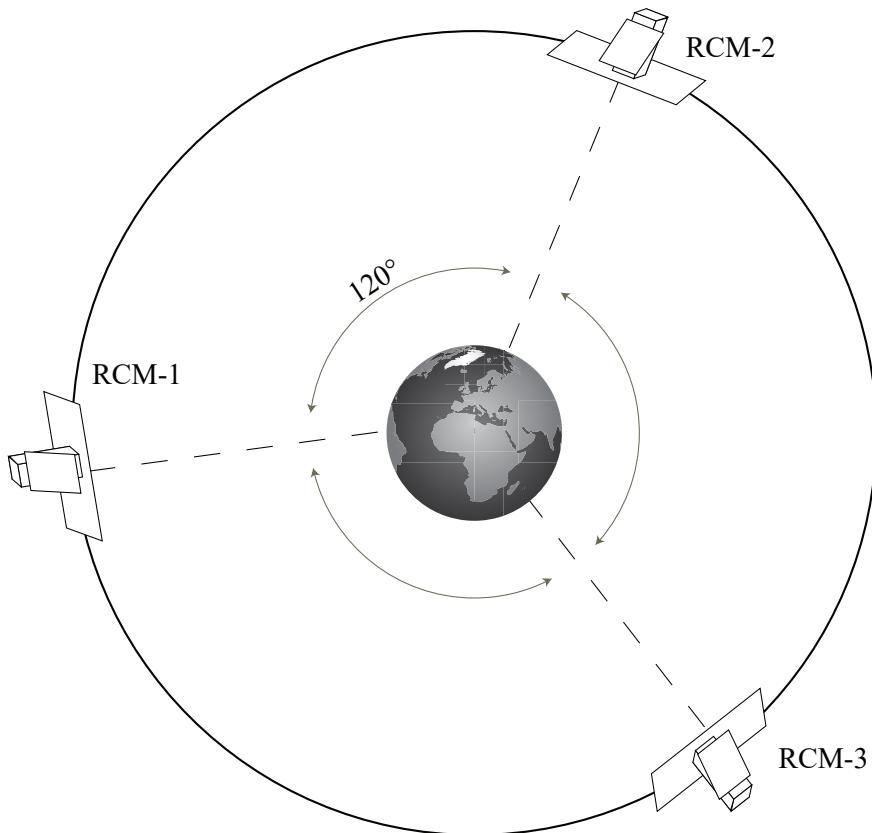


Рис. 3.11. Орбитальная конфигурация аппаратов группировки RCM

Благодаря такой конфигурации на орбите использование RCM позволяет просматривать до 90 % земной поверхности с периодичностью в один день, за счет чего заказчики могут получать необходимую информацию практически в реальном режиме времени. Дополнительно к PCA-датчику каждый из аппаратов оснащен автоматической системой идентификации судов (AIS), которая может использоваться параллельно с основным сенсором. Сравнительные характеристики аппаратов миссии RADARSAT приведены в табл. 3.6 [51].

Рассмотрим более подробно сенсоры спутников миссии RADARSAT. PCA-датчик космического аппарата RADARSAT-1 осуществлял съемку с использованием только одиночного типа поляризации (НН), при этом угол визирования изменялся в пределах от 10 до 59° с правой стороны относительно траектории движения спутника.

Таблица 3.6

Сравнительные характеристики аппаратов миссии RADARSAT

Параметр	RADARSAT-1	RADARSAT-2	RCM
Дата запуска	4.11.1995	14.12.2007	12.06.2019
Полное покрытие	2–3 дня	2–3 дня	Ежедневное
Масса, кг	2750	2200	1400 (каждый аппарат)
Размеры антенны, м	15×1,5	15×1,5	6,75×1,38
Размеры солнечных панелей, м	2,21×1,32 (две панели)	3,73×1,8 (две панели)	2,21,7 (одна панель)
Направление обзора	Правый	Правый и левый	Правый
Поляризация	Одиночная (HH)	Одиночная, двойная, полный базис	Одиночная, двойная, полный базис
Средняя высота, км	800	800	600

Принято различать пять основных режимов работы сенсора:

- маршрутный (Fine);
- маршрутный с накоплением (Standart);
- маршрутный широкозахватный (Wide);
- маршрутный с увеличенным углом визирования (Extended);
- сканирующий (ScanSAR) [52].

Режим работы Fine представлял собой режим по умолчанию и обеспечивал формирование РЛИ с пространственным разрешением до 8 м. Маршрутный режим с накоплением отличался от режима Fine тем, что в нем применялось накопление сигнала, что позволяло уменьшить спекл-шум на итоговом изображении. Широкозахватный маршрутный режим подразделялся на два подрежима: Wide 1 и Wide 2, которые отличались углами визирования и, как следствие, шириной полосы обзора. Маршрутный режим с увеличенным углом визирования также подразделялся на два подрежима — Extended High и Extended Low, позволяющих осуществлять наблюдения на экстремально больших (High) и экстремально малых (Low) углах визирования. В сканирующем режиме также принято различать два подрежима — сканирующий широкий (Wide) и сканирующий узкий (Narrow) режимы съемки. Отличие между ними заключалось в различной ширине полосы обзора приблизительно в два раза (3:5) и соответственно в различном пространственном разрешении (1:2). Основные технические характеристики режимов съемки приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7

Основные режимы съемки PCA-сенсора спутника RADARSAT-1

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Fine	8	45	37–48
Standard	25	100	20–49
Extended High	25	75	50–60
Extended Low	25	170	10–23
Wide 1	30	165	20–31
Wide 2	30	150	31–39
ScanSAR Narrow	50	305	20–40
ScanSAR Wide	100	510	20–49

Данные космического аппарата RADARSAT-1 нашли широкое применение в самых разных отраслях науки и техники, в том числе использовались в проекте АММ [28], результатом работы которого стало создание изображения высокого разрешения (25 м) территории Антарктики. Полученный продукт содержит детальную информацию о морфологии ледяного покрова, выхода пород, информацию о береговой линии и прочие характеристики, которые до сих пор используются в качестве опорных для оценки изменений полярного ледяного покрова (рис. 3.12).

Как отмечалось выше, сенсор спутника RADARSAT-2 отличается большей гибкостью в управлении углом визирования (и соответственно большей полосой обзора) и возможностью выбора режима поляризации [53]. Помимо режимов съемки, имеющихся у аппарата RADARSAT-1 (табл. 3.7), RADARSAT-2 обеспечивает съемку в двенадцати принципиально новых режимах:

- сверхвысокого разрешения (SpotLight A);
- детальный маршрутный (Ultra Fine);
- широкозахватный детальный маршрутный (Wide Ultra Fine);
- маршрутный с накоплением (Multi-look Fine);
- широкозахватный маршрутный с накоплением (Wide Multi-look Fine);
- улучшенный маршрутный (Extra Fine);
- широкозахватный маршрутный (Wide Fine);
- широкозахватный маршрутный с полным поляризационным базисом (Wide Fine Quad);

- стандартный маршрутный с полным поляризационным базисом (Standard Quad);
- широкозахватный стандартный маршрутный с полным поляризационным базисом (Wide Standard Quad);
- режим наблюдения за океаном (Ocean Surveillance);
- режим обнаружения кораблей (Ship Detection) [54].

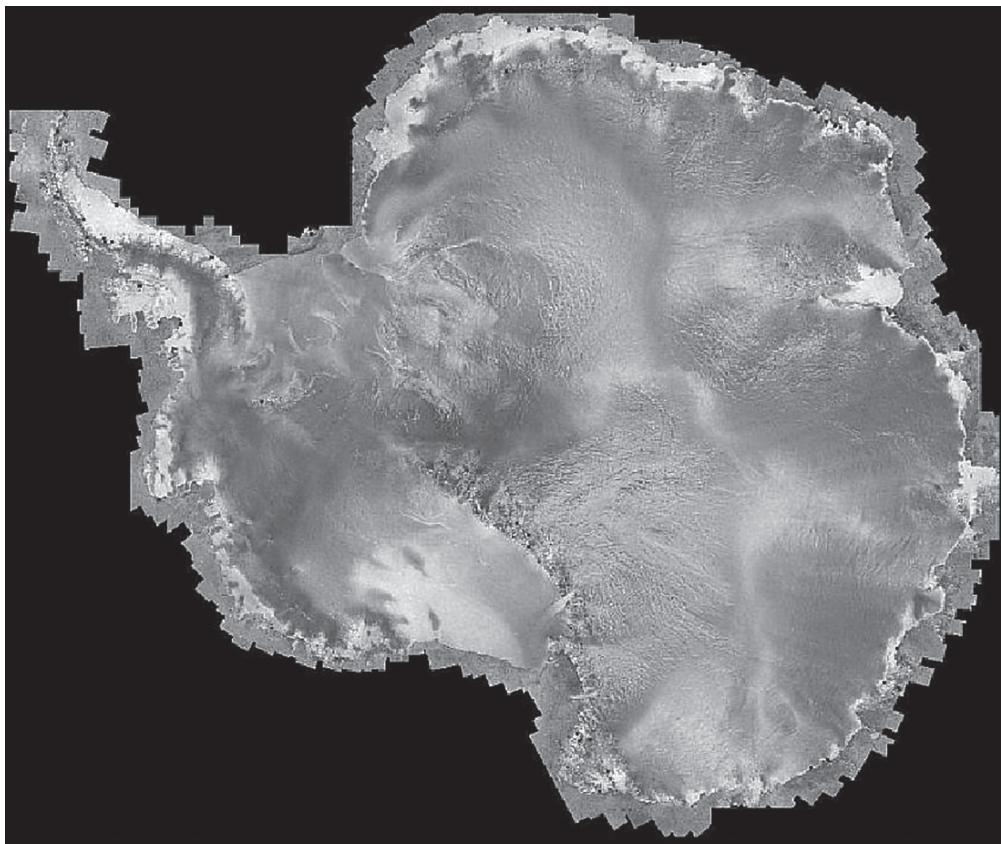


Рис. 3.12. Изображение территории Антарктики, составленного по более чем 8000 космоснимков аппарата RADARSAT-1 (маршрутные съемки) [28]

Режим сверхвысокого разрешения представляет собой прожекторный режим съемки, обеспечивающий формирование РЛИ с пространственным разрешением до 1,5 м. В данном режиме доступна только одиночная поляризация (HH, VV, HV либо VH). Фрагмент изображения земной поверхности, полученного в этом режиме, приведен на рис. 3.13.



Рис. 3.13. Фрагмент изображения, полученного с помощью РСА-датчика RADARSAT-2 (прожекторный режим съемки) [28]

Еще девять новых режимов представляют собой различные модификации маршрутного режима. С использованием стандартного маршрутного режима съемки (Standart) можно получить космоснимки с пространственным разрешением до 15 м, тогда как маршрутный режим (Fine) позволяет сформировать изображения с пространственным разрешением до 6,5 м, но с меньшей полосой обзора (100 км против 50 км). В детальном маршрутном режиме возможно получение изображений с пространственным разрешением до 3 м, широкозахватный детальный маршрутный режим обеспечивает формирование РЛИ с такими же параметрами, но в увеличенной (до 50 км) полосе обзора. Для обоих режимов доступна только одиночная поляризация (HH, VV, HV либо VH). Фрагмент изображения, полученный в детальном маршрутном режиме, показан на рис. 3.14.



Рис. 3.14. Фрагмент изображения, полученного с помощью РСА-датчика RADARSAT-2 (детальный маршрутный режим) [28]

Маршрутный режим съемки с накоплением позволяет достичь снижения шума на изображении без потери в пространственном разрешении, составляющем 5 м. Следовательно, широкозахватный маршрутный режим съемки с накоплением позволяет получить РЛИ того же качества, но с увеличенной (до 90 км) полосой обзора. Съемка в обоих режимах осуществляется только в режиме одиночной поляризации (HH, VV, HV либо VH). Улучшенный маршрутный режим позволяет получать изображения с полосой охвата, как и в широкозахватном маршрутом режиме (до 160 км), но в более высоком пространственном разрешении (до 5 м). В то же время в широкозахватном маршрутном режиме формируются изображения с пространственным разрешением 8 м как в одиночной (HH, VV, HV либо VH), так и в двойной (HH+HV либо VV+VH) поляризации. Также использование двойной поляризации возможно при съемке в маршрутном, маршрутном с накоплением, широкозахватном и широкозахватном маршрутном

режимах. Маршрутные режимы с отметкой Quad (широкозахватный маршрутный, маршрутный с накоплением и расширенный маршрутный с накоплением) позволяют получать РЛИ в полном поляризационном базисе (HH+VV+HV+VH).

Режимы наблюдения за океаном и обнаружения кораблей относятся к сканирующему типу съемки и предназначены для фиксации образов кораблей на обширных водных поверхностях. Из-за специфики процедуры обнаружения морских судов для обоих режимов применяется усиленное сжатие по азимуту в ближних каналах дальности и подавление шумов на больших наклонных дальностях. При съемке в режиме обнаружения кораблей осуществляется самая высокая степень сжатия данных из возможных, поэтому для формируемых РЛИ характерен высокий уровень шума, благодаря анализу которого становится возможным определить небольшие суда в рамках существенной площади кадра. В этом режиме возможно осуществлять съемку во всех режимах одиночной поляризации (HH, VV, HV либо VH), однако ввиду преимущественно горизонтальной ориентации судов в пространстве предпочтительным является тип поляризации HH (см. главу 2). Пространственное разрешение формируемых изображений составляет 30 м. Режим наблюдения за океаном подобен режиму обнаружения кораблей, однако в этом случае соблюдается баланс между эффективностью поиска целей и шумовыми компонентами для возможности применения получаемых данных в иных практических приложениях. В данном режиме возможно применение как одиночной (HH, VV, HV либо VH), так и двойной (HH+HV либо VV+VH) поляризации импульса. При решении задач обнаружения морских судов на водной поверхности предпочтительнее использовать двойную поляризацию типа (HH+HV), тогда как для задач по определению параметров приповерхностных ветров и обнаружению нефти на поверхности воды более полезной оказывается поляризация типа (VV+VH). Для режима обнаружения кораблей и режима наблюдения за океаном характерна максимально широкая полоса охвата (до 510 км). Следует отметить, что РСА-датчик спутника RADARSAT-2 обеспечивает съемку в сканирующем широком и сканирующем узком режимах работы как в одиночной (HH, VV, HV либо VH), так и в двойной (HH+HV либо VV+VH) поляризации (рис. 3.15).



Рис. 3.15. Фрагмент изображения, полученного с помощью РСА-датчика RADARSAT-2 (режим обнаружения кораблей) [28]

В табл. 3.8 приведены основные параметры режимов съемки аппарата RADARSAT-2.

Таблица 3.8

Режимы съемки РСА-сенсора спутника RADARSAT-2

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
SpotLight A	1,5	18	20–50
Ultra Fine	3	20	30–50
Wide Ultra Fine	3	50	30–50
Multi-look Fine	5	50	29–50
Wide Multi-look Fine	5	90	29–50
Extra Fine	5	160	22–49
Fine	6,5	50	30–50
Fine Quad	8	25	18–49
Wide Fine	8	160	20–45
Wide Fine Quad	9	50	18–42
Wide	10	170	18–45
Extended High	10	80	49–60
Standard Quad	12	25	18–49

Окончание табл. 3.8

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Wide Standard Quad	12	50	18–42
Standart	15	100	20–52
Extended Low	15	170	10–23
Ship Detection	35	510	35–56
ScanSAR Narrow	50	305	20–47
Ocean Surveillance	50	510	20–50
ScanSAR Wide	100	510	20–49

Наконец, спутники группировки RCM являются продолжением миссии RADARSAT, дополняя и расширяя возможности своих предшественников за счет сокращения времени между съемками одной и той же местности. Полезная нагрузка каждого из аппаратов состоит из идентичных PCA-датчиков, интегрированных автоматизированной системой идентификации судов (AIS) [55]. Каждый из сенсоров осуществляет съемку в восьми режимах работы:

- сверхвысокого разрешения (Spotlight);
- высокого разрешения (High Resolution);
- очень высокого разрешения (Very High Resolution);
- полного поляризационного базиса (Quad-Polarization);
- среднего разрешения (Medium Resolution);
- низкого разрешения (Low Resolution);
- низкошумного (Low Noise);
- обнаружения кораблей (Ship Detection).

Режим сверхвысокого разрешения является прожекторным и обеспечивает фиксацию земной поверхности с детализацией до 1 м. Режимы высокого разрешения, очень высокого разрешения и полного поляризационного базиса представляют собой вариации маршрутного режима, обеспечивающие формирование РЛИ с пространственным разрешением от 3 до 9 м, причем режим Quad-Polarization осуществляется съемку в полном поляризационном базисе. Режим среднего разрешения подразделяется на три подрежима, обеспечивающих пространственное разрешение изображений, равное 16, 30 и 50 м. Первые два подрежима по технической реализации относятся к маршрутному режиму съемки, тогда как последний — к сканирующему. Также к сканирующему режиму съемки относятся режимы низкого разрешения, об-

наружения кораблей и низкошумный режим. Как и для РСА-датчика аппарата RADARSAT-2, для режима обнаружения кораблей характерно максимальное увеличение амплитуды отклика от цели по отношению к фоновому шуму, включающему две разные составляющие: тепловой шум и помехи, вызванные возмущением водной поверхности. При съемке местности в низкошумном режиме используется несколько более широкая диаграмма направленности по сравнению с прочими сканирующими режимами, что позволяет осуществить накопление сигнала при сохранении величины пространственного разрешения. Данные, полученные в этом режиме, находят широкое применение при решении задач мониторинга нефти и льда на водной поверхности [56]. Фрагмент изображения, полученного в низкошумном режиме, приведен на рис. 3.16. Для всех указанных режимов, за исключением сверхвысокого разрешения, низкошумного и обнаружения кораблей, возможна съемка не только в одиночной (HH, VV, HV либо VH), но и в двойной (HH + HV, VV + VH либо HH + VV) поляризации, тогда как для отмеченных режимов в случае применения двойной поляризации возможно только использование комбинаций поляризации волны HH + HV либо VV + VH. Основные параметры режимов съемки аппаратов RCM представлены в табл. 3.9.



Рис. 3.16. Фрагмент изображения, полученного с помощью группировки спутников RCM (низкошумный режим, изображение морского льда в проливе Дэвиса и побережье острова Баффин, Нунавут, июнь 2019 г. [51])

Таблица 3.9

Режимы съемки РСА-сенсоров спутников группировки RCM

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Spotlight	1	20	19–54
Very High Resolution	3	20	18–54
High Resolution	5	30	19–54
Quad-Polarization	9	20	19–54
Medium Resolution 1	16	30	20–47
Medium Resolution 2	30	125	21–47
Medium Resolution 3	50	350	19–58
Low Resolution	100	500	19–54
Low Noise	100	350	19–58
Ship Detection	25	600	35–56

3.6. Sentinel

Sentinel — семейство спутников дистанционного зондирования Земли Европейского космического агентства, предназначенных для контроля над землепользованием, мониторинга растительности и водных ресурсов. Также данные аппаратов применяются в операциях по ликвидации последствий стихийных бедствий. Первая миссия Sentinel-1 состоит из двух аппаратов, обозначаемых как Sentinel-1A и Sentinel-1B, расположенных на общей солнечно-синхронной орбите высотой 693 км и наклонением 98,2° в противоположных орбитальных точках [57]. Спутник Sentinel-1A запущен в апреле 2014 г., Sentinel-1B — в апреле 2016 г. Данные миссии Sentinel-1 находят широкое применение в решении самых разных задач, в частности регулярные наблюдения моря и суши, мониторинг последствий природных бедствий, оценка влажности почвы, а также имеют различные экономические приложения. Оба аппарата оснащены РСА-датчиком С-диапазона (рабочая длина волны 5,6 см) правого бокового обзора, представляющего собой фазированную antennную решетку. В настоящее время ведутся работы над продолжением миссии в виде аппаратов Sentinel-1C и Sentinel-1D, даты запуска которых пока не определены.

Каждый из сенсоров Sentinel-1 поддерживает четыре режима работы (табл. 3.10):

- маршрутный (Stripmap);
- интерферометрический (Interferometric Wide Swath);
- сверхширокий (Extra-Wide Swath);
- волновой (Wave Mode).

Таблица 3.10

Основные режимы работы РСА-сенсоров спутников Sentinel-1

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Stripmap	5	80	18–47
Interferometric Wide Swath	20	250	29–46
Extra-Wide Swath	100	400	19–47
Wave Mode	20	20	22–38

Данные, полученные в маршрутном режиме, представляют собой типичные РЛИ с пространственным разрешением до 5 м. Интерферометрический режим обеспечивает получение данных высокого разрешения, наиболее частое применение которых заключается в формировании трехмерных цифровых моделей рельефа и обнаружения подвижек рельефа. Этот же режим съемки используется по умолчанию при мониторинге поверхности суши. Режим сверхширокого обзора (сканирующий режим) предназначен для оперативных наблюдений морских приполярных территорий, в этом случае формируются РЛИ среднего пространственного разрешения, которые также могут быть использованы в задачах интерферометрии. Волновой режим применяется для определения направления, высоты и длины волны в открытом океане. При использовании маршрутного, интерферометрического и сверхширокого режимов возможны наблюдения как в одиночной (HH либо VV), так и в двойной поляризации (HH+HV, VV+VH), данные которой оказались особенно полезны в решении задач по классификации типов морского льда. В волновом режиме доступна съемка только с применением одиночной поляризации (HH либо VV).

На рис. 3.17 представлен фрагмент изображения, полученного с применением РСА-датчика одного из аппаратов миссии Sentinel-1.

Следующим поколением спутников миссии Sentinel становятся аппараты Sentinel-2A (запуск — июнь 2015 г.) и Sentinel –2B (запуск —

март 2017 г.), предназначенные для контроля использования земных угодий, растительности, сельскохозяйственных и водных ресурсов в рамках программы «Коперник» (Copernicus) [59, 60]. Как и в случае спутников Sentinel-1, космические аппараты располагаются на одной солнечно-синхронной орбите (высота 786 км, наклонение 98,6°) на расстоянии 180° друг от друга. В отличие от своих предшественников, аппараты Sentinel-2 осуществляют съемку в оптической и инфракрасной зонах спектра с пространственным разрешением от 10 до 60 м и шириной обзора 290 км. С начала 2020-х гг. ведутся работы по созданию спутников Sentinel-2C и Sentinel-2D, которые будут выведены на орбиту после 2021 г. в целях поддержания действующей программы.



Рис. 3.17. Фрагмент изображения, полученного с помощью группировки спутников Sentinel-1 (режим Interferometric Wide Swath, юго-запад Стамбула, Турция, 2018 год [58])

Наконец, третьим этапом космической миссии Sentinel становятся спутники Sentinel-3A и Sentinel-3B. Фактически обозначенные аппараты являются улучшенными версиями спутников Envisat и ERS-2. Как и их предшественники, Sentinel-3A и Sentinel-3B располагаются на общей солнечно-синхронной орбите высотой 815 км и наклонением 98,7° [61]. Вывод на орбиту аппарата Sentinel-3A произошел в феврале 2016 г., Sentinel-3B — в апреле 2018 г. Среди важ-

нейших задач миссии Sentinel-3 стоит отметить следующие: топография водной поверхности, измерение температуры воды и суши, а также мониторинг окружающей среды и климатический контроль. Из полезной нагрузки на борту каждого из спутников установлено четыре различных датчика (рис. 1, с. 195): температурный радиометр SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer), измеряющий температуру поверхности воды с точностью до 0,3 К; спектрометр OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), представляющий собой усовершенствованную версию сенсора MERIS аппарата Envisat и формирующий изображения земной поверхности в среднем пространственном разрешении в 21 спектральном канале; двухчастотный радиолокационный высотометр SRAL (Synthetic Aperture Radar Altimeter), работающий в Ku- и С-диапазонах и предназначенный для создания топографических карт поверхности океанов и морей, а также ледовых поверхностей. Сенсор предназначен для работы в двух режимах: высокого (SAR) и низкого (LRM) пространственных разрешений.

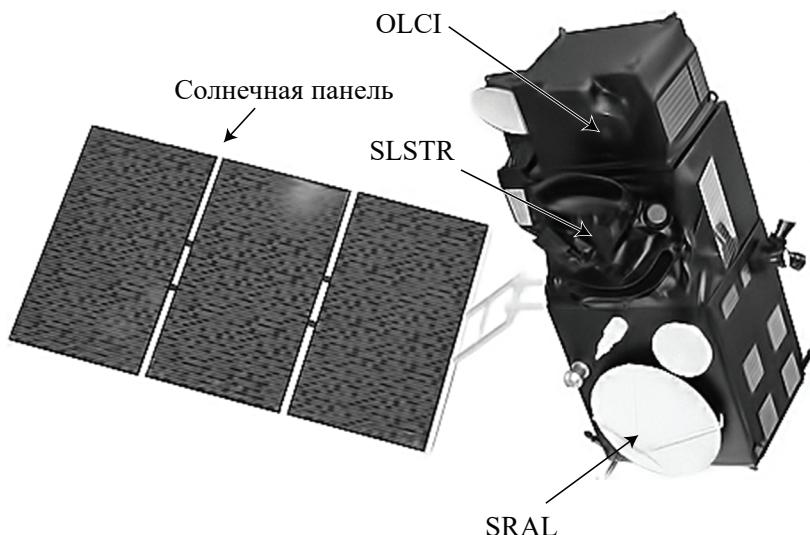


Рис. 3.18. Схематическое изображение целевой аппаратуры спутников Sentinel-3 [61]

В октябре 2017 г. на орбиту выведен аппарат Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P), предназначенный для мониторинга атмосферных загрязнений [62]. Основным инструментом спутника является спектрометр

TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), представляющий собой совместную разработку Европейского космического агентства и правительства Нидерландов. Основная задача спутника заключается в осуществлении измерений химических компонентов воздуха с высоким пространственно-временным разрешением. Полученные данные используются для определения качества воздуха, мониторинга озона-вого слоя, а также служат модельной основой при прогнозировании климатических изменений.

С начала 2020-х гг. также ведутся работы по реализации миссий Sentinel-4, Sentinel-5 и Sentinel-6. Основной задачей спутников Sentinel-4 будет мониторинг химического состава атмосферы, а именно измерение процентного содержания таких соединений, как озон (O_3), диоксид азота (NO_2), диоксид серы (SO_2), формальдегид ($HCHO$), а также оценка оптической толщины аэрозолей [63]. Из полезной нагрузки на аппарате будут установлены спектрометры UVN (Ultraviolet Visible Near-infrared), охватывающие диапазоны от ультрафиолетового до ближнего инфракрасного, и тепловизоры IRS (Infrared Sounder), позволяющие получить трехмерное распределение температуры атмосферы и водяного пара. Вывод на орбиту аппаратов Sentinel-4 запланирован на 2023 г. Аппаратура спутника Sentinel-5 (запуск в 2021 г.) в целом будет аналогична Sentinel-4 за тем исключением, что аппарат позволит оценивать количественное содержание соединений CO , CH_4 и O_3 с ежедневным глобальным покрытием [64]. Основная задача спутников миссии Sentinel-6 будет заключаться в высотометрии уровня мирового океана. Запуск аппаратов запланирован на конец 2020 г. (-6A) и начало 2026 г. (-6B).

Следует отметить, что некоторые из космических снимков и производных данных, полученных с аппаратов миссий Sentinel, находятся в свободном доступе на официальном сайте проекта «Коперник» [65]. Что касаемо радиолокационных изображений — доступны данные космических аппаратов Sentinel-1A и Sentinel-1B, сформированные в режиме Interferometric Wide Swath, для приполярных областей — данные, полученные в режиме Extra-Wide Swath. Для получения доступа к космоснимкам необходима регистрация. Использование данных подразумевает исключительно научные и учебные цели.

3.7. TerraSAR-X

TerraSAR-X (иногда обозначается как TSX) — спутник Немецкого аэрокосмического центра (DLR), запущенный в июне 2007 г. [66]. Орбита аппарата солнечно-синхронная, высота в апогее составляет 516 км, высота в перигее — 514 км, наклонение — 97,4°. Движение спутника по орбите осуществляется вдоль линии терминатора таким образом, что аппарат всегда обращен в сторону Солнца, что обеспечивает оптимальное накопление энергии через солнечные батареи. Основным инструментом TerraSAR-X является радиолокатор с синтезированной апертурой X-диапазона (рабочая длина волны 3,1 см) размером 5 м × 0,8 м, позволяющий осуществлять съемку земной поверхности с пространственным разрешением до 1 м, являясь по сути третьим аппаратом (после COSMO-SkyMed и RADARSAT-2), обеспечивающим формирование радиолокационных изображений в сверхвысоком разрешении. Среди основных задач спутника следует отметить составление и обновление топографических карт масштабом до 1:25000, мониторинг окружающей среды и экологической обстановки, а также обнаружение подвижек рельефа. Для спутника доступна возможность левой и правой боковой съемки, а также съемка в нескольких типах поляризации. Отличительной особенностью аппарата TerraSAR-X является короткое время реагирования, позволяющее осуществить выбор режима съемки и тип поляризации в течение 3 с.

Рассмотрим подробнее РСА-сенсор спутника TerraSAR-X. Датчик поддерживает три основных режима работы (табл. 3.11):

- SpotLight;
- StripMap;
- ScanSAR.

Режим SpotLight (прожекторный режим) предназначен для получения высокодетальных изображений с пространственным разрешением до 0,24 м. В нем принято различать три подрежима:

- собственно SpotLight;
- High Resolution SpotLight, для которого также возможны реализации в одиночной (VV либо HH) либо двойной (HH + VV) поляризации;
- Staring SpotLight, в котором антенна фиксируется на одной сцене на протяжении длительного времени синтезирования,

благодаря чему и формируется РЛИ сверхвысокого пространственного разрешения.

Режим StripMap (маршрутный режим) аналогичен режиму с датчика аппарата ERS-1 и является основным рабочим режимом для TerraSAR-X. В нем возможна реализация как одиночной поляризации (VV либо HH), так и двойной (HH + VV, HH + HV либо VV + VH). Режим ScanSAR (сканирующий режим) также подразделяется на два подрежима:

- собственно ScanSAR;
- Wide ScanSAR.

Оба они предназначены для глобального мониторинга земной поверхности в низком пространственном разрешении и с широкой полосой захвата. Оба подрежима поддерживают только одиночную поляризацию, причем для ScanSAR возможна реализация VV либо HH, для Wide ScanSAR — VV, HH, HV либо VH [67].

На рис. 3.19 приведен фрагмент изображения, полученного со спутника TerraSAR-X.

Таблица 3.11

Основные режимы работы РСА-датчика спутника TerraSAR-X

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Staring SpotLight	0,24 ²³	4	20–45
HighRes SpotLight	1,1	10	20–55
SpotLight	1,7	10	20–55
StripMap	3,3 ²⁴ /6,6 ²⁵	30/15	20–45
ScanSAR	18,5	100	20–45
Wide ScanSAR	40	270	16–49

²³ Только для военных миссий.

²⁴ В режиме одиночной поляризации.

²⁵ В режиме двойной поляризации.

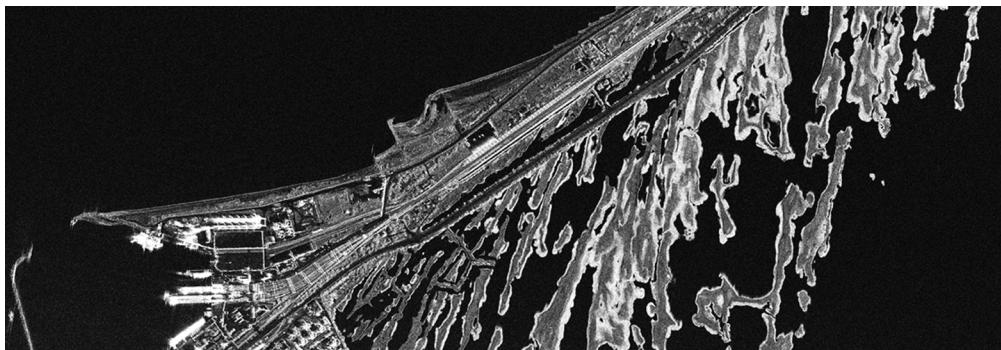


Рис. 3.19. Фрагмент изображения, полученного с помощью спутника TerraSAR-X (режим StripMap, порт города Керчь, Россия [68])

3.8. TanDEM-X

TanDEM-X — спутник-компаньон космического аппарата TerraSAR-X, являющийся его практически полной идентичной копией. Выведен на солнечно-синхронную орбиту в июне 2010 г. Средняя высота орбиты составляет 515 км, наклонение — 97,4°. Причем восходящий узел орбиты подобран таким образом, чтобы в каждый момент времени аппараты TerraSAR-X и TanDEM-X находились на расстоянии от 200 м до 3 км (в среднем 250–500 м), образуя оптимальный интерферометрический базис [69]. На рис. 3.20 представлен снимок с Земли обоих спутников, расстояние между которыми в момент съемки составило 70 угловых секунд.

Задачи аппарата TanDEM-X схожи с задачами его предшественника. Среди основных из них следует отметить наблюдение и оценку динамики таяния ледников, мониторинг зон вечной мерзлоты и растительности [70]. Кроме того, совместное использование данных с TerraSAR-X и TanDEM-X в конфигурации, показанной на рис. 3.18, позволяет осуществлять высокоточную интерферометрическую обработку (заявленная точность — порядка сантиметров), а также применяется в создании глобальной цифровой модели рельефа с точностью по относительной высоте до 2 м, материалы которой легли в основу проекта WorldDEM [71]. Глобальная цифровая модель рельефа WorldDEM является высокодетальным продуктом с полным охва-

том земной поверхности, пришедшим на смену продукту SRTM [72] в 2014 г. На рис. 3.21 приведены фрагменты цифровой модели рельефа SRTM и WorldDEM.

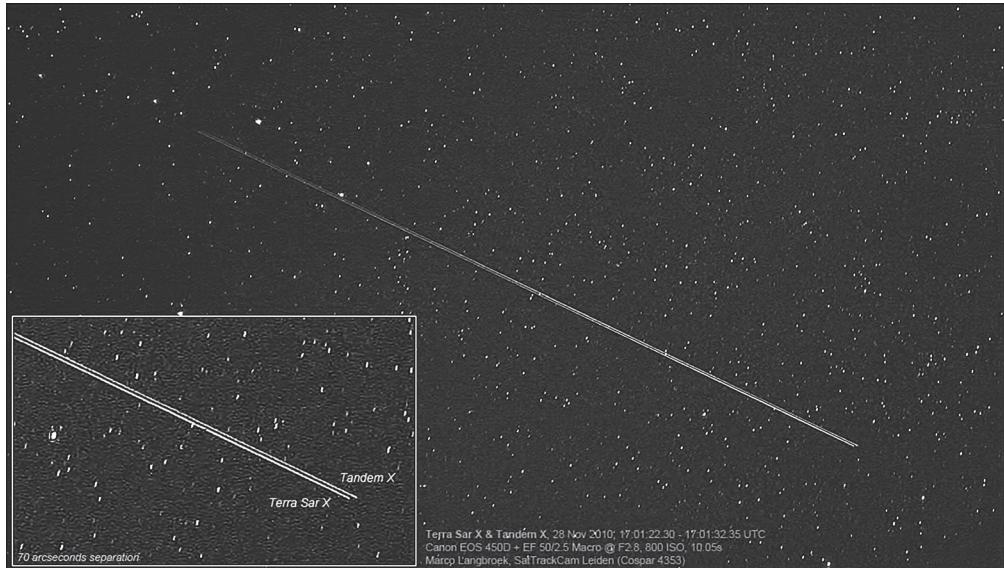


Рис. 3.20. Космические аппараты TerraSAR-X и TanDEM-X
(фото Марко Лангбрука, Лейден, Нидерланды, экспозиция кадра 10 с)

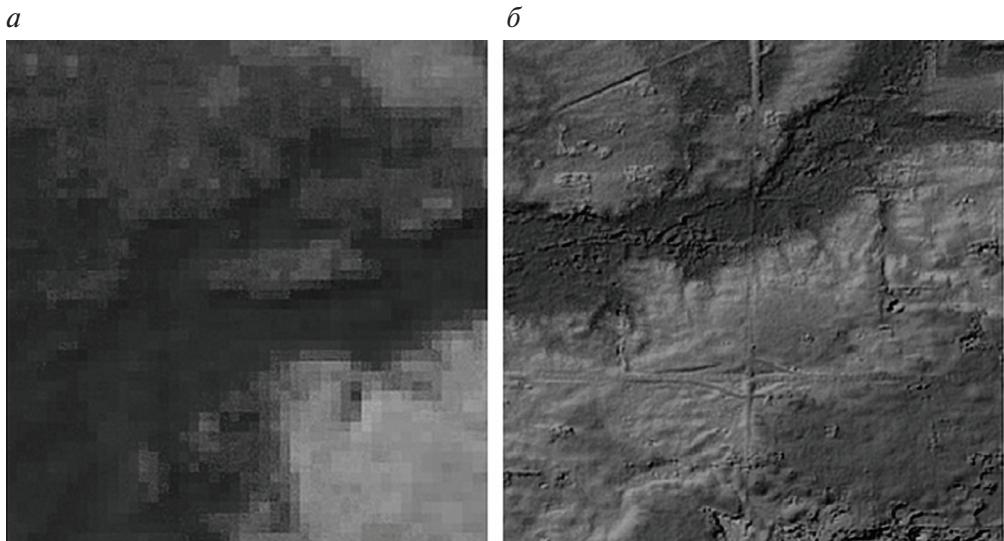


Рис. 3.21. Фрагменты цифровых моделей рельефа:

- a* — SRTM (пространственное разрешение 90 м);
- b* — WorldDEM (пространственное разрешение 12 м) [73]

Коммерческий успех аппаратов TerraSAR-X и TanDEM-X положил начало разработке миссии следующего поколения — TanDEM-L, состоящего из двух идентичных аппаратов, оснащенных РСА-датчиком L-диапазона (рабочая длина волны 23,6 см). Помимо дополнения данных своих предшественников, в задачи миссии TanDEM-L будет входить предсказание землетрясений за счет наблюдений подвижек рельефа с точностью порядка миллиметров, мониторинг движения ледников и другие задачи, связанные с динамикой земного покрова. Запуск аппаратов предварительно запланирован на 2022 г.

3.9. PAZ

PAZ — испанский спутник дистанционного зондирования Земли, оборудованный РСА-датчиком X-диапазона (рабочая длина волны 3,1 см). Запуск состоялся в феврале 2018 г. Высота солнечно-синхронной орбиты 508 км, наклонение 97,4° [74]. По сути спутник PAZ является дополнением миссии космических аппаратов TerraSAR-X и TanDEM-X, позволяющим улучшить временное разрешение для задач мониторинга окружающей среды и предотвращения чрезвычайных ситуаций. Также космоснимки PAZ применяются для пограничного контроля и разведки, планирования развития инфраструктуры и мониторинга стихийных бедствий.

Размер антенны РСА-датчика составляет $4,8 \times 0,7$ м. Поддерживается три основных режима работы (табл. 3.12):

- прожекторный SpotLight;
- маршрутный StripMap;
- сканирующий ScanSAR [75].

Прожекторный режим съемки подразделяется на два подрежима:

- собственно SpotLight, позволяющий формировать РЛИ с пространственным разрешением до 1 м;
- Staring SpotLight, обеспечивающий детальность изображений до 0,25 м.

Маршрутный режим является режимом работы сенсора по умолчанию. Маршрутный и прожекторный режимы работы поддерживают как одиночный (HH, VV, HV либо VH), так и двойной (HH + HV, VV + VH либо HH + VV) тип поляризации. В сканирующем режиме работы также выделяют два подрежима:

- ScanSAR, обеспечивающий охват территории до 150 км в среднем пространственном разрешении;
- режим сверхширокого обзора Wide Swathe ScanRadar с охватом местности до 270 км.

В сканирующем режиме съемки поддерживается только одиночный тип поляризации (HH, VV, HV либо VH). Спутник обеспечивает формирование более чем 200 радиолокационных космоснимков за один день. На рис. 3.22 приведен фрагмент РЛИ, полученного с использованием аппаратуры спутника PAZ.

Таблица 3.12
Основные режимы работы РСА-датчика аппарата PAZ

Режим	Пространственное разрешение, м	Полоса обзора, км	Угол визирования, °
Staring SpotLight	0,25 ²⁶	4	20–55
SpotLight	1	5	20–55
StripMap	3 ²⁷ /6 ²⁸	30/15	20–45
ScanSAR	18,5	150	20–45
Wide Swathe	40	270	16–49



Рис. 3.22. Фрагмент космоснимка, полученного с космического аппарата PAZ (режим Spotlight, поляризация VV + HR, Сиэтл, штат Вашингтон, США, апрель 2018 г. [74])

²⁶ Только для военных миссий.

²⁷ В режиме одиночной поляризации.

²⁸ В режиме двойной поляризации.

Логическим дополнением миссии аппарата PAZ становится спутник Ingenio (SEOSAT-Ingenio), выведенный на орбиту в сентябре 2020 г. (высота орбиты 670 км, наклонение 98,0°) [76]. Полезная нагрузка спутника включает в себя три инструмента:

- мультиспектральную камеру, обеспечивающую оптическую съемку земной поверхности в многозональном режиме (пространственное разрешение 10 м);
- панхроматическую камеру (пространственное разрешение 2,5 м);
- датчик наблюдения за атмосферой в видимом и ультрафиолетовом диапазонах.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Чему равна характерная величина длины синтезированной апертуры для современных космических радиолокационных систем ДЗЗ?
2. В чем заключается основное преимущество использования спутников при наблюдении Земли из космоса в сравнении с самолетами?
3. Какой тип поляризации следует использовать в задачах наблюдения кораблей на водной поверхности?
4. Почему характерная величина наклонения орбит спутников, предназначенных для наблюдения Земли из космоса, составляет 98°?
5. Почему пространственное разрешение некоторых радиолокационных систем ДЗЗ может различаться при использовании различных типов поляризации волны?
6. Из-за чего в сканирующем режиме съемки ухудшается пространственное разрешение РЛИ?
7. Почему при отражении зондирующего сигнала от некоторых типов элементов растительности (хвойная растительность) составляющая на кросс-поляризации сильнее в сравнении с со-средоточенными целями?
8. Почему для радиолокационных систем ДЗЗ пространственное разрешение по дальности может быть в несколько раз хуже по сравнению с пространственным разрешением по азимуту?
9. Какие искажения могут вносить ярко выраженные элементы рельефа в плановые координаты точечных объектов на РЛИ?
10. Как будет выглядеть высотное строение с большим значением ЭПР на РЛИ?

РАЗДЕЛ Б

**Методические указания
к выполнению лабораторных
работ**



MATLAB®

Лабораторная работа 1

Моделирование радиолокационного изображения с использованием карты ЭПР местности

Цели и задачи работы

Целью лабораторной работы является изучение статистических свойств радиолокационного изображения для произвольной местности, а также изучение взаимосвязи характеристик местности и свойств изображения.

Задачи работы включают следующие аспекты:

- создание модели РЛИ согласно карте распределения эффективной поверхности рассеивания для некоторой абстрактной местности;
- исследование статистических характеристик модельного РЛИ;
- закрепление навыков работы в среде программирования MATLAB в части моделирования случайных полей и исследования статистических свойств массивов данных.

Основные теоретические сведения

Одним из важнейших факторов, определяющих вид радиолокационного изображения местности, являются электрические и геометрические свойства подстилающей поверхности. На практике для описания этих свойств принято использовать величину эффективной поверхности рассеивания (ЭПР). Для различных типов подстилающей поверхности значение ЭПР может различаться в миллионы

раз и более. Так, для небольших объектов органического происхождения величина ЭПР составляет порядка 10^{-3} м², тогда как для массивных цельных металлических конструкций величина ЭПР может достигать от 10^4 до 10^5 м².

Исходя из основного уравнения радиолокации (2.1) ЭПР сосредоточенной цели в экспериментальных условиях может быть найдена как

$$\sigma = 4\pi R^2 \frac{P_r}{P_t},$$

где R — расстояние от антенны-излучателя до цели; P_r — мощность сигнала на входе приемника; P_t — мощность сигнала на выходе передатчика.

Следует отметить, что значение ЭПР зависит как от длины волны зондирующего сигнала, так и от направления распространения излучения²⁹. На практике непосредственный расчет величины ЭПР различных типов подстилающих поверхностей и объектов оказывается достаточно громоздким, поэтому ее значение определяют экспериментально с использованием различных источников излучения и безэховых камер.

На основе величин ЭПР, полученных, например, из справочных данных [14], можно смоделировать приблизительное РЛИ соответствующей местности. Полученная таким способом модель изображения может быть использована для оценки визуальных свойств реального РЛИ этой же местности и влияния спекл-шума на ухудшение пространственного разрешения радиолокационных данных. Следует отметить, что полученная модель РЛИ не будет учитывать ряд специфических особенностей реального радиолокационного снимка, таких как размывание отклика точеной цели и иные эффекты, возникающие при апертурном синтезе.

²⁹ Данное утверждение справедливо для большинства целей, однако существуют цели, изотропные по отношению к направлению излучения, например металлическая сфера и некоторые другие объекты, обладающие радиальной симметрией.

Лабораторное задание

Каждому студенту дано изображение в формате.bmp, представляющее собой абстрактную модель ЭПР участка небесного тела. Пример такого изображения приведен на рис. 1. Требуется сформировать комплексное, амплитудное и фазовое радиолокационные изображения, соответствующие предложенной модели ЭПР, а также исследовать различные статистические характеристики полученного РЛИ. РЛИ с моделью ЭПР, приведенной на рис. 1, показано на рис. 2. Лабораторное задание выполняется в среде MATLAB (либо любой другой по желанию студента с предварительным уведомлением преподавателя).

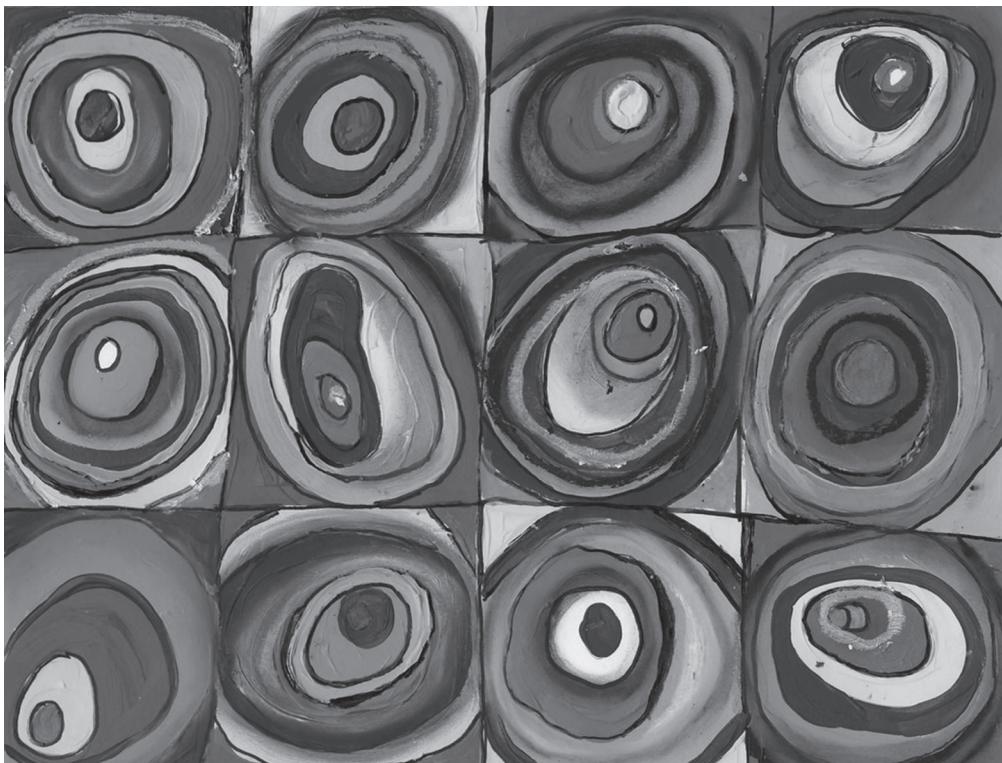


Рис. 1. Пример изображения модельной ЭПР
«Квадраты с концентрическими кругами», В. Кандинский, 1913)

Ход работы:

1. Загрузить модель ЭПР в рабочую среду MATLAB, при необходимости привести считанные из файла данные к пригодному для дальнейших расчетов типу.

2. Используя модель ЭПР, сформировать действительные и мнимые части будущего комплексного РЛИ, для чего необходимо применить одну из функций генерации массива случайных данных (см. главу 1).
3. На основании полученных мнимых и действительных частей сформировать массив, представляющий собой комплексное РЛИ. Построить гистограммы распределения действительных и мнимых частей однородного участка РЛИ, сделать вывод о распределении элементов изображения.
4. С использованием полученного комплексного РЛИ построить амплитудное РЛИ. Проанализировать гистограмму однородного участка РЛИ, сделать вывод о типе шума на изображении.
5. С использованием полученного комплексного РЛИ построить его фазу. Проанализировать гистограмму полученной фазы, сделать вывод о законе распределения фазы РЛИ.

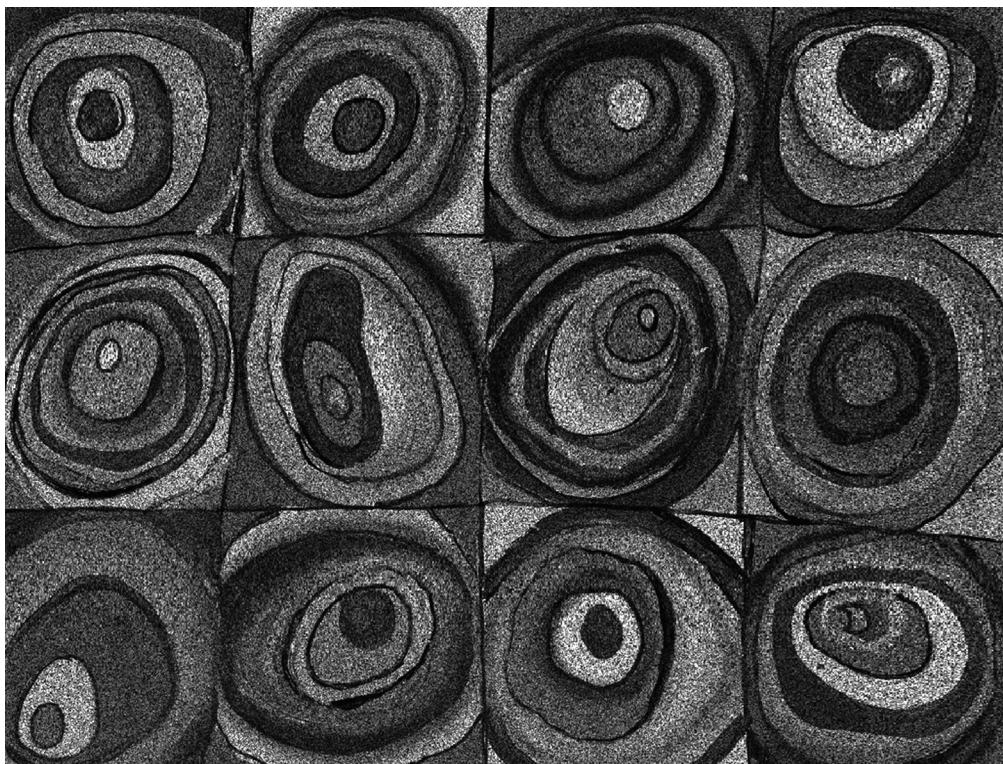


Рис. 2. Пример амплитудного РЛИ на основе модельной ЭПР

Структура отчета

Отчет должен содержать:

- цель и задачи лабораторной работы;
- описание используемых данных;
- изображение полученного амплитудного РЛИ (в градациях серого);
- гистограмму однородного участка амплитудного РЛИ с указанием типа распределения и его параметров;
- изображение в градациях серого полученной фазы РЛИ;
- гистограмму фазы РЛИ с указанием типа распределения и его параметров;
- выводы о выполнении поставленных задач;
- текст кода программы в среде MATLAB;
- копии содержимого рабочей среды (WorkSpace) MATLAB.

Контрольные вопросы

1. Как распределены действительные и мнимые части комплексного РЛИ?
2. Как может меняться ЭПР цели при изменении ее размера?
3. Укажите природу появления спекл-шума на РЛИ.
4. Как распределение фазы РЛИ зависит от ЭПР местности?
5. Как распределение амплитуды РЛИ зависит от ЭПР местности?
6. Чему равны математическое ожидание и дисперсия амплитуды однородного участка РЛИ с ЭПР σ_0 ?
7. Чему равны математическое ожидание и дисперсия действительной и мнимой частей однородного участка РЛИ с ЭПР σ_0 ?
8. Что собой представляет статистическая взаимосвязь дисперсии действительной и мнимой частей однородного участка РЛИ с ЭПР σ_0 ?
9. Каков способ воздействия спекл-шума на РЛИ: аддитивный, субтрактивный или мультипликативный? В чем именно выражается такое воздействие?
10. Почему радиолокационные образы одного и того же объекта, полученные с одной и той же станции под углами 20 и 60°, могут существенно различаться?

Лабораторная работа 2

Синтез радиолокационного изображения по радиоголограмме

Цели и задачи работы

Целью лабораторной работы является знакомство с принципом цифровой обработки сигнала при синтезировании апертуры.

Задачи работы включают следующие аспекты:

- построение опорной функции для формирования радиолокационных изображений;
- реализацию апертурного синтеза (сжатие по дальности) на примере модельной радиоголограммы;
- анализ отклика точечной цели на РЛИ при рассогласовании параметров, используемых при расчете опорной функции;
- закрепление навыков работы в среде программирования MATLAB в части линейной фильтрации сигналов.

Основные теоретические сведения

В основе формирования радиолокационных изображений современными методами используется поступательное движение платформы (космического аппарата), благодаря чему становится возможным осуществить не только развертку по дальности, но и сжатие по азимуту за счет фиксации изменения частоты отклика от целей. Поскольку частота отклика от точечных целей с направлений, близких к траверзе, меняется практически по линейному закону (ЛЧМ-сигнал), то оптимальным инструментом для сжатия по азимуту является согласован-

ная фильтрация. Импульсная характеристика такого согласованного фильтра может быть выражена следующим образом:

$$\dot{h}(n) = C_0 \exp \left\{ \frac{j2\pi(VnT_r)^2}{\lambda R_0} \right\}, \quad (*)$$

где C_0 — произвольный коэффициент; V — скорость движения платформы; T_r — период повторения зондирующих импульсов; λ — рабочая длина волны; R_0 — наклонная дальность (расстояние от платформы до конкретной цели). Следует отметить, что коэффициент C_0 в общем случае выбирается из соображений удобства расчетов [77] и в большинстве практических задач его значение может быть положено равным единице.

Величина наклонной дальности определяется конфигурацией съемки и в простейшем случае является функцией от высоты съемки и расстояния от подспутниковой точки до конкретной цели (в этом случае поверхность Земли считается плоской). Если съемка производится с космического носителя, то поверхность Земли нельзя считать плоской и необходимо учитывать параметры референц-эллипсоида³⁰, а также во многих случаях решать систему уравнений «дальность—Доплер» [6]. В обоих указанных случаях величина наклонной дальности рассчитывается заранее, после чего используется для формирования опорной функции. В системах обработки для радиолокационных спутников, выведенных на орбиту начиная с 2020-х гг., используется набор наклонных дальностей, соответствующих различным положениям точечной цели на разных расстояниях внутри полосы обзора. Таким образом, формируется не одна опорная функция для обработки всей радиоголограммы, а набор опорных функций для обработки элементов радиоголограммы в различных каналах дальности. Указанный прием позволяет повысить пространственное разрешение формируемых РЛИ на всей области кадра.

³⁰ Референц-эллипсоид — эллипсоид, оптимальным образом учитывающий параметры земной поверхности для решения конкретных картографо-геодезических и астрофизических задач [78].

Лабораторное задание

Каждому студенту дана пара изображений в формате.tiff, представляющих собой действительную и мнимую части радиоголограммы, сформированной по некоторой абстрактной модели ЭПР, содержащей высококонтрастную точечную цель с известными приблизительными координатами (рис. 1). Параметры съемки считаются известными. Необходимо подобрать значение наклонной дальности с использованием отклика точеной цели, сформировать опорную функцию и, используя полученную опорную функцию, получить радиолокационное изображение. Пример сформированного таким образом РЛИ приведен на рис. 2, кружком показана контрольная точка. Лабораторное задание выполняется в среде MATLAB (либо любой другой по желанию студента с предварительным уведомлением преподавателя).

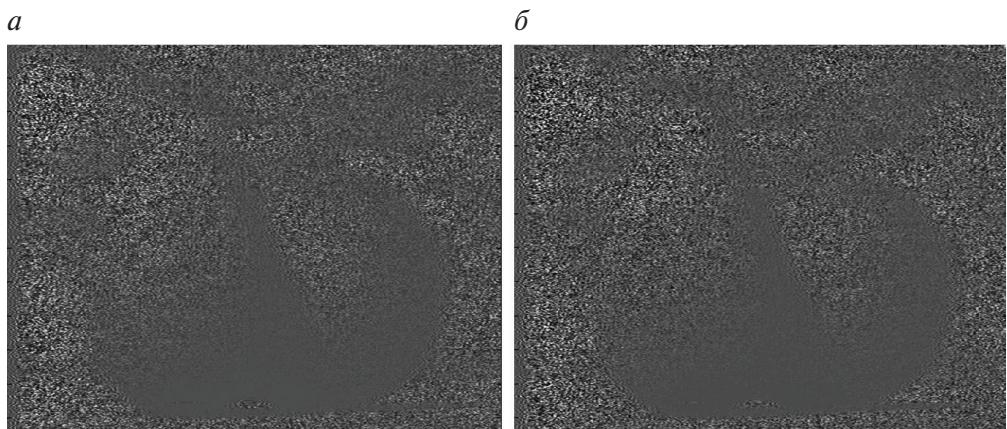


Рис. 1. Пример модельной комплексной радиоголограммы:
a — действительная часть; *b* — мнимая часть

Ход работы:

1. Загрузить мнимую и действительную части радиоголограммы в рабочую среду MATLAB, при необходимости привести считанные из файла данные к пригодному для дальнейших расчетов типу.
2. Объединить считанные из файла данные в единый комплексный массив — комплексную радиоголограмму.
3. Сформировать массив элементов опорной функции согласно выражению (*). Амплитуду C_0 принять равной единице. Ис-

пользовать следующие параметры съемки: скорость движения спутника 7,5 км/с, период повторения импульсов 0,001 с, длина волны 23 см, высота орбиты спутника 800 км. Опорную функцию сформировать симметричной, количество отсчетов положить равным 201.

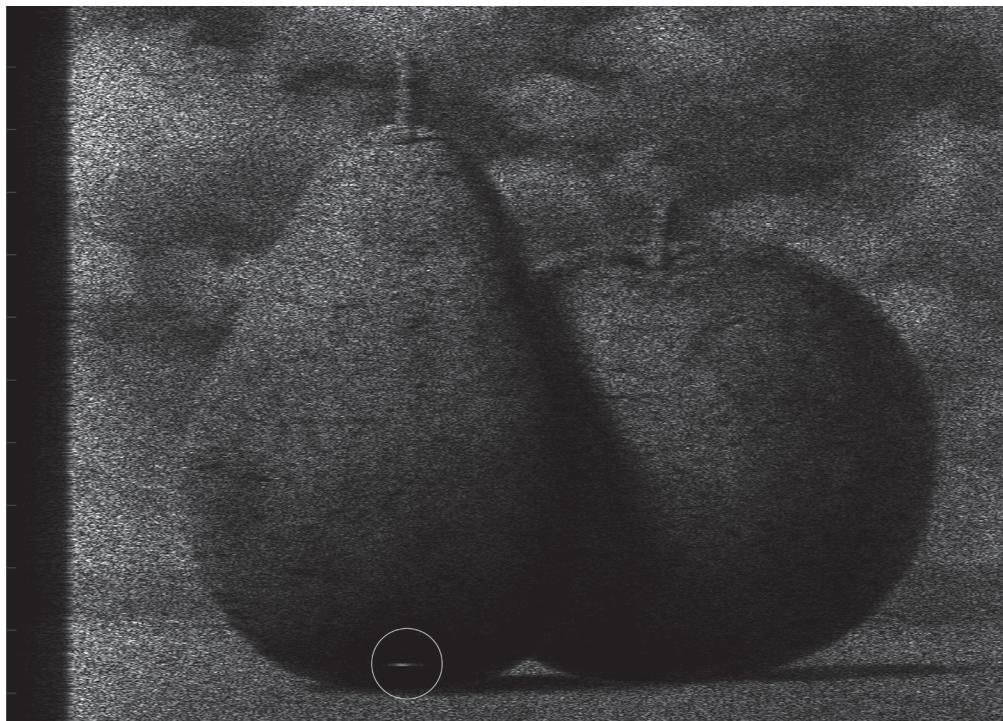


Рис. 2. Пример РЛИ, полученного на основе радиоголограммы на рис. 1 (модель ЭПР — картина «Воспоминания о путешествии», Рене Магритт, 1952 г.)

4. На основании образа точечной цели (примерные координаты точечной цели указаны в задании) подобрать оптимальное значение наклонной дальности таким образом, чтобы ширина ее отклика по азимуту на итоговом РЛИ принимала наименьшее значение. Использовать одно значение наклонной дальности для обработки всей радиоголограммы.
5. Произвести свертку комплексной радиоголограммы с итоговой опорной функцией. В среде MATLAB процедура свертки сигнала с импульсной характеристикой фильтра может быть выполнена с помощью функции `filter`, в которой в качестве

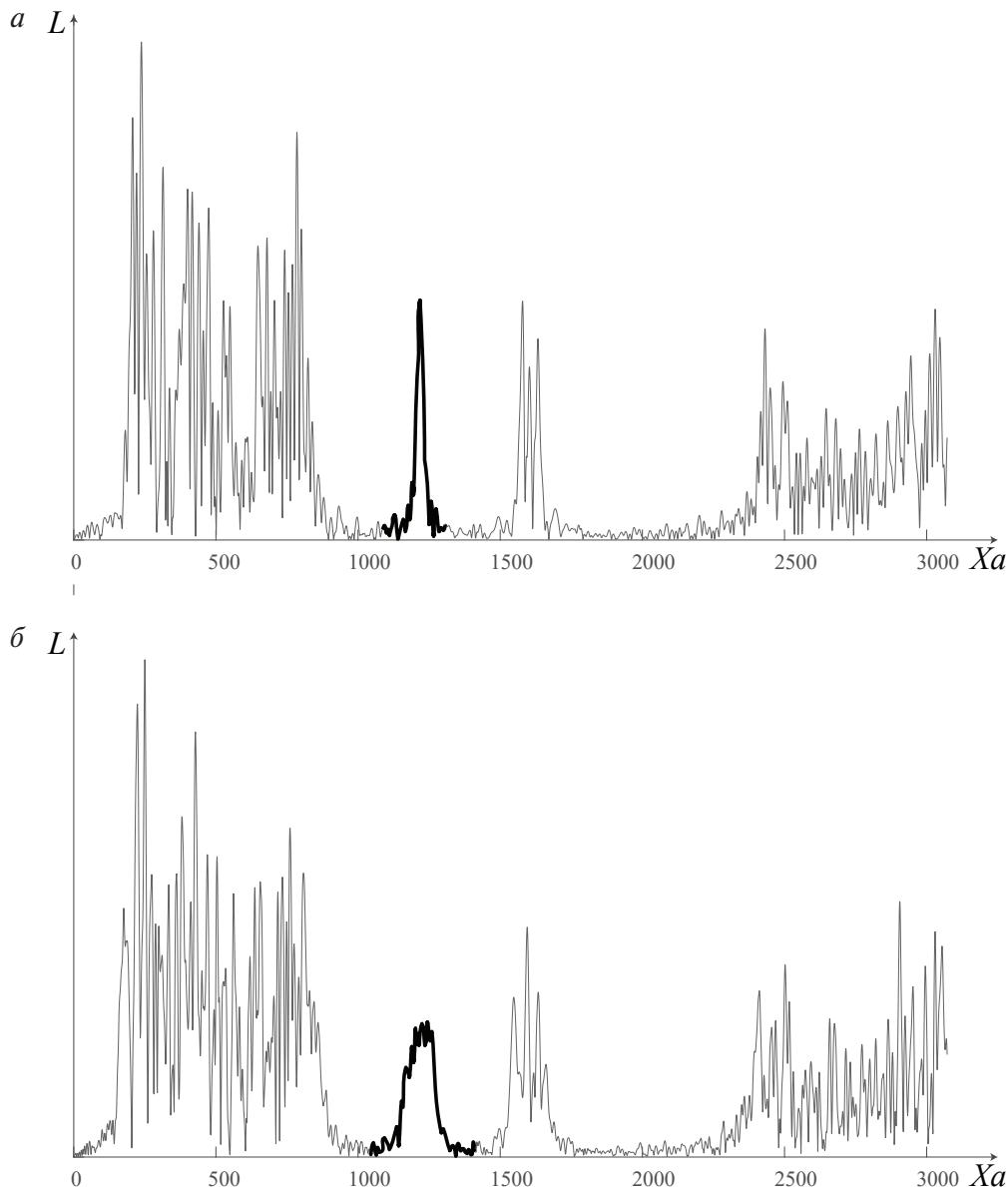


Рис. 3. Горизонтальное сечение РЛИ, содержащего точечную цель
(соответствующий участок показан жирной линией):

a — оптимальная опорная функция; *б* — опорная функция с ошибочно рассчитанной
наклонной дальностью

коэффициента числителя передаточной функции используется опорная функция, в качестве входных данных — зондирующий сигнал, а вектор коэффициента знаменателя передаточной функции следует положить равным единице.

6. Построить горизонтальное сечение амплитудного РЛИ на дальности, в которой расположена точечная цель. Определить размер точечной цели в пикселях по уровню 0,707 от максимального значения яркости. Пример горизонтального сечения РЛИ, содержащего точечную цель, приведен на рис. 3.

Структура отчета

Отчет должен содержать:

- цель и задачи лабораторной работы;
- описание используемых данных и расчетных формул;
- изображение полученного амплитудного РЛИ (в градациях серого);
- значение наклонной дальности, при которой отклик точечной цели обладает наименьшей шириной по азимуту;
- характеристики отклика точечной цели (указать итоговую ширину по азимуту в пикселях);
- горизонтальное сечение РЛИ, проходящее через точечную цель (график зависимости яркости от координаты по азимуту);
- выводы с характеристикой меры достижения цели работы и выполнения поставленных задач;
- текст кода программы в среде MATLAB;
- копии содержимого рабочей среды (WorkSpace) MATLAB.

Контрольные вопросы

1. Почему радиоголограмма представляется в виде двух изображений?
2. Какой функцией аппроксимируется отклик точечной цели вдоль направления азимута в идеальных условиях?
3. Почему процедуру синтеза апертуры в некоторых случаях называют сжатием по азимуту?

4. Чем определяется ширина отклика точечной цели по азимуту?
5. Как влияет ошибка определения частоты повторения импульсов на форму отклика?
6. Как изменится отклик точечной цели при использовании зондирующего сигнала с линейной частотной модуляцией?
7. Должны ли отличаться опорные функции для первой и последней строк радиоголограммы при формировании РЛИ?
8. Объясните причину возникновения темной полосы с левого края итогового РЛИ на рис. 2.

Лабораторная работа 3

Подавление спекл-шума на радиолокационных изображениях

Цели и задачи работы

Целью лабораторной работы 3 является знакомство с методами подавления спекл-шумов на радиолокационных изображениях.

Задачи работы включают следующие аспекты:

- реализацию пространственной фильтрации РЛИ различными методами;
- оценку статистических свойств и визуальных характеристик улучшенных РЛИ;
- исследование влияния некогерентного накопления на интенсивность спекл-шума;
- закрепление навыков работы в среде программирования MATLAB в части пространственной фильтрации сигналов, в том числе нелинейной фильтрации.

Основные теоретические сведения

Как показано в главе 2 (раздел А) и лабораторной работе 1 (раздел Б), неотъемлемой составляющей любого РЛИ, полученного с использованием технологии синтезирования апертуры, является спекл-шум. Применительно к аспектам радиолокации этот шум является возмущающим фактором и, как правило, не несет какой-либо полезной информации. В ряде случаев его присутствие на изображении не оказывает влияния на дальнейшее практическое применение радиолокационных

данных, однако при решении задач, связанных с автоматизированным дешифрированием образов и в особенности при последующей интерферометрической обработке полученных снимков спекл-шум может существенно ухудшить эффект обработки формируемых РЛИ. Таким образом, в ряде случаев при обработке РЛИ для получения качественных и достоверных данных возникает необходимость подавления спекл-шума на изображении.

Спекл-шум по своей природе является мультипликативным, следовательно, процедура его подавления является более трудоемкой в сравнении с фильтрацией аддитивных шумов. Тем не менее для решения данной задачи широко применяются методы пространственной фильтрации [79]–[85]. Суть пространственной фильтрации заключается в пошаговой свертке фрагмента исходного изображения в рамках некоторой области (рис. 1) и в общем случае может быть представлена как

$$g(x, y) = T[f(x, y)], \quad (1)$$

где T — оператор над $f(x, y)$, определенный в некоторой области изображения размером $m \times n$ [5]; $g(x, y)$ — изображение после процедуры фильтрации (изображение на выходе); $f(x, y)$ — исходное изображение.

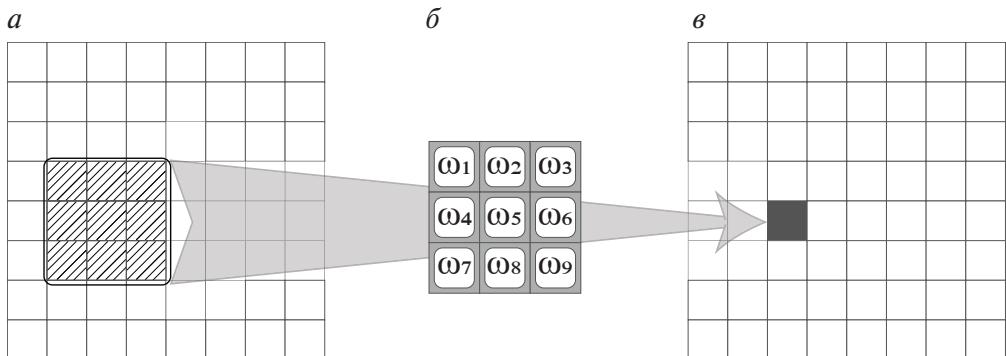


Рис. 1. Общий принцип пространственной фильтрации:

a — исходное изображение; *б* — маска фильтра; *в* — изображение на выходе

Обозначенную окрестность принято называть *маской фильтра*, а величины m и n — размерами маски фильтра. Оператор T представляет собой либо некоторое правило (функцию нескольких переменных), определенное в рамках окрестности (нелинейная фильтрация), либо набор из $m \times n$ числовых коэффициентов (линейная фильтрация). В последнем случае выражение (1) может быть представлено как

$$g(x, y) = \sum_{i=-\frac{m-1}{2}}^{\frac{m-1}{2}} \sum_{j=-\frac{n-1}{2}}^{\frac{n-1}{2}} \omega(i, j) f(x+i, y-j), \quad (2)$$

где $\omega(i, j)$ — числовые коэффициенты линейного фильтра. Конкретные значения числовых коэффициентов определяют тип преобразования, которое осуществляется посредством фильтрации.

Размеры маски фильтра в общем случае могут быть произвольными, однако в большинстве случаев область фильтрации задается в виде квадрата, т. е. $m = n$. Также для удобства формализации значения m и n чаще всего полагают нечетными числами. Отметим, что на границах изображения (первые и последние m строк и n столбцов) возникают краевые эффекты, рассматриваемые в [5]. В случае, если $m = n = 1$, значение яркости каждого элемента выходного изображения определяется исключительно яркостью соответствующего элемента исходного изображения, и такой тип преобразования принято называть градационным. Конкретный вид правила, реализуемого оператором (либо значения коэффициентов маски фильтра), определяется поставленной задачей.

1. Линейные усредняющие фильтры

Линейные усредняющие фильтры описываются выражением (2) с коэффициентами маски фильтра, каждый из которых равен $\frac{1}{mn}$. Зан-

частую для удобства формализации значения коэффициентов полагают равными единице, а яркости элементов выходного изображения делятся на величину mn (рис. 2, а). Фактически использование такого фильтра эквивалентно процедуре нахождения средней арифметической яркости элементов в рамках маски фильтра. Очевидно, что процедура усреднения элементов яркости изображения является эффективным инструментом для подавления различных шумов. На практике чаще определяют среднее арифметическое со средневзвешенными коэффициентами, причем центральному элементу под маской фильтра присваивается наибольший коэффициент, а общая сумма коэффициентов может быть представлена в виде 2^N (рис. 2, б). Такой фильтр также будет подавлять шумы на изображении, однако позволит избежать существенного размытия контуров объектов. Пример применения линейного усредняющего фильтра с весовыми коэффициентами показан на рис. 3.

<i>a</i>	<i>b</i>																		
$\frac{1}{9} \times$	$\frac{1}{16} \times$																		
<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>4</td><td>2</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>1</td></tr> </table>	1	2	1	2	4	2	1	2	1
1	1	1																	
1	1	1																	
1	1	1																	
1	2	1																	
2	4	2																	
1	2	1																	

Рис. 2. Маска линейного пространственного фильтра размером 3×3:
a — безвесовой фильтр; *b* — взвешивающий фильтр



Рис. 3. Результат применения линейного пространственного усредняющего фильтра:
a — исходное тестовое изображение размером 300×300 элементов; *b* — результат фильтрации маской 3×3; *c* — результат фильтрации маской 11×11; *d* — результат фильтрации маской 35×35

В целом линейные усредняющие фильтры показывают хорошие результаты в задачах улучшения изображений, однако для некоторых специфических типов шумов оказываются не слишком эффективными.

2. Фильтры, основанные на порядковых статистиках

Еще одна группа пространственных фильтров, применяемая для подавления различных шумов, основывается на предварительном ранжировании значений яркости элементов под маской фильтра на каждом шаге фильтрации и последующем расчете некоторого квантиля сформированной статистики. В частности, для медианного фильтра на каждом шаге проводится расчет 50%-ного квантиля (медианы), после чего полученное значение используется для формирования выходного изображения:

$$g(x, y) = \operatorname{med}_{x, y \in m \times n} [f(x, y)].$$

Медианный фильтр (рис. 4) особенно эффективен при подавлении шума «соль-перец», значения элементов яркости которого представлены либо абсолютно черным, либо абсолютно белым тоном. Также иногда возможна вариация квантиля статистики, например использование 75 и даже 100 % квантиля в случае, если необходимо подчеркнуть светлые области на фоне более темного шума.

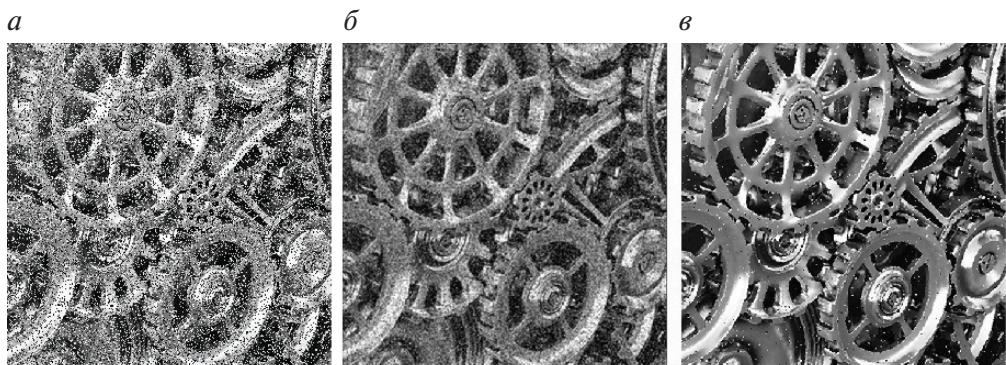


Рис. 4. Подавление шума «соль-перец»:

a — исходное тестовое изображение размером 500×500 элементов; *б* — результат применения линейного усредняющего пространственного фильтра с маской 3×3 ;
в — результат применения медианного фильтра с маской 3×3

Другим фильтром, основанным на порядковых статистиках, является фильтр срединной точки. В случае его применения на каждом шаге фильтрации определяется наибольшее и наименьшее занижение яркости под маской фильтра, после чего находится среднее арифметическое значение:

$$g(x, y) = \frac{1}{2} \left[\max_{x, y \in m \times n} (f(x, y)) + \min_{x, y \in m \times n} (f(x, y)) \right].$$

Фильтр срединной точки наиболее эффективен, когда значения яркости шума соответствуют некоторой промежуточной области динамического диапазона изображения. Пример применения такого фильтра для подавления нормального шума с параметрами $M\{\eta(x, y)\} = 125$ и $\sigma = 20$ показан на рис. 5.

Еще одним примером фильтров, основанных на порядковых статистиках, является фильтр усеченного среднего. В этом случае происходит ранжирование элементов под маской фильтра, после чего из выборки исключается $d/2$ самых темных и $d/2$ самых светлых пикселей.

Среди оставшихся $(m \times n - d)$ элементов находится среднее арифметическое

$$g(x, y) = \frac{1}{mn - d} \sum_{x, y \in m \times n} f(x, y).$$

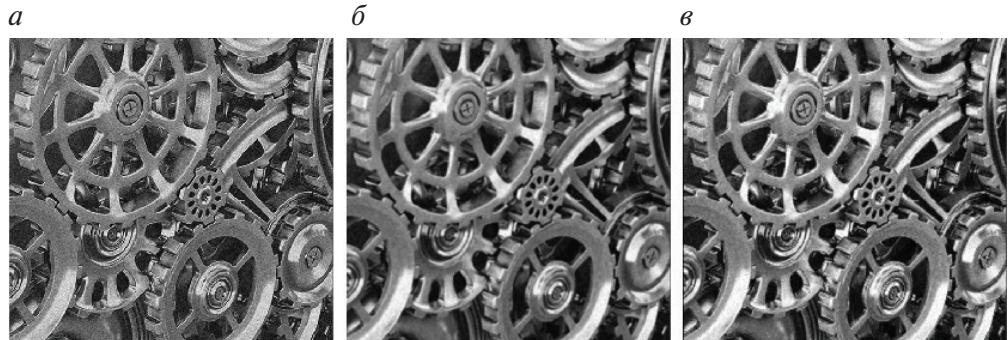


Рис. 5. Подавление нормального шума:

а — исходное тестовое изображение размером 500×500 элементов; *б* — результат применения линейного усредняющего пространственного фильтра с маской 3×3 ; *в* — результат применения фильтра срединной точки с маской 3×3

Данный тип фильтра полезен в случае, если на изображении присутствует несколько типов шумов. В зависимости от особенностей изображения величину параметра d можно варьировать. Если $d = 0$, то фильтр усеченного среднего преобразуется в линейный усредняющий фильтр. Пример использования фильтра при наличии на изображении черного импульсного шума ($P = 10\%$) и нормального шума с параметрами $M\{\eta(x, y)\} = 125$ и $\sigma = 20$ показан на рис. 6.

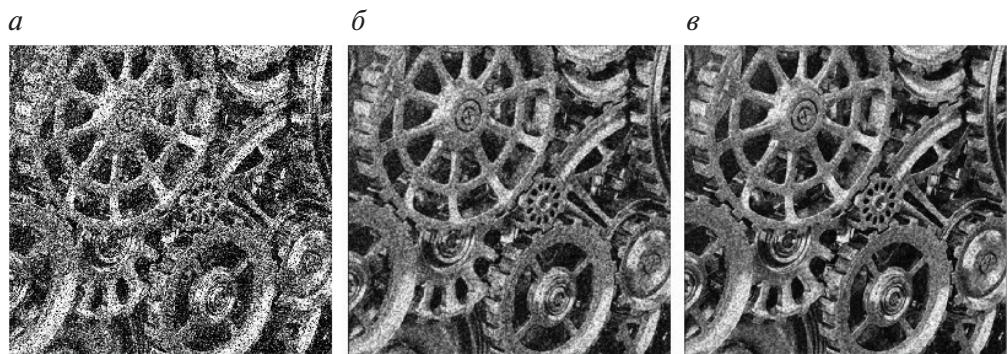


Рис. 6. Подавление нормального и импульсного шумов:

а — исходное тестовое изображение размером 500×500 элементов; *б* — результат применения линейного усредняющего пространственного фильтра с маской 3×3 ; *в* — результат применения фильтра усеченного среднего с маской 3×3

Отметим, что в ряде случаев для получения изображения оптимального качества бывает целесообразно производить процедуру фильтрации в несколько подходов, т. е. повторно применять один и тот же фильтр к выходным изображениям два и более раз.

Для сохранения контуров исходного РЛИ возможно применение комбинированных фильтров, сочетающих в себе признаки как линейных пространственных фильтров, так и фильтров, основанных на порядковых статистиках. В качестве примера рассмотрим следующий фильтр. Область под маской фильтра на каждом шаге фильтрации разбивается на N равных фрагментов, в которых осуществляется подсчет локального значения дисперсии элементов яркости σ_L^2 (рис. 7). Далее полученные значения ранжируются, после чего рассчитывают среднее арифметическое (либо средневзвешенное арифметическое) значение элементов фрагмента с наименьшим значением σ_L^2 . Полученное значение используется для формирования элемента выходного изображения. Приведенное преобразование можно описать следующим выражением:

$$g(x, y) = \sum_{i=-\frac{s}{2}}^{\frac{s}{2}} \sum_{j=-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} f(x+i, y-j) |_{\min(\sigma_L^2|_{s \times t})},$$

где s, t — размеры фрагмента под маской фильтра.

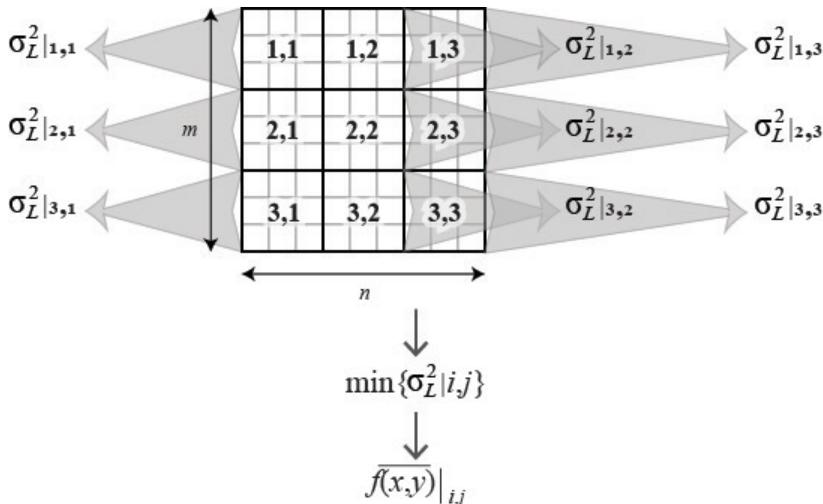


Рис. 7. Алгоритм работы модифицированного линейного усредняющего фильтра: размер маски фильтра составляет 9×9 , количество фрагментов $N = 9$

3. Адаптивные фильтры

Рассмотренные выше фильтры обладают общей особенностью: зафиксированный на первой итерации размер маски фильтра и оператор T не изменяются в процессе фильтрации. Между тем по статистическим характеристикам яркостей элементов изображения под маской фильтра на некотором шаге итерации можно сделать вывод о целесообразности увеличения либо уменьшения размера маски фильтрации, а также правиле расчета элементов выходного изображения, что позволит добиться существенных улучшений результатов. Такие фильтры называются адаптивными и дают гораздо более широкие возможности в вопросах подавления шума на изображениях. Однако зачастую их реализация сложнее, а процесс фильтрации более длительный. Рассмотрим простейший адаптивный фильтр, схема работы которого приведена на рис. 8.

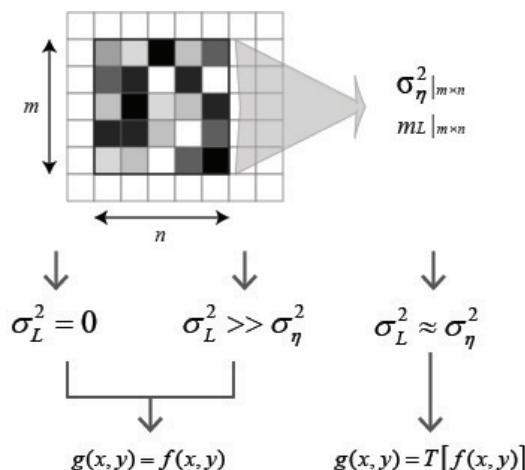


Рис. 8. Алгоритм работы простейшего адаптивного фильтра для подавления шума

На каждом шаге итерации отклик фильтра определяется тремя величинами:

- значением яркости изображения m_L в окрестности $m \times n$;
- значением локальной дисперсии σ_L^2 в окрестности $m \times n$;
- дисперсией шума σ_η^2 .

Для работы фильтра дисперсия шума σ_η^2 должна быть оценена заранее, все остальные параметры рассчитываются по ходу выполнения алгоритма. В случае если на некой итерации под маской фильтра ло-

кальная дисперсия оказывается близкой к нулевой, то это говорит об отсутствии шума и данный фрагмент изменению не подлежит. Таким образом, отклик фильтра от этой окрестности должен совпадать с соответствующим элементом исходного изображения. Если величина локальной дисперсии существенно превышает дисперсию шума, то такая ситуация говорит о наличии контуров на изображении и данный фрагмент также следует сохранить без изменений. Если локальная дисперсия приблизительно совпадает с дисперсией шума, то это свидетельствует о необходимости применения того или иного фильтра для подавления шума. Выбор фильтра определяется конкретным типом шума.

В качестве примера адаптивный фильтр может быть задан следующим выражением:

$$g(x, y) = \begin{cases} f(x, y) - \frac{\sigma_{\eta}^2}{\sigma_L^2} (f(x, y) - m_L), & \sigma_L^2 > v, \\ f(x, y), & \sigma_L^2 \leq v, \end{cases} \quad (3)$$

где v — некоторое пороговое значение, которое устанавливается из практических и (или) теоретических соображений.

Пример использования адаптивного фильтра с пороговым значением $v=50$ для подавления нормального шума с параметрами $M\{\eta(x, y)\}=125$ и $\sigma=50$ показан на рис. 9.

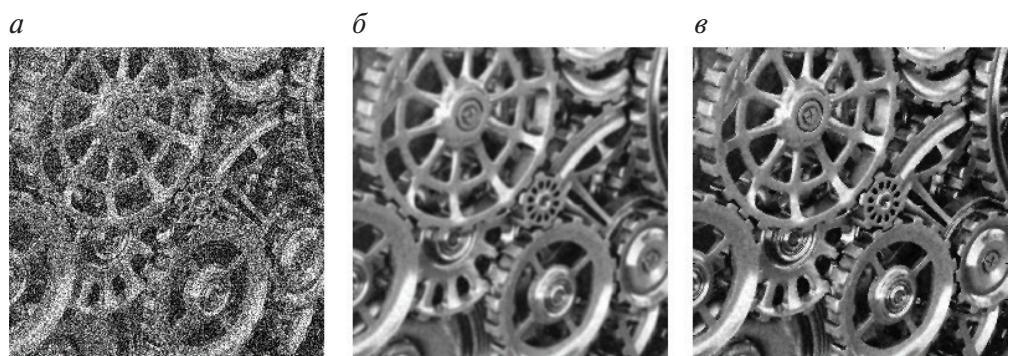


Рис. 9. Подавление нормального шума:

а — исходное тестовое изображение размером 500×500 элементов; *б* — результат применения линейного усредняющего пространственного фильтра с маской 9×9 ; *в* — результат адаптивного фильтра (см. формулу (3))

Для подавления спекл-шума широко используется еще один адаптивный фильтр — фильтр Ли [79]:

$$g(x, y) = \begin{cases} m_L + \frac{\sigma_\eta^2}{m_L \sigma_\eta^2 + \sigma_L^2} (f(x, y) - m_L), & \sigma_L^2 > v, \\ f(x, y), & \sigma_L^2 < v. \end{cases}$$

Принцип его действия схож с предыдущим, однако в качестве оператора используется выражение, учитывающее отношение сигнал–шум и локальное среднее значение яркости под маской фильтра.

Также широкое применение находят модификации фильтра Ли, показывающие надежные результаты при подавлении шумов на однородных и изотропных областях:

$$g(x, y) = \begin{cases} m_L + \frac{\sigma_L^2 - m_L \sigma_\eta^2}{\sigma_L^2 (\sigma_\eta^2 + 1)} (f(x, y) - m_L), & \sigma_L^2 > v, \\ f(x, y), & \sigma_L^2 < v; \end{cases} \quad (4)$$

$$g(x, y) = \begin{cases} m_L + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{m_L^2}{\sigma_\eta^2} \right) (f(x, y) - m_L), & \sigma_L^2 > v, \\ f(x, y), & \sigma_L^2 < v. \end{cases} \quad (5)$$

Еще одна модификация фильтра Ли позволяет избежать необходимости предварительной оценки дисперсии шума:

$$g(x, y) = \begin{cases} m_L + \left(1 - \frac{\sigma_{l\eta}^2}{\sigma_L^2} \right) (f(x, y) - m_L), & \sigma_L^2 > v, \\ f(x, y), & \sigma_L^2 < v, \end{cases} \quad (6)$$

где в качестве параметра $\sigma_{l\eta}^2$ используется либо значение 0,465 для амплитудного изображения, либо 1,645 для мощностного РЛИ [79].

Примером адаптивного фильтра, в основе которого используется вариация размера области фильтрации, является фильтр Фроста [79], задаваемый выражением

$$g(x, y) = \sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \theta \exp \left\{ -\alpha(|i| + |j|) \right\} f(i, j), \quad (7)$$

где θ — коэффициент нормировки, приводящий сумму весовых коэффициентов к единице.

Параметр α определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{4\sigma_L^2}{\sqrt{mn}\sigma_\eta^2 m_L^2}.$$

Рассчитываемые на каждом шаге фильтрации значения параметра α приводят к изменению эффективной ширины маски: так, при большом значении отношения сигнал–шум фактические размеры маски фильтра оказываются малыми, за счет чего фильтрация происходит менее интенсивно. Напротив, при низком отношении сигнал–шум экспонента в выражении (7) окажется достаточно широкой, что приведет к более интенсивной фильтрации такого участка.

Для шумов, распределение которых подобно нормальному (РЛИ после некогерентного накопления, действительные и мнимые части комплексного РЛИ), возможно применение сигма-фильтра. В этом случае на каждом шаге фильтрации оценивается яркость каждого элемента на предмет попадания в интервал $\pm 2\sigma_\eta^2$ относительно среднего значения локальной яркости m_L [79]. Яркость элементов, попадающих в этот интервал, используется для дальнейшего расчета среднего значения элемента изображения на выходе, все прочие элементы игнорируются:

$$g(x, y) = \frac{\sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \delta_{ij} f(i, j)}{\sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} \delta_{ij}},$$

где δ_{ij} — решающее правило, определяемое следующим образом:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & f(i, j) \in [-2\sigma_\eta^2, 2\sigma_\eta^2], \\ 0, & f(i, j) \notin [-2\sigma_\eta^2, 2\sigma_\eta^2]. \end{cases}$$

4. Некогерентное накопление РЛИ

Помимо пространственной фильтрации, эффективным методом подавления спекл-шума является некогерентное накопление. Некогерентное накопление (межэлементное) представляет собой усреднение растрового изображения через процедуру суммирования соседних отсчетов [6]. Следует отметить, что данная процедура может быть приме-

нена как к действительно-значным элементам, так и к комплексным. Принцип некогерентного накопления по отношению к одномерному сигналу показан на рис. 10. Фактически данная процедура применительно к изображениям эквивалентна уменьшению его сторон в некоторое число раз, причем это число принято называть коэффициентом накопления. Поскольку одной из особенностей радиолокационных изображений является различный подход к формированию вдоль направлений азимута и дальности, то некогерентное накопление применительно к РЛИ зачастую целесообразно применять с разными коэффициентами накопления по столбцам и строкам.

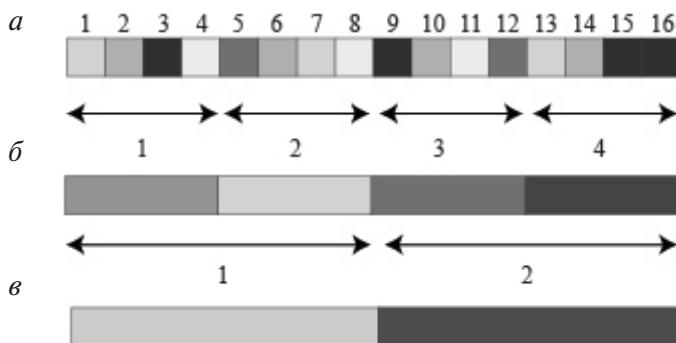


Рис. 10. Принцип процедуры некогерентного накопления:

- а — исходный сигнал;
- б — некогерентное накопление с коэффициентом 4;
- в — некогерентное накопление с коэффициентом 8

5. Оценка эффективности подавления спекл-шума

Для оценки качества улучшенного изображения после применения процедуры фильтрации либо некогерентного накопления используют два параметра:

- коэффициент контраста;
- ширину отклика точечной цели.

Коэффициент контраста представляет собой отношение среднеквадратического отклонения к математическому ожиданию элементов РЛИ в рамках однородного фона:

$$k|_{m \times n} = \sqrt{\frac{1}{(m \times n - 1)} \sum_{i=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{j=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} (f(i, j) - m_L)^2}{m_L}, \quad (8)$$

где $m \times n$ — размеры однородного фона; m_L — локальное значение средней яркости в пределах участка $m \times n$.

Коэффициент контраста характеризует степень флуктуации яркостей на изображении. Применительно к РЛИ данный показатель используется для оценки уровня спекл-шума. Для однородного участка исходного радиолокационного изображения без какой-либо дополнительной обработки его величина может быть найдена через статистические параметры релеевского распределения:

$$k_{Rayleigh} = \frac{\sqrt{D\{f(x,y)\}}}{M\{f(x,y)\}} = \frac{\sqrt{\left(2 - \frac{\pi}{2}\right)\sigma}}{\sqrt{\frac{\pi}{2}\sigma}} \approx 0,52.$$

Таким образом, величина коэффициента контраста РЛИ является фиксированной величиной и не зависит от ЭПР местности, что делает его удобной величиной для использования в качестве оценочного параметра при исследовании эффективности подавления спекл-шума. В случае отсутствия шума коэффициент контраста на однородном участке изображения (с неизменной яркостью) будет равен нулю. Таким образом, задача любой фильтрации заключается в максимальном уменьшении величины коэффициента контраста.

Однако чрезмерное понижение коэффициента контраста изображения приводит к размытию точечных целей и границ объектов на РЛИ, что может вызвать трудности при дешифрировании данных, распознавании образов на изображении и выполнении расчетов качественных показателей. Для контроля степени размытия образов РЛИ при процедуре фильтрации применяется анализ ширины отклика точечной цели. В качестве точечной цели на радиолокационном изображении может быть использован образ корабля либо иного объекта с высоким значением ЭПР и размером порядка элемента пространственного разрешения. После процедуры фильтрации выполняется построение горизонтального профиля яркости строки РЛИ, содержащей точечную цель, далее рассчитывается ширина отклика точечной цели на высоте 0,707 от максимального значения (см. рис. 3). Очевидно, что чрезмерное увеличение ширины отклика (в несколько раз) точечной цели приведет к существенному размытию контуров на изображении и сделает его непригодным для решения ряда практических задач. Таким образом, для получения итогового РЛИ надлежащего качества следует соблюдать баланс меж-

ду оптимальным значением коэффициента контраста на однородном участке и шириной отклика точечной цели. Отметим, что не существует единых рекомендаций по выбору оптимальных контрольных параметров для произвольного РЛИ и приведенная задача решается индивидуально для различных радиолокационных систем мониторинга, режимов съемки и особенностей местности.

Лабораторное задание

Каждому студенту дано изображение в формате.bmp, представляющее собой модель амплитуды радиолокационного изображения, сформированного по некоторой абстрактной модели ЭПР, в том числе содержащее точечную цель. Пример такого изображения приведен на рис. 11, кружком показана контрольная точка.



Рис. 11. Пример РЛИ (модель ЭПР — картина «Лунная ночь на Капри», Иван Айвазовский, 1841 г.)

Необходимо осуществить подавление спекл-шумов предложенного изображения различными способами и сделать выводы о достоинствах и недостатках различных методов. Лабораторное задание выполняется в среде MATLAB (либо любой другой по желанию студента с предварительным уведомлением преподавателя).

Ход работы:

1. Загрузить изображение в рабочую среду MATLAB, при необходимости привести считанные из файла данные к пригодному для дальнейших расчетов типу.
2. Проанализировать эффективность применения линейного усредняющего фильтра, фильтра срединной точки, фильтра, задаваемого выражением (8), фильтра Ли (и его модификации (4)–(6), фильтра Фроста для подавления спекл-шума при изменении размера окна усреднения, оценить значения величин ширины точечной цели и коэффициента контраста однородного участка изображения.
3. Для приведенных фильтров построить графические зависимости величин ширины точечной цели и коэффициента контраста от размера области усреднения. Для построения использовать функцию `plot`.
4. Исследовать влияние некогерентного накопления на коэффициент контраста, для чего использовать функцию `imresize`. Полученные результаты внести в форму, приведенную ниже.

Зависимость коэффициента контраста от коэффициента некогерентного накопления

Коэффициент накопления по азимуту	Коэффициент накопления по дальности	Коэффициент контраста
1	1	
1	2	
2	1	
2	2	
4	1	
1	4	
4	2	
2	4	
4	4	

Структура отчета

Отчет должен содержать:

- цель и задачи лабораторной работы;
- описание используемых данных и параметров применяемых фильтров;
- результаты фильтрации исходного РЛИ для некоторых выбранных фильтров и полученных значений коэффициента контраста и ширины отклика точечной цели (не менее шести образцов). Пример фрагментов РЛИ, содержащих точечную цель, а также профили яркости приведены на рис. 12;
- полученные графические зависимости;
- таблицу, содержащую значения коэффициентов контраста и коэффициентов некогерентного накопления;
- выводы с характеристикой меры достижения цели работы и выполнения поставленных задач;
- текст кода программы в среде MATLAB;
- копии содержимого рабочей среды (WorkSpace) MATLAB.

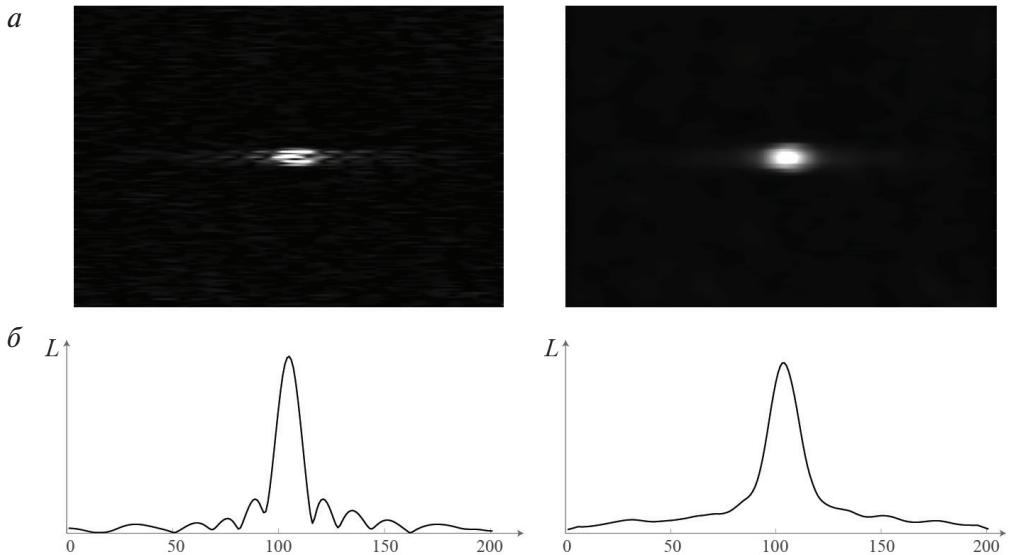


Рис. 12. Фрагмент РЛИ (см. рис. 1), содержащий точечную цель и проходящий через нее профиль яркости:

а — до фильтрации; *б* — после применения линейного усредняющего фильтра со средневзвешенными коэффициентами размером 11×11

Контрольные вопросы

1. Почему спекл-шум является мультиплексивным?
2. Для каких целей при использовании линейного пространственного усредняющего фильтра выходное изображение делится на сумму коэффициентов его маски?
3. Почему коэффициент контраста рассчитывается на однородном участке фона?
4. К какой группе относится медианный фильтр: линейный или нелинейный? Почему?
5. Почему сигма-фильтр не подходит для подавления шума, распределенного по равномерному закону?
6. Может ли спекл-шум присутствовать на изображениях, полученных в оптическом диапазоне, в тепловом канале и при лазарной съемке?
7. Каким образом можно уменьшить спекл-шум без потери пространственного разрешения РЛИ?
8. Почему линейные фильтры не являются наилучшим инструментом для подавления спекл-шума?

Лабораторная работа 4

Анализ радиолокационного образа движущейся многоточечной цели

Цели и задачи работы

Целью лабораторной работы является изучение особенностей формирования радиолокационных изображений движущихся многоточечных целей.

Задачи работы включают следующие аспекты:

- знакомство с принципами математического описания сложного трехмерного движения многоточечных целей;
- исследование влияния различных составляющих многокомпонентного движения многоточечной цели на изменение ее отклика на РЛИ;
- закрепление навыков работы в среде программирования MATLAB в части визуализации данных.

Основные теоретические сведения

Как было показано в подглаве 2.3 (раздел А), технология синтезирования апертуры основана на использовании факта движения платформы относительно земной поверхности. Различные компоненты относительной радиальной скорости элементов цели в разные моменты времени приводят к различной доплеровской частоте отраженного сигнала, что, в свою очередь, позволяет осуществить дальнейшее сжатие сформированного сигнала по направлению азимута. Очевид-

но, что указанный подход обеспечивает надежное отображение земной поверхности только при условии неподвижности всех ее объектов. Если некоторый объект на местности обладает собственным движением, то его радиальная компонента скорости изменится, что приведет к неверному определению координаты на оси азимута. Принято различать два типа движения цели:

- поступательное движение, задаваемое через трехкомпонентный вектор $v_c = \{v_x, v_y, v_z\}$;
- вращательное движение, определяемое через матрицы поворота.

В случае поступательного движения многоточечной цели происходит ее смещение вдоль оси азимута как единого целого (рис. 1). Такие эффекты достаточно хорошо изучены, и в ряде случаев можно привести рекомендации по их частичному устраниению [86, 87].

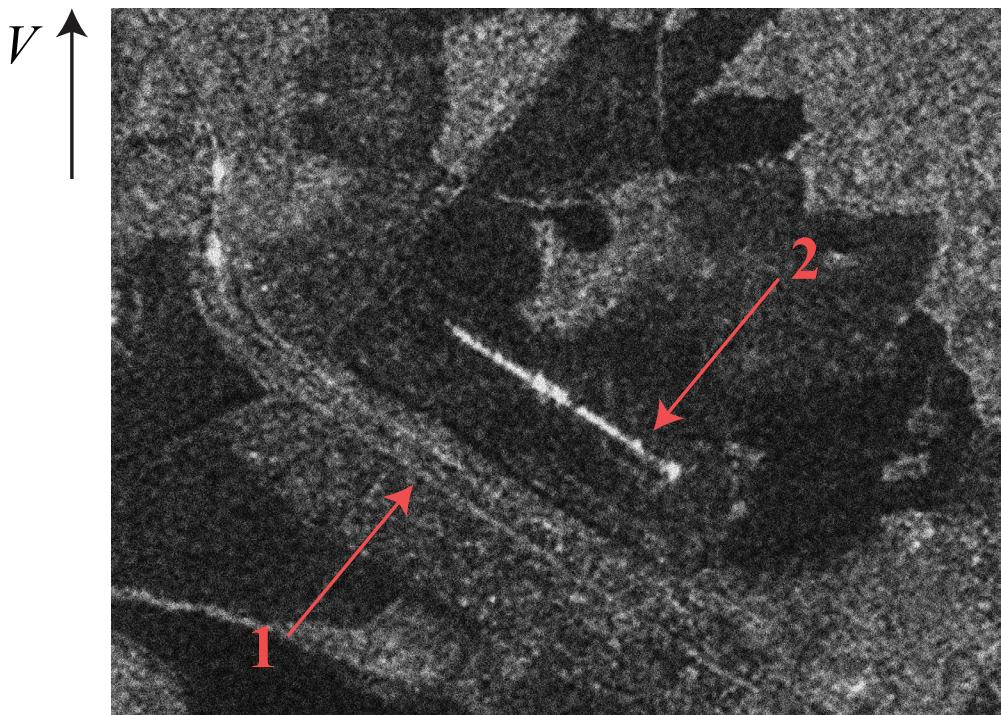


Рис. 1. Фрагмент РЛИ, содержащего движущуюся многоточечную цель
(сенсор ALOS PALSAR, пространственное разрешение 7 м [31]):

точка 1 — положение железнодорожных путей; точка 2 — положение железнодорожного состава; вектор V — направление движение спутника

В случае вращательного движения многоточечной цели каждый из ее отдельных элементов обладает собственной радиальной составляющей скорости. Таким образом, на РЛИ образ данной цели будет искажаться сложным и неочевидным образом. Особенно такой тип движения присущ морским судам, которые за счет перемещения по возмущенной поверхности моря или океана в целом участвуют не только в поступательном, но и во вращательном движении. Рассмотрим подробнее способы описания такого движения.

Для транспортных средств принято различать три типа углового движения, соответствующие трем эйлеровским углам поворота, которые задают вращательное положение цели относительно ее центра — это углы крена, тангажа и рыскания [88]. Крен представляет собой вращение вокруг своей продольной оси, тангаж — угловое движение транспортного средства относительно главной поперечной оси инерции, рыскание — угловое движение цели относительно вертикальной оси (рис. 2).

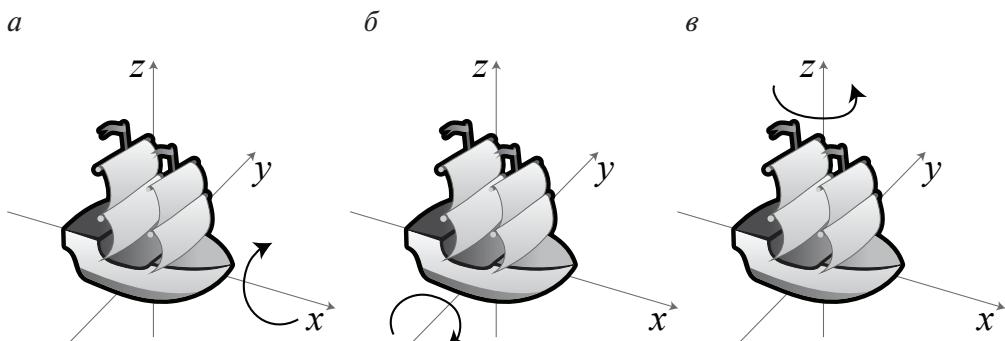


Рис. 2. Типы вращательного движения транспортного средства:

a — крен; *б* — тангаж; *в* — рыскание

Для математического описания вращательного движения цели, элементы которой задаются радиус-вектором, принято использовать матрицы поворота

$$M_{\text{крен}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$M_{\text{тангаж}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$M_{\text{рыскание}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Отметим, что зачастую в реальных ситуациях движение транспортных судов является многокомпонентным и включает в себя одновременно несколько составляющих поступательного и вращательного движений, численные параметры которых являются независимыми.

Лабораторное задание

Необходимо исследовать влияние различных типов движения многоточечной цели на итоговый радиолокационный образ. Для параметров движения, выданных индивидуально каждому студенту, необходимо оценить численные характеристики искажения образов в направлениях дальности и азимута. Лабораторное задание выполняется в среде MATLAB с использованием готового кода, текст которого приведен в прил. 2.

В приведенном коде осуществляется моделирование сложного движения многоточечной цели, процедура формирования отраженного сигнала от элементов цели, синтезирование апертуры с использованием опорной функции в предположении, что цель неподвижна, а также построение отклика элементов цели и ее радиолокационного портрета. Высота орбиты спутника составляет 800 км, угол обзора равен 30° . Конфигурация размещения цели и спутника в декартовой системе координат в начальный момент времени показана на рис. 3. Спутник осуществляет движение вдоль направления оси x со скоростью 7,5 км/с, многоточечная цель представляет собой три точки, ориентированные в начальный момент времени вдоль оси x , размер цели составляет 200 м. Модель движения цели состоит из шести компонентов: поступательное движение, задаваемое трехкомпонентным вектором скорости цели, и вращение относительно трех осей координат, задаваемое выражениями (1)–(3). Все типы движения могут быть заданы

независимо друг от друга. Рабочая длина волны зондирующего сигнала равна 23 см, частота повторения импульсов составляет 2500 с^{-1} , общее время наблюдения цели — 2 с. Опорная функция рассчитывается для 2001 набора различных каналов дальностей. Земля считается плоской поверхностью, эффект миграции дальности не рассматривается.

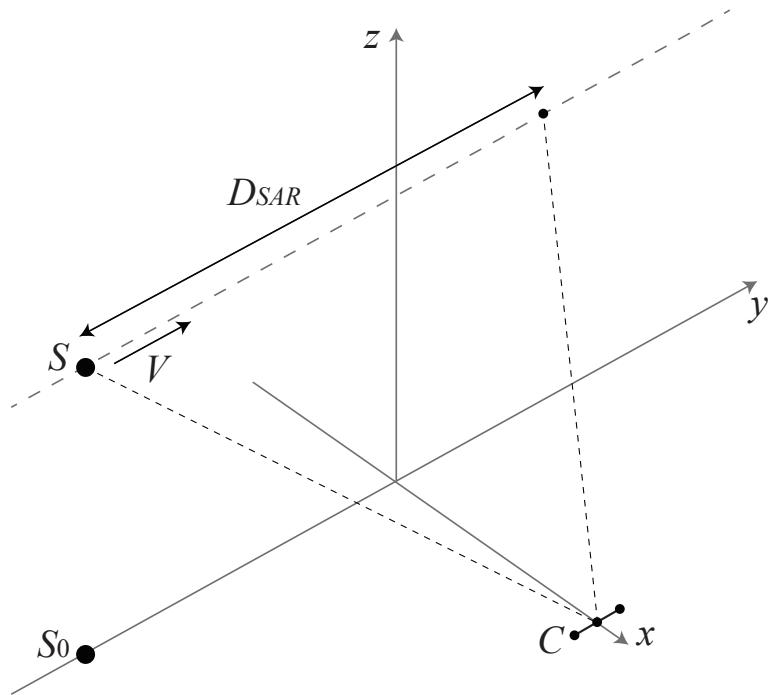


Рис. 3. Конфигурация спутника и цели в начальный момент времени:
S — положение спутника; S_0 — положение подспутниковой точки; C — положение цели

Процесс накопления отраженного сигнала задается в виде цикла, в котором в качестве счетчика используется длительность i -го зондирующего импульса. Далее по накопленному сигналу осуществляется формирование радиоголограммы, после чего происходит построчное синтезирование апертуры с использованием опорной функции. Полученные результаты визуализируются двумя способами: отображением величины отклика полученного сигнала и радиолокационного образа фрагмента, сформированного РЛИ. Примеры обозначенных изображений для неподвижной цели приведены на рис. 4–5.

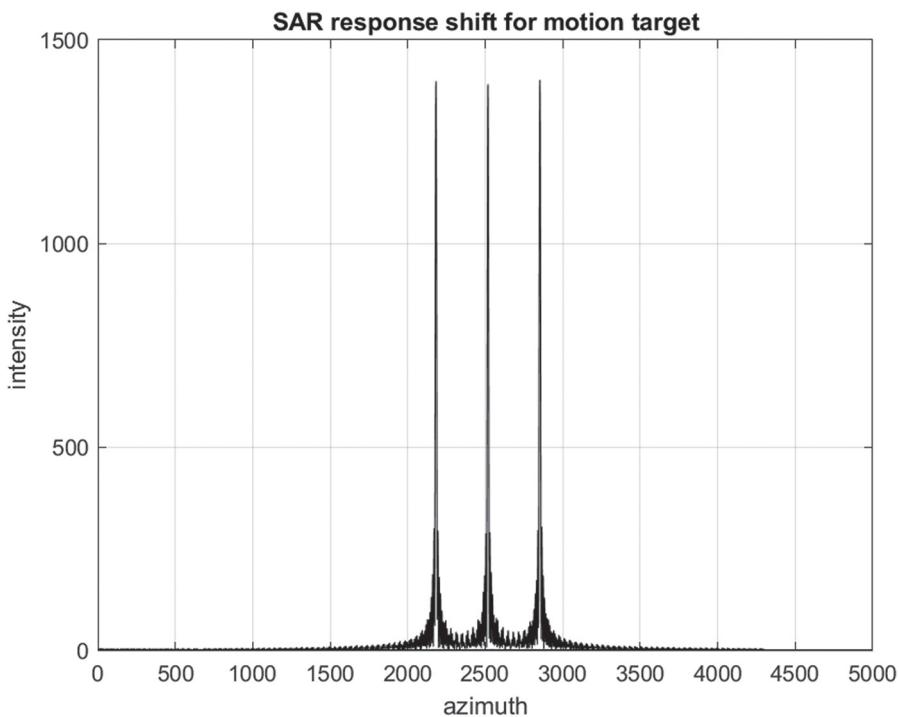


Рис. 4. Результат моделирования с использованием кода из прил. 2:
отклик многоточечной цели в условиях ее неподвижности



Рис. 5. Результат моделирования с использованием кода из прил. 2:
радиолокационный образ многоточечной цели в условиях ее неподвижности

Ход работы:

- Сформировать и проанализировать код из прил. 2 в среде MATLAB.
- Последовательно задать поступательное движение цели (корабля) в трех разных направлениях и проанализировать его влияние на итоговое РЛИ.
- Последовательно задать вращательное движение цели (корабля) через углы крена, тангажа и рыскания и проанализировать его влияние на итоговое РЛИ.

С использованием выданных преподавателем параметров движения оценить искажения итогового образа многоточечной цели по отношению к неподвижной цели: смещение цели, а также изменение масштаба в направлениях дальности и азимута. Пространственное разрешение радиолокационной системы считать равным 1 м, результаты внести в нижеприведенную форму «Искажение образа многоточечной цели на РЛИ при наличии собственного движения».

Искажение образа многоточечной цели на РЛИ при наличии собственного движения

Номер точки	Смещение, м	
	по азимуту	по дальности
Точка 1		
Точка 2		
Точка 3		

Изменение масштаба цели:

по азимуту, %	
по дальности, %	

Структура отчета

Отчет должен содержать:

- цель и задачи лабораторной работы;
- описание и анализ используемого кода;
- график смещения откликов элементов многоточечной цели для нескольких ситуаций (не менее трех типов движения) (рис. 4);
- радиолокационный образ элементов многоточечной цели для нескольких ситуаций (не менее трех типов движения) (рис. 5);
- заполненную форму (см. выше);

- график смещения откликов элементов многоточечной цели для индивидуальных параметров движения корабля;
- радиолокационный образ элементов многоточечной цели для индивидуальных параметров движения корабля;
- выводы с характеристикой меры достижения цели работы и выполнения поставленных задач;
- копии содержимого рабочей среды (WorkSpace) MATLAB.

Контрольные вопросы

1. Чему равна длина синтезирования апертуры согласно условиям, заданным в коде из прил. 2?
2. Укажите истинное положение железнодорожного состава на рис. 1.
3. Как влияет собственное вращение Земли на отклик неподвижной точечной цели?
4. Как влияет наличие угловых скоростей крена, тангажа и рыскания на радиолокационный образ точечной цели?
5. Как будет изменяться образ точечной цели на РЛИ при наличии линейного собственного движения в направлении, перпендикулярном трассе спутника?
6. Как влияет частота зондирующего сигнала на величину смещения отклика движущейся точечной цели?
7. Как меняется образ точечной цели на РЛИ при съемке радиолокационной системой, расположенной на высокоэллиптической орбите?
8. Как будет выглядеть радиолокационный образ самолета, летящего вдоль направления дальности на высоте 10 км?
9. Как и с какой скоростью должна двигаться цель, чтобы частота доплеровского сдвига была равна нулю?
10. При каких параметрах собственного движения цель согласно модели из прил. 2 вырождается в одноточечную?

Лабораторная работа 5

Классификация радиолокационных изображений

Цели и задачи работы

Целью лабораторной работы является знакомство с принципом распознавания участков местности с фиксированным значением ЭПР на примере классификатора, основанного на методе максимального правдоподобия.

Задачи работы включают следующие аспекты:

- знакомство с принципом классификации на примере метода максимального правдоподобия;
- анализ результатов классификации;
- знакомство с принципом вторичной обработки на примере морфологических фильтров;
- закрепление навыков работы в среде программирования MATLAB в части анализа статистических характеристик выборок из двумерных массивов изображения.

Основные теоретические сведения

Классификация изображений представляет собой процедуру соотнесения его элементов с некоторыми классами, соответствующими различным типам объектов [89]. Применительно к данным дистанционного зондирования Земли в качестве таких объектов выступают, как правило, различные типы подстилающей поверхности, такие как почвы, растительность, водная поверхность либо антропогенные объекты.

ты. Получаемый после процедуры классификации результат принято называть *тематической картой*. Пример выполнения классификации для данных дистанционного зондирования Земли для снимка спутника Landsat-7 показан на рис. 1. Процедура классификации снимков Земли из космоса, как правило, является одним из заключительных этапов обработки, при этом полученные результаты могут быть положены в основу дальнейших работ по созданию векторных атрибутов либо использоваться самостоятельно. В качестве критерия выполнения процедуры классификации могут выступать геометрические параметры объектов, структура либо текстура изображения, однако чаще всего в основе лежит анализ яркости его элементов.

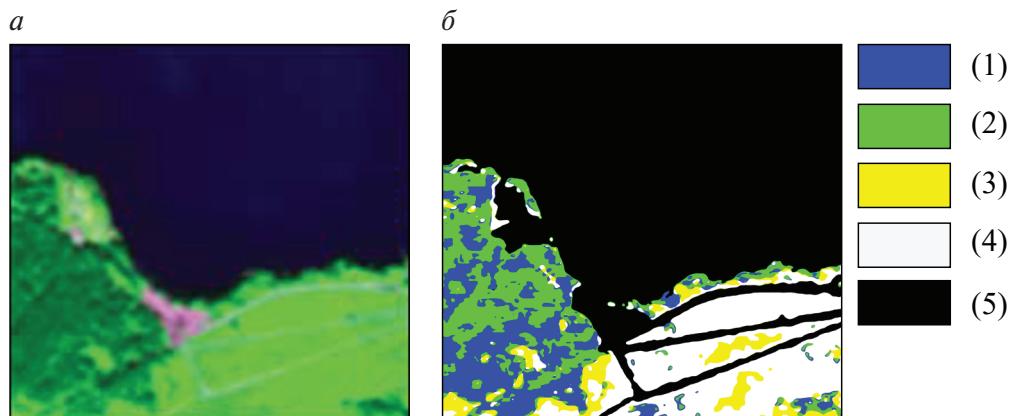


Рис. 1. Классификация космоснимка, полученного с помощью аппарата Landsat-7 [90]:

а — фрагмент исходного изображения; *б* — результат классификации: 1 — хвойный тип растительности; 2 — смешанный тип растительности; 3 — лиственый тип растительности; 4 — трава; 5 — отсутствие растительности

Принято различать два типа классификации: неконтролируемую классификацию и классификацию с использованием обучающих выборок [91]. Неконтролируемая классификация обеспечивает получение менее точных результатов и по смыслу представляет собой кластеризацию изображения. Чаще всего она применяется на начальном этапе анализа снимка для предварительной оценки количества классов и выявления естественной структуры изображения. В случае применения классификации с обучением перед началом процедуры формируются обучающие выборки, относительно которых достоверно известен тип класса. На элементы обучающих выборок накладыва-

ется ряд ограничений. Во-первых, они должны быть репрезентативны, т. е. наиболее полно представлять элементы нужного класса. Как правило, при соблюдении данного условия гистограммы элементов обучающих выборок должны формировать одномодальную кривую. Во-вторых, они должны быть разделимы, т. е. в пространстве яркостей между ними должна быть возможность провести четкую границу. В-третьих, количество обучающих выборок должно соответствовать количеству определяемых классов на изображении. На следующем этапе с использованием параметров обучающих выборок производится анализ всех элементов изображения, после чего формируется итоговая тематическая карта. Математическая formalизация конкретного метода анализа элементов яркостей называется *дискриминантной функцией*. Принцип работы дискриминантной функции показан на рис. 2. Для каждого пикселя изображения X_j проводится вычисление набора из m дискриминантных функций (m — количество определяемых классов), причем тип функций является общим, а конкретный набор параметров функции определяется на основании обучающей выборки класса. Далее полученные значения ранжируются, и в качестве истинного устанавливается тот класс, для которого величина дискриминантной функции принимает наибольшее значение.

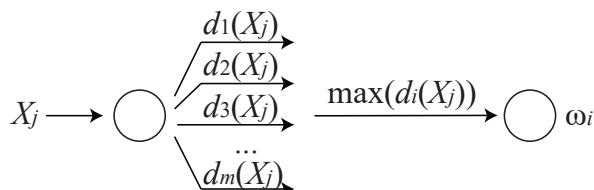


Рис. 2. Классификатор, определяемый через дискриминантную функцию

Существует множество методов построения дискриминантной функции элементов яркости изображения [91]. Рассмотрим более подробно метод, основанный на расчете максимального правдоподобия. Данный метод относится к статистическим способам анализа изображений, что применительно к снимкам Земли из космоса является более приемлемым, поскольку на таких данных присутствуют шумы и иные яркостные искажения. В основе метода максимального правдоподобия лежит формула Байеса для описания апостериорной вероятности:

$$p(\omega_i | X) = p(X | \omega_i) \cdot p(\omega_i) / p(X), \quad (1)$$

где $p(\omega_i | X)$ — вероятность того, что для случайного элемента X определяется класс ω_i ; $p(X | \omega_i)$ — плотность распределения класса ω_i ; $p(\omega_i)$ — априорная вероятность встречаемости i -го класса; $p(X)$ — вероятность попадания элемента X в любой из классов.

Плотность распределения класса определяется априорной информацией о статистических свойствах изображения. Априорная вероятность связана с информацией о наличии объектов того или иного типа на местности. Если такой информации нет, то все величины $p(\omega_i)$ равны друг другу и могут быть найдены как $1/m$. Если информация о наличии объектов того или иного типа имеется, то $p(\omega_i)$ выступают в роли весовых коэффициентов: например, если стоит задача поиска кораблей на море, то очевидно, что количество пикселей корабля на изображении будет существенно меньше, чем количество элементов морской поверхности, таким образом, $p(\omega_{\text{корабль}}) \ll p(\omega_{\text{море}})$. Вероятность попадания элемента в любой из классов равна единице, если классификации подлежат все элементы изображения, и меньше единицы, если присутствует пустой класс из неклассифицированных пикселей. Согласно методу максимального правдоподобия, правильным будет тот класс, для которого выражение (1) примет наибольшее значение. При этом вероятность попадания элемента в правильный класс может быть найдена как результат вычисления $p(\omega_i | X) \cdot p(\omega_i)$. Иллюстрация работы метода максимального правдоподобия для двух классов показана на рис. 3.

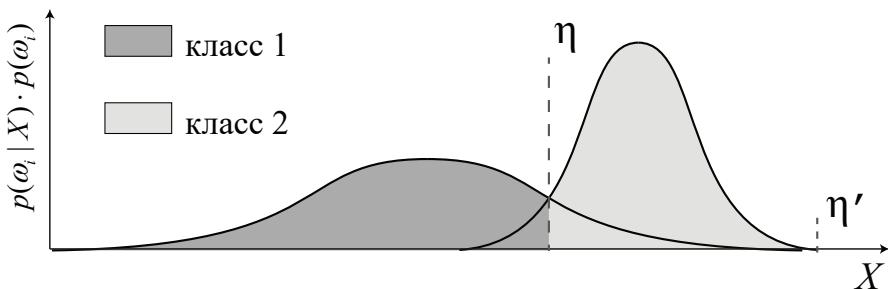


Рис. 3. Метод максимального правдоподобия для двух классов

На рисунке все элементы, яркость которых меньше, чем пороговое значение η , попадают в первый класс, тогда как все элементы, яркость которых превышает пороговое значение, будут отнесены ко второму

классу. Для яркостей, совпадающих с величиной порогового значения η , решающее правило принимается индивидуально для каждой конкретной ситуации. Строго говоря, в ситуации, представленной на рис. 3, имеется второе пороговое значение, обозначенное как η' . Таким образом, в элементы класса 2 могут попадать и элементы класса 1, однако вероятность таких событий окажется достаточно малой.

Дискриминантную функцию метода максимального правдоподобия принято записывать следующим образом:

$$d_i(X) = \ln \{ p(\omega_i | X) \cdot p(\omega_i) \} = \ln \{ p(\omega_i | X) \} + \ln \{ p(\omega_i) \}. \quad (2)$$

Если априорная вероятность встречаемости класса одинакова для всех классов, то последним слагаемым в выражении (2) можно пренебречь. Далее необходимо учесть статистический характер исследуемого изображения. Применительно к радиолокационным изображениям в случае задачи классификации целесообразно использовать РЛИ в виде отсчетов мощности. В этом случае, как показано в подглаве 2.4 (раздел А), распределение яркостей изображения соответствует экспоненциальному закону. В этом случае дискриминантная функция может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} d_i(X) &= \ln \{ p(\omega_i | X) \} = \ln \left\{ \frac{1}{\lambda} \exp^{-\frac{X}{\lambda}} \right\} = \\ &= \ln \left\{ \frac{1}{\lambda} \right\} + \ln \left\{ \exp^{-\frac{X}{\lambda}} \right\} = -\ln \{ \lambda \} - \frac{X}{\lambda}, \end{aligned} \quad (3)$$

где параметр $\lambda = E(X) = \sqrt{D(X)}$ оценивается как математическое ожидание либо среднеквадратическое отклонение элементов обучающей выборки. Соответственно в ходе классификации каждого элемента X на изображении он будет отнесен к тому классу, для которого выражение (3) примет наибольшее значение.

Зачастую из-за присутствия на исходном изображении различных типов шумов результат классификации оказывается не совсем пригодным для дальнейшего прямого использования: области тематической карты оказываются неоднородными, границы областей оказываются неровными, кроме того, на всем кадре присутствуют точечные хаотично расположенные элементы с неверно интерпретированным классом. Применительно к РЛИ обозначенная проблема является более острой в сравнении с данными оптического диапазона за счет осо-

бенностей формирования таких данных. Для устранения обозначенных эффектов к тематической карте применяются морфологические фильтры, основанные на двух базовых операциях — эрозии и дилатации — и применяемые для изменения геометрических свойств кластера изображения без затрагивания элементов его яркости. Применительно к результатам классификации данных дистанционного зондирования Земли чаще всего используют три типа преобразований:

- Clump (комкование);
- Sieve (просеивание);
- фильтрация преобладания (меньшинства) (Majority (Minority Analysis)).

Рассмотрим более подробно фильтрацию преобладания. При использовании такого фильтра на каждом шаге процедуры фильтрации выполняется подсчет количества элементов под маской фильтра, при этом в качестве отклика фильтра используется значение яркости преобладающих элементов. Такой тип преобразования хорошо подходит для улучшения результатов классификации изначально зашумленных изображений (рис. 4).

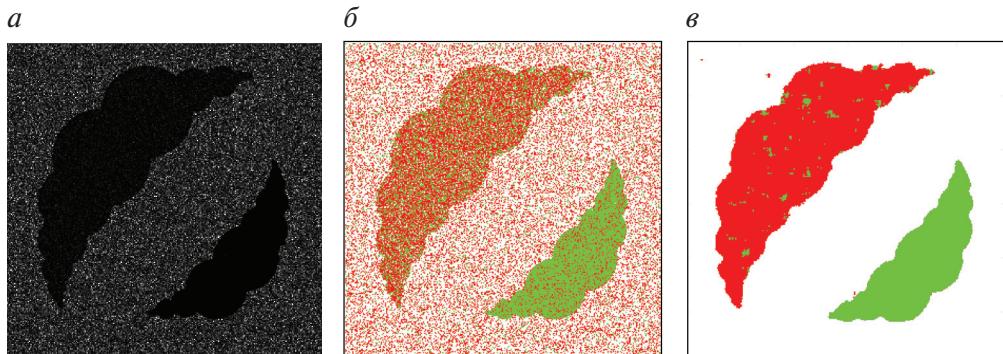


Рис. 4. Использование фильтрации преобладания:

а — исходное изображение размером 300×300 , содержащее три класса; *б* — результат классификации; *в* — после применения фильтрации преобладания (маска 7×7)

Лабораторное задание

Каждому студенту дано изображение в формате.tiff, представляющее собой РЛИ, сформированное из отсчетов мощности в соответствии с некоторой абстрактной моделью ЭПР. Пример такого изо-

бражения, содержащего три класса, приведен на рис. 5. Требуется осуществить классификацию предоставленного изображения методом максимального правдоподобия. Лабораторное задание выполняется в среде MATLAB (либо любой другой по желанию студента с предварительным уведомлением преподавателя).

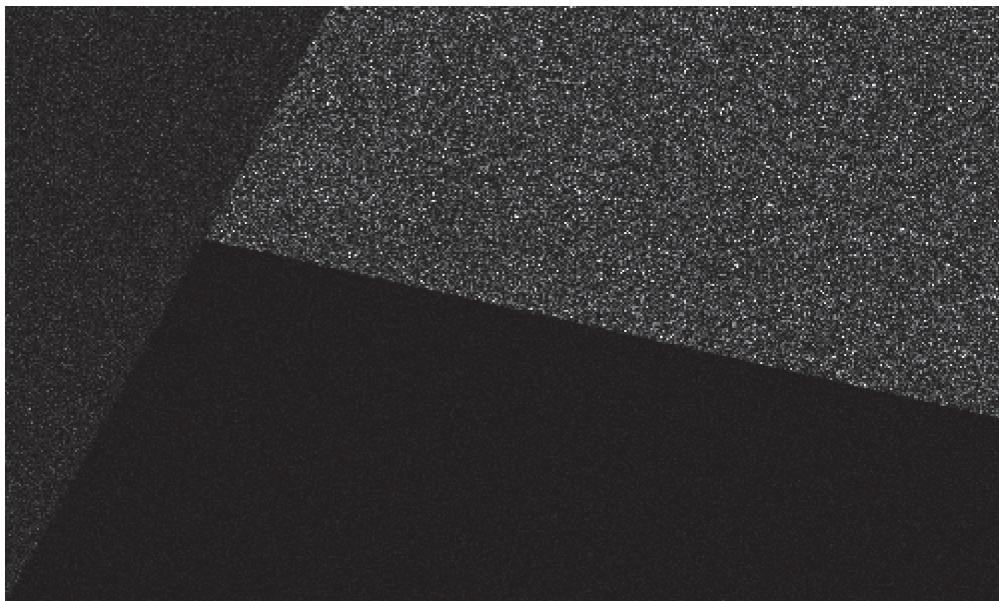


Рис. 5. Пример РЛИ, подлежащего классификации

Ход работы:

1. Загрузить РЛИ в рабочую среду MATLAB, при необходимости привести считанные из файла данные к пригодному для дальнейших расчетов типу.
2. В соответствии со структурой РЛИ сформировать нужное количество обучающих выборок, удовлетворяющих всем необходимым требованиям.
3. Рассчитать среднеквадратическое отклонение элементов обучающих выборок.
4. Сформировать дискриминантные функции для всего динамического диапазона РЛИ с точностью до целой части.
5. Определить номер класса, соответствующего максимуму дискриминантной функции для всего динамического диапазона РЛИ с точностью до целой части.

6. Используя результаты п. 5, классифицировать все элементы РЛИ, т. е. используя сформированный массив из наибольших элементов дискриминантной функции для каждого элемента яркости заданного РЛИ, выбрать тот класс, для которого значение дискриминантной функции максимально.
7. С использованием обучающих выборок рассчитать ошибки классификации (определить, какое количество элементов в пределах границ выборки не соответствует своему классу).
8. Отфильтровать результаты классификации с помощью фильтра преобладания с использованием различных размеров маски.
9. Построить график зависимости ошибок классификации в зависимости от размера маски фильтра преобладания.

Структура отчета

Отчет должен содержать:

- цель и задачи лабораторной работы;
- описание используемых данных;
- изображения обучающих выборок с указанием координат на изображении и среднеквадратических отклонений;
- изображение результата классификации со значениями ошибок классификации;
- несколько изображений (не менее трех) результата классификации после применения фильтра преобладания;
- график зависимости ошибок классификации от размера маски фильтра преобладания;
- выводы с характеристикой меры достижения цели работы и выполнения поставленных задач;
- текст кода программы в среде MATLAB;
- копии содержимого рабочей среды (WorkSpace) MATLAB.

Контрольные вопросы

1. Может ли элемент тематической карты принадлежать одновременно нескольким классам?

2. Какие обучающие выборки могут использоваться в случае применения неконтролируемой классификации?
3. Можно ли применять классификацию с обучением в задаче распознавания малоразмерных кораблей на морской поверхности?
4. Какой будет результат классификации в случае, если одному классу соответствует несколько обучающих выборок?
5. В случае классификации мощностных РЛИ распределение элементов некоторого класса имеет как левую (отличную от нуля), так и правую пороговые границы. В каких случаях такая ситуация возможна?
6. Для чего в записи дискриминантной функции метода максимального правдоподобия используется операция логарифмирования?
7. Как изменится вид дискриминантной функции для изображения, элементы яркости которого подчинены нормальному закону распределения?
8. В случае классификации мощностных РЛИ при наличии двух разных классов распределение элементов на рис. 3 будет иным. Возможно ли в таком случае наличие нескольких пороговых значений?
9. Получена тематическая карта, при этом в области одного из классов содержится в среднем 35 % элементов правильно определенного класса. В каких случаях использование фильтра преобладания позволит получить приемлемые результаты?

Приложение 1

Комплексные числа. Основные характеристики и свойства

Согласно определению [92], комплексные числа представляют собой числа вида $c = a + jb$, причем a и b принадлежат множеству вещественных чисел, $j^2 = -1$ — мнимая единица. Число a называется действительной частью комплексного числа, а число b — мнимой. Благодаря своим специфическим свойствам комплексные числа позволяют облегчить расчетные процедуры во многих технических отраслях, в том числе и в области обработки сигналов.

Рассмотрим более подробно некоторые характеристики комплексных чисел. Для их представления удобно использовать комплексную плоскость — прямоугольную систему координат, абсцисса которой соответствует действительной части числа, а ордината — мнимой (рис. П1.1).

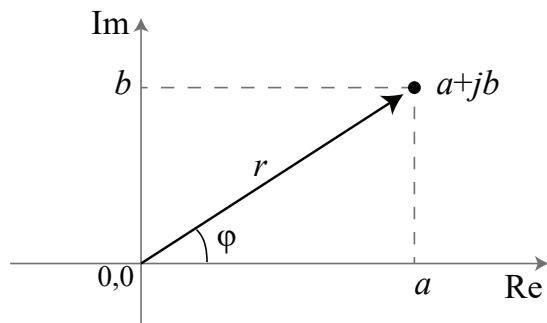


Рис. П1.1. Графическое представление комплексных чисел

Действительную часть комплексного числа c принято обозначать как $\text{Re}(c)$ (на рисунке $\text{Re}(c) = a$), а мнимую как $\text{Im}(c)$ (на рисунке $\text{Im}(c) = b$).

Для комплексных чисел определено большинство операций вещественных чисел, таких как сложение, вычитание, умножение и деление. Однако, как видно из рис. П1.1, операции сравнения комплексных чисел ввиду их двумерной природы не могут быть выполнены. Чаще всего для сравнения комплексных чисел между собой используют их *модули* — длину радиус-вектора комплексного числа при рассмотрении его на комплексной плоскости (величина r на рис. П1.1). Модуль комплексного числа может быть найден как

$$|c| = \sqrt{\operatorname{Re}(c)^2 + \operatorname{Im}(c)^2}. \quad (\text{П1.1})$$

Для модуля комплексного числа c справедливы следующие свойства [93]:

- модуль комплексного числа всегда положителен: $|c| \geq 0$, причем $|c|=0$ тогда и только тогда, когда $c=0+j0$ (c — нулевое комплексное число);
- для любых двух комплексных чисел c_1 и c_2 справедливо неравенство треугольника: $|c_1 + c_2| \leq |c_1| + |c_2|$;
- модуль произведения двух комплексных чисел c_1 и c_2 равен произведению модулей этих чисел: $|c_1 \times c_2| = |c_1| \times |c_2|$;
- модуль отношения двух комплексных чисел c_1 и c_2 равен отношению модулей этих чисел: $\left| \frac{c_1}{c_2} \right| = \frac{|c_1|}{|c_2|}$;
- модуль разности двух любых комплексных чисел $|c_1 - c_2|$ равен расстоянию между их представлением на комплексной плоскости;
- для модуля комплексного числа c и его вещественной и минимой частями справедливы следующие соотношения:
 - $-|c| \leq \operatorname{Re}(c) \leq |c|$;
 - $-|c| \leq \operatorname{Im}(c) \leq |c|$;
 - $|c| \leq |\operatorname{Re}(c)| + |\operatorname{Im}(c)|$.

Модуль комплексного числа является одной из основных его координат в полярном представлении, где в качестве второй координаты выступает аргумент. *Аргумент* комплексного числа — угол между радиус-вектором комплексного числа и положительным направлени-

ем оси абсцисс (величина ϕ , рис. П1.1). Аргумент комплексного числа может быть найден следующим образом:

$$\operatorname{Arg}(c) = \arctg\left(\frac{\operatorname{Im}(c)}{\operatorname{Re}(c)}\right). \quad (\text{П1.2})$$

Аргумент комплексного числа определен с точностью до $2\pi l$, где l — любое целое число, причем для нулевого комплексного числа аргумент не определен. В теории обработки сигналов, как правило, используется аргумент на интервале $[-\pi, \pi]$ ³¹. Ниже приведены некоторые свойства аргумента комплексного числа [94]:

- аргументы любого ненулевого комплексного числа c и обратного к нему $1/c$ отличаются знаком:

$$\operatorname{Arg}\left(\frac{1}{c}\right) = -\operatorname{Arg}(c);$$

- аргумент произведения любых ненулевых комплексных чисел c_1 и c_2 равен сумме аргументов множителей:

$$\operatorname{Arg}(c_1 \times c_2) = \operatorname{Arg}(c_1) + \operatorname{Arg}(c_2);$$

- аргумент отношения любых ненулевых комплексных чисел c_1 и c_2 равен разности аргументов числителя и знаменателя:

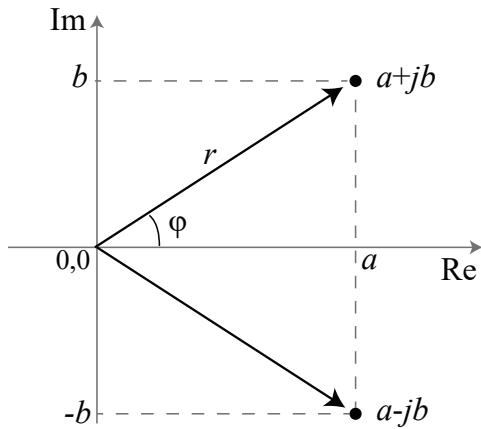
$$\operatorname{Arg}\left(\frac{c_1}{c_2}\right) = \operatorname{Arg}(c_1) - \operatorname{Arg}(c_2).$$

Модуль и аргумент комплексного числа связаны с мнимой и действительной частями следующим очевидным образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(c) &= |c| \cos(\operatorname{Arg}(c)), \\ \operatorname{Im}(c) &= |c| \sin(\operatorname{Arg}(c)). \end{aligned} \quad (\text{П1.3})$$

Еще одним важным понятием теории комплексных чисел является операция комплексного сопряжения. Число \bar{c} называется *комплексно-сопряженным* с $c = a + jb$, если $\bar{c} = a - jb$. В понятиях комплексной плоскости комплексное сопряжение может быть представлено как зеркальное отражение его радиус-вектора относительно оси абсцисс (рис. П1.2).

³¹ Стого говоря, принято различать такое понятие, как главный аргумент комплексного числа, определенный однозначно на интервале $[-\pi, \pi]$. Главный аргумент комплексного числа c обозначается как $\arg(c)$.

Рис. П1.2. Пара комплексно-сопряженных чисел $a + jb$ и $a - jb$

Переход от комплексного числа c к комплексно-сопряженному числу \bar{c} принято называть операцией комплексного сопряжения. Рассмотрим некоторые свойства данной операции [95]:

- для любых двух комплексно-сопряженных чисел c и \bar{c} их модули совпадают: $|c| = |\bar{c}|$;
- для любых двух ненулевых комплексно-сопряженных чисел c и \bar{c} их аргументы отличаются знаком: $\text{Arg}(c) = -\text{Arg}(\bar{c})$;
- комплексно число c совпадает с комплексно-сопряженным \bar{c} тогда и только тогда, когда мнимая часть числа c равна нулю, т. е. $c = \bar{c}$ для $\forall c = a + j0$;
- результатом двойного комплексного сопряжения является исходное число: $(\bar{\bar{c}}) = c$;
- результат произведения комплексного числа $c = a + jb$ и комплексно-сопряженного с ним представляет собой положительное вещественное число: $c \times \bar{c} = a^2 + b^2$, причем $c \times \bar{c} = 0$ только для нулевых комплексных чисел;
- результат сложения комплексного числа $c = a + jb$ с комплексно-сопряженным с ним представляет собой вещественное число: $c + \bar{c} = 2a$, причем $c + \bar{c} = 0$ только для комплексных чисел вида $c = 0 + jb$;
- комплексное сопряжение от суммы двух любых комплексных чисел c_1 и c_2 равно сумме их комплексно-сопряженных чисел: $(c_1 + c_2) = \bar{c}_1 + \bar{c}_2$;

- комплексное сопряжение от разности двух любых комплексных чисел c_1 и c_2 равно разности их комплексно-сопряженных чисел: $(\bar{c}_1 - \bar{c}_2) = \bar{c}_1 - \bar{c}_2$;
- комплексное сопряжение от произведения двух любых комплексных чисел c_1 и c_2 равно произведению их комплексно-сопряженных чисел: $(\bar{c}_1 \times \bar{c}_2) = \bar{c}_1 \times \bar{c}_2$;
- комплексное сопряжение от отношения двух любых комплексных чисел c_1 и c_2 равно отношению их комплексно-сопряженных чисел: $\left(\frac{\bar{c}_1}{\bar{c}_2}\right) = \frac{\bar{c}_1}{\bar{c}_2}$;
- для любого комплексного числа c справедливы следующие соотношения:
 - $\operatorname{Re}(c) = \frac{c + \bar{c}}{2}$;
 - $\operatorname{Im}(c) = \frac{c - \bar{c}}{2j}$.

Использованная выше форма записи комплексного числа вида $c = a + jb$ называется алгебраической. Она удобна для иллюстрации основных свойств комплексных чисел, однако в теории обработки сигналов чаще всего используется показательная форма:

$$c = re^{j\varphi}, \quad (\text{П1.4})$$

где r — модуль комплексного числа, φ — его аргумент, а величина $e^{j\varphi}$ называется комплексной экспонентой. Связь комплексной экспоненты и тригонометрических функций выражается через формулу Эйлера [94]:

$$e^{j\varphi} = \cos \varphi + j \sin \varphi. \quad (\text{П1.5})$$

Формула Эйлера имеет фундаментальное значение в теории комплексного анализа, позволяя осуществить переход между показательной и тригонометрической формами сигналов (рис. П1.3).

Рассмотрим два основных следствия из формулы Эйлера [94]:

- модуль комплексной экспоненты равен единице для любых вещественных аргументов: $|e^{j\varphi}| = 1$;
- тригонометрические функции аргумента и комплексная экспонента связаны следующими соотношениями:

$$\cos \varphi = \frac{e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}}{2},$$

$$\sin \varphi = \frac{e^{j\varphi} - e^{-j\varphi}}{2j}.$$

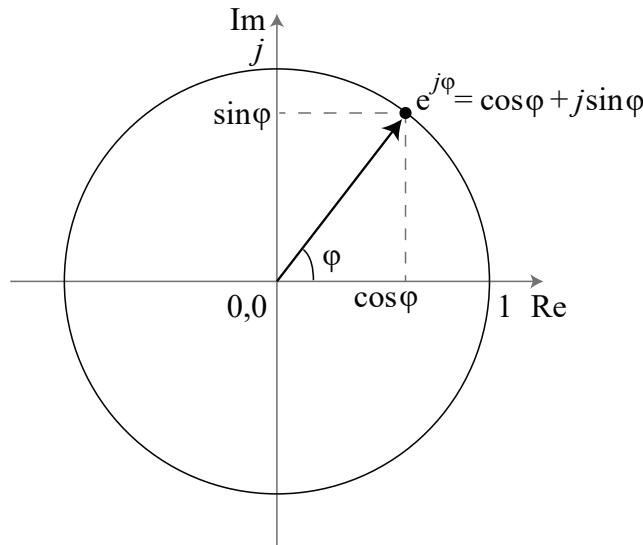


Рис. П1.3. Геометрический смысл формулы Эйлера

С учетом вышесказанного выполним переход к комплексной форме гармонического сигнала. Известно [77], что стандартная общепринятая форма его записи выглядит следующим образом:

$$s(t) = A \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (\text{П1.6})$$

где A — амплитуда сигнала; ω — несущая круговая частота сигнала; φ_0 — начальная фаза сигнала. Однако в большинстве задач удобно представить гармонический сигнал в комплексной форме. Выполним переход с помощью формулы Эйлера

$$\dot{s}(t) = Ae^{j(\omega t + \varphi_0)}. \quad (\text{П1.7})$$

Запись сигнала в форме выражения (П1.7), с одной стороны, является более компактной, с другой стороны, позволяет упрощать ряд математических операций. Следует отметить, что в этом случае сам сигнал $\dot{s}(t)$ автоматически становится комплексным, однако при необ-

ходимости всегда можно перейти к исходной форме записи, в том числе и после различных преобразований.

Иногда можно встретить такое представление выражения (П1.7):

$$s(t) = Ae^{j(\omega t + \phi_0)} = Ae^{j\omega t}e^{j\phi_0} = \dot{A}e^{j\omega t}, \quad (\text{П1.8})$$

где \dot{A} — комплексная амплитуда сигнала, в которую входят все параметры сигнала, не зависящие от времени. Отметим, что во многих случаях (например, при расчетах преобразований в линейных электрических цепях либо линейных систем в целом) можно ограничиться только параметром \dot{A} , поскольку несущая частота сигнала остается неизменной, то есть заменить функцию на числовое значение, что существенно упростит последующие расчеты.

Приложение 2

Текст программы для моделирования РЛИ движущейся многоэлементной цели в среде MATLAB

```
clear
%% ЗАДАНИЕ УСЛОВИЙ СЪЕМКИ
p0=[-100,0,100; 0,0,0; 0,0,0]; % начальное положение многоточечной
цели (столбцы соответствуют x, y, z)
[~,num_p]=size(p0); % подсчет количества элементов цели
v0=[0,0,0]; % линейная скорость движения тела в единицу времени i
V=[7500,0,0]; % линейная скорость движения платформы в единицу
времени i
T_total=2; % общее время обзора
lambda=0.23; % рабочая длина волны
omega=2*pi*3e8/lambda; % рабочая частота
fp=2500; % частота повторения импульсов
T=1/fp; % период импульсов
Height=800000; % высота платформы
Z=Height; % начальное положение по оси Z
teta=30/180*pi; % угол обзора
Y=-Height*tan(teta); % начальное положение по оси Y
X=-sqrt(V(1)^2+V(2)^2+V(3)^2)*T_total/2; % начальное положение по
оси X

%%ЗАДАНИЕ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ЦЕЛИ
%крен
alpha0=0;
alpha=alpha0/180*pi; %(скорость в радианах)
%тангаж
beta0=0;
beta=beta0/180*pi; %(скорость в радианах)
%рыскание
gamma0=0;
gamma=gamma0/180*pi; %(скорость в радианах)
```

```

%%ЗАДАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ
vx(1,:)=[v0(1) v0(1) v0(1)]; % скорость цели в начальный момент времени
vy(1,:)=[v0(2) v0(2) v0(2)];
vz(1,:)=[v0(3) v0(3) v0(3)];
xa(1,:)=[p0(1,1) p0(1,2) p0(1,3)]; % положения цели в начальный момент времени
ya(1,:)=[p0(2,1) p0(2,2) p0(2,3)];
za(1,:)=[p0(3,1) p0(3,2) p0(3,3)];
xab(1,:)=xa(1,:);
yab(1,:)=ya(1,:);
zab(1,:)=za(1,:);
xabg(1,:)=xab(1,:);
yabg(1,:)=yab(1,:);
zabg(1,:)=zab(1,:);
R(1,:)=sqrt((X(1)-xabg(1,:)).^2+(Y(1)-yabg(1,:)).^2+(Z(1)-zabg(1,:)).^2); % дальность до точек в начальный момент времени
q1(1)=(V(1))*(-X(1))+(V(2))*(-Y(1))+(V(3))*(-Z(1));
q11(1,:)=(vx(1,:)-V(1)).*(X(1)-xabg(1,:))+(vy(1,:)-V(2)).*(Y(1)-yabg(1,:))+(vz(1,:)-V(3)).*(Z(1)-zabg(1,:));
vr(1,:)= q11(1,:)./R(1,:);
Votnx(1,:)=vx(1,:)-V(1); % относительные скорости движения цели в начальный момент времени
Votny(1,:)=vx(1,:)-V(2);
Votnz(1,:)=vx(1,:)-V(3);
td(1,:)=2*R(1,:)/3e8; % время задержки импульса в начальный момент времени
fD(1,:)=2*vr(1,:)/lambda; % доплеровский сдвиг частоты зондирующего сигнала в начальный момент времени
phi_echo=[rand(1) rand(1) rand(1)]*2*pi; % смещение фазы отраженного сигнала
u(1,:)=exp(-1j*(fD(1,:)*2*pi.* (0-td(1,:))+phi_echo)); % отраженный сигнал
R0y=sqrt((X(1)-0)^2+(Y(1)-(-5000:5:5000)).^2+(Z(1)-0)^2);
R0=sqrt((ones(1401,1)*R0y).^2+((ones(2001,1)*((-700:700))*V(1)*T)').^2); % дальность до точек для формирования опорной функции (количество отсчетов равно 2001)
R0=R0'; % массив дальностей для построения опорной функции
td0=2*R0/3e8; % время задержки импульса для опорной функции (в предположении неподвижности цели)
h=exp(1j*omega*td0); % опорная функция

%% ПРОЦЕСС СЪЕМКИ
k=2;
for i=0:T_total
    xa(k,:)=(p0(1, :)+v0(1)*(i)); % поворот цели вдоль оси x в текущий момент времени
    ya(k,:)=(p0(2, :)+v0(2)*(i))*cos(alpha*i)-(p0(3,

```

Приложение 2

```
:)+v0(3)*(i))*sin(alpha*i);
za(k,:)=(p0(2,:)+v0(2)*(i))*sin(alpha*i)+(p0(3,
:)+v0(3)*(i))*cos(alpha*i);
xab(k,:)=xa(k,:)*cos(beta*i)+za(k,:)*sin(beta*i); % поворот
цели вдоль оси у в текущий момент времени
yab(k,:)=ya(k,:);
zab(k,:)=-xa(k,:)*sin(beta*i)+za(k,:)*cos(beta*i);
xabg(k,:)=xab(k,:)*cos(gamma*i)-yab(k,:)*sin(gamma*i); % по-
ворт цели вдоль оси z в текущий момент времени
yabg(k,:)=xab(k,:)*sin(gamma*i)+yab(k,:)*cos(gamma*i);
zabg(k,:)=zab(k,:);
vx(k,:)=(xabg(k,:)-xabg(k-1,:))/T; % скорость цели в текущий
момент времени
vy(k,:)=(yabg(k,:)-yabg(k-1,:))/T;
vz(k,:)=(zabg(k,:)-zabg(k-1,:))/T;
X(k)=X(1)+V(1)*i; % координаты платформы в текущий момент
времени
Y(k)=Y(1)+V(2)*i;
Z(k)=Z(1)+V(3)*i;

Votnx(k,:)=vx(k,:)-V(1); % относительная скорость цели в текущий
момент времени
Votny(k,:)=vx(k,:)-V(2);
Votnz(k,:)=vx(k,:)-V(3);
R(k,:)=sqrt((X(k)-xabg(k,:)).^2+(Y(k)-yabg(k,:)).^2+(Z(k)-
zabg(k,:)).^2); % дальность до точек цели в текущий момент времени
vr(k,:)=((Votnx(k,:)-xabg(k,:)).*(X(k)-
xabg(k,:))+(Votny(k,:)-yabg(k,:)).*(Y(k)-yabg(k,:))+(Votnz(k,:)-
zabg(k,:)).*(Z(k)-zabg(k,:)))./R(k,:); % радиальная компонента
относительной скорости
td(k,:)=2*R(k,:)/3e8; % время задержки импульса в текущий
момент времени
fD(k,:)=2*vr(k,:)/lambda; % доплеровский сдвиг частоты зон-
дирующего сигнала в текущий момент времени
u(k,:)=exp(-1j*(fD(k,:)*2*pi.*td(k,:))+phi_%
echo+omega*td(k,:)); % отраженный сигнал, содержащий отклики от
многоточечной цели
k=k+1;
end

%% ФОРМИРОВАНИЕ СУММАРНОГО ОТРАЖЕННОГО СИГНАЛА
u0=randn(length(0:T:T_total)+1,2001)/100+1j*randn(length(0:T:T-
total)+1,2001)/100; % пустой сигнал, состоящий из шума
mtd0=min(td0');
mtd=min(td);
for i=1:num_p
    a=(mtd0-mtd(i));
    ind(i)=find(a(2:end).*a(1:end-1)<0);
```

```
u0(:,ind(i))=u0(:,ind(i))+u(:,i);
end

%% СИНТЕЗИРОВАНИЕ АПЕРТУРЫ
for i=1:2001
    radar_image0=filter(h(i,:),1,u0(:,i));
    radar_image(:,i)=[radar_image0(701:end); zeros(700,1)];
end

%% ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СМЕЩЕНИЯ ОТКЛИКА ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕЛЕЙ
figure('Position', [100 300 600 450])
plot(abs(radar_image), 'b');
title('SAR response shift for motion target');
xlabel('azimuth');
ylabel('intensity');
xlim([0 5000]);
ylim([0 1500]);
grid on

%% ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СМЕЩЕНИЯ ОБРАЗОВ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕЛЕЙ
figure('Position', [750 300 1000 450])
imagesc((abs(radar_image(1500:3500,900:1100))'))
colormap hot
```

Список библиографических ссылок

1. Официальный сайт компании MathWorks. — URL: <https://www.mathworks.com/>(дата обращения: 29.09.2020).
2. ISO 80000–2:2009. Quantities and units – Part 2: Mathematical signs and symbols to be used in the natural sciences. — URL: <https://www.iso.org/standard/31887.html> (дата обращения: 29.09.2020).
3. Острийковский В. А. Информатика. Теория и практика. — М. : Оникс, 2008. — 608 с.
4. Математика в техническом университете. Математическая статистика (вып. 17) / под ред. В. С. Зарубина, А. П. Крищенко. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. — 424 с.
5. Гонсалес Р.С, Вудс Р. С. Цифровая обработка изображений / пер. с англ. под ред. П. А. Чочиа. — М. : Техносфера, 2005. — 1073 с.
6. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В. С. Верба, Л. Б. Неронский, И. Г. Осипов, В. Э. Турук ; под ред. В. С. Вербы — М. : Радиотехника, 2010. — 680 с.
7. Бакулев П. А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. — М. : Радиотехника, 2004. — 320 с.
8. Observing Systems Capability Analysis and Review Tool: WorldView-2. — URL: <https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/499> (дата обращения: 29.09.2020).
9. Официальный сайт компании «СКАНЭКС». — URL: <http://www.scanex.ru/>(дата обращения: 29.09.2020).
10. Лобанов М. М. Развитие советской радиолокационной техники. — М. : Воениздат, 1982. — 239 с.
11. Дубошин Г. Н. Небесная механика. Основные методы и задачи. — М. : Наука, 1968. — 800 с.

12. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ : учебник для радиотехнических спец. вузов. — М. : Высшая школа, 1988. — 432 с.
13. Конникова В. К., Лехт Е. Е., Силантьев Н. А. Практическая радиоастрономия. — М. : Изд-во Московского ун-та, 2011.— 303 с.
14. Сколник М. Справочник по радиолокации. В 4 т. Т. 1. Основы радиолокации / пер. с англ. под общ. ред. К. Н. Трофимова. — М. : Советское радио, 1976. — 456 с.
15. Мацюра А. В. Использование различных типов радаров в орнитологических исследованиях // Вестник ДНУ. Серия «Биология. Экология». — 2005. — Вып. 13, № 1. — С. 159–164.
16. Масленникова И. Л., Чистова Г. К Активные радиолокационные системы обнаружения наземных объектов // Материалы III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» ИРЭ РАН. — 2009. — С. 278–286.
17. ГОСТ 24375–80. Радиосвязь. Термины и определения. — М. : Стандартинформ, 2005. — 70 с.
18. Официальный сайт группировки спутников COSMO-SkyMed. — URL: <http://www.cosmo-skymed.it/en/index.htm> (дата обращения: 29.09.2020).
19. Доросинский Л. Г., Виноградова Н. С. Обработка информации в многопозиционных космических РСА : монография. — М. : Издательский дом «Академии Естествознания», 2019. — 262 с.
20. Защита от радиопомех / М. В. Максимов, М. П. Бобнев, Б. Х. Кривицкий [и др.] ; под ред. М. В. Максимова. — М. : Советское радио, 1976. — 496 с.
21. Пасынков В. В., Чиркин Л. К. Полупроводниковые приборы : учебник для вузов. — 6-е изд. — СПб. : Лань, 2002. — 480 с.
22. Большая советская энциклопедия. В 30 т. / под ред. А. М. Прохорова. — 3-е изд. — М. : Советская энциклопедия, 1969–1978.
23. Самойлов К. И. Морской словарь. В 2 т. Т. 1. А-Н. — М. : Военно-морское изд-во НКВМФ СССР, 1939. — 654 с.
24. Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: applications, techniques, and technology / Ch. Elachi, T. Bicknell, R. L. Jordan, Ch. Wu // Proceedings of the IEEE. — 1982. — Vol. 70, № 10. — P. 1174–1209.

25. Коберниченко В. Г. Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 220 с.
26. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — Изд. 4-е. — М. : Наука, 1969. — 576 с.
27. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника / под ред. Т. М. Любимовой. — М. : Советское радио, 1966. — 677 с.
28. Официальный сайт Канадского космического агентства. Миссия RADARSAT. — URL: <https://www.asc-csa.gc.ca/eng/satellites/radarsat/default.asp> (дата обращения: 29.09.2020).
29. Савельев И. В. Курс общей физики / под ред. В. А. Григоровой, Л. И. Гладневой, Е. А. Юкова. Том III. Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных частиц. — М. : Наука, 1987. — 317 с.
30. Описание модуля Photomod RADAR. Описание интерферометрического процессора. Ч. 1–4. — М. : ЗАО «Ракурс», 2010.
31. Официальный сайт Японского космического агентства. Миссия ALOS. — URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/index.htm> (дата обращения: 29.09.2020).
32. Официальный сайт Аргентинского космического агентства. Миссия SAOCOM. — URL: <https://www.argentina.gob.ar/cien-cia/conae/satelite-saocom-contribucion-argentina-al-sistema-siasge> (дата обращения: 29.09.2020).
33. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник ALOS. — URL: <https://directory.eo-portal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos> (дата обращения: 29.09.2020).
34. Lu Zh., Wicks Jr. Ch. Characterizing 6 August 2007 Crandall Canyon mine collapse from ALOS PALSAR InSAR//Geomatics, Natural Hazards and Risk. — 2010. — Vol. 1, № 1. — P. 85–93.
35. Дагаев М. М. Наблюдения звездного неба. — 6-е изд., доп. — М. : Наука, 1988. — 176 с.
36. Официальный сайт Японского космического агентства. Миссия ALOS-2. — URL: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm> (дата обращения: 29.09.2020).
37. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник ALOS-2. — URL: <https://directory>

- eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alo-2 (дата обращения: 29.09.2020).
38. Официальный сайт Японского космического агентства. Миссия ALOS-3. — URL: <https://global.jaxa.jp/projects/sat/alo3/> (дата обращения: 29.09.2020).
 39. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Группировка COSMO-SkyMed. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cosmo-skymed> (дата обращения: 29.09.2020).
 40. Описание миссии и продуктов COSMO-SkyMed [Электронное издание]. — 2019. Вып. 3. — 151 с. — URL: https://www.asi.it/wp-content/uploads/2019/08/COSMO-SkyMed-Mission-and-Products-Description_rev3-1.pdf.
 41. Официальный сайт Европейского космического агентства. Космический аппарат ERS. — URL: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/ers> (дата обращения: 29.09.2020).
 42. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник ERS-1. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/ers-1> (дата обращения: 29.09.2020).
 43. Официальный сайт Европейского космического агентства. Космический аппарат ERS-2. — URL: <https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-missions/ers-2/> (дата обращения: 29.09.2020).
 44. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник ERS-2. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/ers-2> (дата обращения: 29.09.2020).
 44. Global wind speed retrieval from SAR / J. Horstmann, H. Schiller, J. Schulz-Stellenfleth, S. Lehner // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. — 2003. — Vol. 41, № 10. — P. 2277–2286.
 45. Официальный сайт Европейского космического агентства. Космический аппарат Envisat. — URL: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/envisat> (дата обращения: 29.09.2020).
 46. Astronomical Table of the Sun, Moon and Planets. — 3rd edition / ed. J. Meeus. — Richmond: Willmann-Bell, 1995. — 491 p.

47. Официальный сайт мирового центра по сбору данных дистанционного зондирования земной атмосферы. Описание платформы космического аппарата Envisat. — URL: <http://wdc.dlr.de/sensors/sciamachy/envisat.php> (дата обращения: 29.09.2020).
48. Официальный сайт сервиса Landmap. Технические характеристики сенсора ASAR. — URL: <http://learningzone.rspssoc.org.uk/index.php/Datasets/ENVISAT-ASAR/Characteristics-ASAR> (дата обращения: 29.09.2020).
49. Официальный сайт сервиса CLOBICE. — URL: <http://www.globice.info/Section.php?pid=13> (дата обращения: 29.09.2020).
50. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Группировка спутников RCM. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/rct> (дата обращения: 29.09.2020).
51. Официальный сайт Европейского космического агентства. Космический аппарат RADARSAT-1. — URL: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/r/radarsat-1> (дата обращения: 29.09.2020).
52. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник RADARSAT-2. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/radarsat-2> (дата обращения: 29.09.2020).
53. Описание продуктов RADARSAT-2 [Электронное издание]. — 2018. — Вып. 1/14. — 91 с. — URL: https://mdacorporation.com/docs/default-source/technical-documents/geospatial-services/52-1238_rs2_product_description.pdf.
54. Официальный сайт Европейского космического агентства. Группировка RCM. — URL: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/r/rct> (дата обращения: 29.09.2020).
55. The RADARSAT Constellation Mission (RCM): extending operational marine surveillance for environment Canada/M. Manore, R. DeAbreu, V. Zabeline [et al.]//Proceedings of ASTRO 2010, 15th CASI (Canadian Aeronautics and Space Institute) Conference. — 2010. — Р. 136–141.
56. Официальный сайт миссии Sentinel (ESA). Спутник Sentinel-1. — URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1> (дата обращения: 29.09.2020).

57. Sentinel-1 data available on AWS and through Sentinel Hub. — URL: <https://medium.com/sentinel-hub/sentinel-1-data-available-on-aws-and-through-sentinel-hub-ecc51c910db6> (дата обращения: 29.09.2020).
58. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник Sentinel-2. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2> (дата обращения: 29.09.2020).
59. Официальный сайт миссии Copernicus. Спутник Sentinel-2. — URL: <https://www.copernicus.eu/en/media/images/sentinel-2-1> (дата обращения: 29.09.2020).
60. Официальный сайт миссии Sentinel (ESA). Спутник Sentinel-3. — URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3> (дата обращения: 29.09.2020).
61. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник Sentinel-5P. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-5p> (дата обращения: 29.09.2020).
62. Официальный сайт Европейской организации спутниковой метеорологии (EUMETSAT). Цели миссии Sentinel-4. — URL: <https://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/FutureSatellites/CopernicusSatellites/Sentinel4/index.html> (дата обращения: 29.09.2020).
63. Официальный сайт миссии Sentinel (ESA). Спутник Sentinel-5. — URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-5> (дата обращения: 29.09.2020).
64. Официальный сайт миссии Copernicus. — URL: <https://www.copernicus.eu/en> (дата обращения: 29.09.2020).
65. Обзор систем землеобзора от европейского космического агентства (ESA). Спутник TerraSAR-X. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/terrasar-x> (дата обращения: 29.09.2020).
66. Описание продуктов TerraSAR-X [Электронное издание]. — 2015. — Вып. 2.1. — 24 с. — URL: https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_20171004_tsxx-airbusds-ma-0009_tsx-productguide_i2.01.pdf.
67. Официальный сайт сервиса GEOCENTO. Коллекция космоснимков спутника TerraSAR-X. — URL: <https://geocento.com/>

- com/satellite-imagery-gallery/terrasar-x/(дата обращения: 29.09.2020).
68. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник TanDEM-X. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-x> (дата обращения: 29.09.2020).
69. Официальный сайт Европейского космического агентства. Спутник TanDEM-X. — URL: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/t/tandem-x> (дата обращения: 29.09.2020).
70. Официальный сайт компании Airbus. Описание продуктов WorldDEM. — URL: <https://www.intelligence-airbusds.com/en/8703-worlddem> (дата обращения: 29.09.2020).
71. Официальный сайт продукта SRTM. — URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/>(дата обращения: 29.09.2020).
72. GIS resources. WorldDEM. — URL: <http://www.gisresources.com/reach-accurate-heights-worldtm-dataset/>(дата обращения: 29.09.2020).
73. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник PAZ. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/p/paz> (дата обращения: 29.09.2020).
74. Официальный сайт Европейского космического агентства. Спутник PAZ. — URL: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/p/paz> (дата обращения: 29.09.2020).
75. Обзор систем землеобзора от Европейского космического агентства (ESA). Спутник SEOSAT-Ingenio. — URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/seosat> (дата обращения: 29.09.2020).
76. Баскаков А. И., Лукашенко Ю. И., Щернакова Л. А. Зондирующие радиолокационные сигналы : учебное пособие / под ред. А. Ф. Богомолова. — М. : Изд-во МЭИ, 1990. — 79 с.
77. Боголюбов А. Н. Математики. Механики : биографический справочник. — Изд. 2-е. — Киев : Наукова Думка, 1983. — 639 с.
79. Ахметьянов В. Р., Пасмурев А. Я. Обработка радиолокационных изображений в задачах дистанционного зондирования Земли//Зарубежная радиоэлектроника. — 1987. — № 1. — С. 70–79.

80. Белокуров А. А. Методы сглаживания спектр-шума на радиолокационных изображениях земной поверхности // Зарубежная радиоэлектроника. — 1990. — № 6. — С. 26–38.
81. Ko J., Lee J.-H. Center-weighted median filters and their application to image enhancement // IEEE Trans. — 1991. — № 38. — P. 984–993.
82. Lee J.-S. Digital image smoothing and the sigma filter // Computer vision, Graphics and Image Processing. — 1983. — Vol.24. — P. 255–269.
83. Techniques and algorithms of speckle noise reduction for One-Look SAR Images / V. V. Lukin, V. P. Melnik, A. B. Pogrebniak, A. A. Zelensky // Proceedings of the EUSAR'96. — 1996. — P. 167–170.
84. Pratt W. K. Digital image processing. — Second ed. — New York : John Wiley& Sons, 1991. — 698 p.
85. Ivanov O.Yu., Vorobyova A. S. Study of neural network algorithm of the earth remote sensing data clustering // CriMiCo 2014–2014 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. — 2014. — P. 132–135.
86. Радиолокационные станции обзора Земли / Г. С. Кондратенков, В. А. Потехин, А. П. Реутов, Ю. А. Феоктистов ; под ред. Г. С. Кондратенкова. — М. : Радио и связь, 1983. — 271 с.
87. Wu K. H., Vant M. R. A SAR focusing technique for imaging targets with random motion // Proceedings of IEEE NAECON. — 1984. — Vol. 1. — P. 289–295.
88. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефона. В 82 т. и 4 доп. т. — М. : Терра, 2001. — 40 726 с.
89. Официальный сайт компании ESRI. Геоинформационный ПО ArcGIS. — URL: <https://www.esri-cis.ru/products/>(дата обращения: 29.09.2020).
90. Официальный сайт геологической службы США (USGS). Миссия Landsat. — URL: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/>(дата обращения: 29.09.2020).
91. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. — М. : Логос, 2001. — 264 с.
92. Математическая энциклопедия: в 5 т. / под ред. И. М. Виноградова. — М. : Советская Энциклопедия, 1979. — 2921 с.

93. Энциклопедия элементарной математики. Книга 1. Арифметика / под ред. П. А. Александрова, А. И. Маркушевича, А. Я. Хинчина. — Л. : Печатный двор, 1951. — 448 с.
94. Ahlfors L. V. Complex analysis. An introduction to the theory of analytic functions of one complex variable. — Third edition. — Harvard University: McGraw-Hill Book Company, 1979. — 317 с.
95. Шабат Б. В. Введение в комплексный анализ. — М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. — 566 с.

Учебное издание

**Доросинский Леонид Григорьевич,
Виноградова Нина Сергеевна**

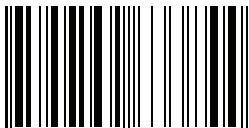
**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ
РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Редактор И. В. Коршунова
Верстка О. П. Игнатьевой

Подписано в печать 29.10.2021. Формат 70×100/16.
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 18,7.
Уч.-изд. л. 12,7. Тираж 30 экз. Заказ 222.

Издательство Уральского университета
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
<http://print.urfu.ru>



9 785799 633844