

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

621.396.916

**ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ
РАДИОЛОКАТОРОМ БОКОВОГО ОБЗОРА *)****Г. Дженсен, Л. Грэхем, Л. Порчелло, Э. Лейт**

Радиолокационная антенна, установленная на борту самолета и направленная в сторону, позволяет записывать изображения местности в микроволновом диапазоне в мельчайших подробностях, независимо от погоды или времени дня или ночи.

Первые аэроизображения земной поверхности были получены в середине XIX века с воздушных шаров. Они были сделаны для облегчения составления топографических карт и ведения разведки. По мере совершенствования камер, пленок и самолетов аэроизображения стали находить себе все более широкие применения. В 20-е годы фотографии, сделанные с самолетов по вертикальному направлению, легли в основу воздушной аэрофотограмметрии. В настоящее время почти все геологические или топографические карты строятся по изображениям земной поверхности, полученным с самолета или с искусственного спутника.

В 50-е годы были созданы устройства для получения изображений, чувствительные к излучению, лежащему за пределами видимой области спектра, в частности в инфракрасной области. С появлением таких приемников диапазон длин волн электромагнитного спектра, в котором стало возможным наблюдение поверхности Земли, простерся от 0,4 мкм (самые короткие волны в видимой области спектра) до 10 мкм (тепловое инфракрасное излучение). Все применявшиеся для этой цели приемники излучения регистрировали энергию солнечного света, отраженного от местности и созданных человеком объектов, а также энергию теплового излучения, зависящую от их температуры и относительной излучательной способности.

В области видимых и инфракрасных волн атмосфера поглощает значительную долю проходящего через нее излучения, даже если воздух прозрачен. В облачную или дождливую погоду работа чувствительных приемных элементов существенно ухудшается. Поэтому топограф мечтает

*) Jensen Homer, Grahams L. C., Porcellio Leonard J., Leith Emmett N. Side-looking Airborne Radar.— *Scientific American*, October 1977, v. 237, No. 4, pp. 84—95.— Перевод Г. В. Скроцкого и С. Д. Кузьмичева.

Г. Дженсен — вице-президент по радиолокационным исследованиям «Aero-Service» — отделения «Litton Industries»; Л. Грэхем — управляющий по исследованию и разработке техники в Аризонском отделении «Goodyear Aerospace Corp»; Л. Порчелло — управляющий «Tucson», штат Аризона, — отделения «Science Applications, Inc.»; Э. Лейт — главный специалист «Willow Run Laboratories», штат Мичиган, США.

© Scientific American, Inc., 1977.

© Перевод на русский язык, издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы, «Успехи физических наук», 1980.

о некоей волшебной камере, с помощью которой можно с воздуха получать изображения земной поверхности независимо от условий ее освещенности Солнцем и погоды.

Требования, которые предъявляются к не зависящей от погодных условий, способной работать ночью или днем системе получения изображений в основном ясны. Для того чтобы не зависеть от солнечного света, она должна иметь собственный источник освещения. Чтобы его излучение могло проникать сквозь тучи, система должна работать в таком диапазоне, в котором поглощение и рассеяние на водяных парах достаточно мало. Система, удовлетворяющая этим двум основным требованиям, существует: это радиолокационная система (РЛС), работающая в СВЧ диапазоне на длинах волн от 1 до 30 см.

РЛС содержит источник излучения, который обеспечивает «освещение» объекта наблюдения. Атмосфера и погодные условия слабо влияют на распространение микроволн определенных частот. РЛС позволяют следить за погодой с земли и со спутников и используются для контроля воздушного движения. Они применялись также для измерения расстояний до Луны и планет. Хотя волны СВЧ диапазона в сотни тысяч раз длиннее, чем волны видимого света, они все-таки достаточно коротки, чтобы разрешать достаточно мелкие детали, обнаружение которых необходимо для геологических и географических целей.

РЛС, работающая на таких волнах, установленная на борту самолета, позволяет получать изображения земной поверхности, на которых хорошо видны детали рельефа. В этой статье мы ограничимся рассмотрением радиолокационной системы бокового обзора, установленной на самолете.

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СИСТЕМЫ

Возникает очевидный вопрос: почему антenna радара должна быть направлена в сторону? Почти каждый знаком с системой кругового обзора, которая воспроизводит на электронно-лучевой трубке изображение, полученное с помощью вращающейся антенны. Например, в телевизионных сообщениях о погоде используют такую систему для демонстрации выпадения осадков в зоне ее действия. В РЛС кругового обзора растр электронно-лучевых трубок вращается синхронно с антенной и изменяющаяся интенсивность отраженного излучения проявляется через изменяющуюся яркость сканирующей точки. Изображение каждого сканирования некоторое время сохраняется электронно-лучевой трубкой, так что общая картина не исчезает.

Как показал опыт, изображения, полученные с помощью установленных на борту самолета РЛС кругового обзора, часто оказываются неотчетливыми. Это происходит из-за того, что большинство бортовых РЛС кругового обзора весьма малы, а, как известно, хорошее угловое разрешение может быть получено только в том случае, если система получения изображений имеет большую апертуру по сравнению с длиной волны принимаемого излучения. Иными словами, разрешение линзы или антенны с большой апертурой выше, чем разрешение линзы или антенны с малой апертурой. Предельное угловое разрешение пропорционально отношению принимаемой длины волны к размеру апертуры. На самолете трудно установить вращающуюся антенну больших размеров, но зато на нем легко устанавливается неподвижная антenna длиной около 5 м, излучающая в сторону.

Самолетная РЛС бокового обзора формирует изображения, в которых зарегистрированы отражающие свойства местности для микроволн. Изображения, хранимые на фотопленке, имеют сходство с обычными фото-

графиями, полученными с воздуха, однако между ними существуют и некоторые фундаментальные отличия. В отличие от аэрофотографии, полученной с помощью отраженного солнечного света, антенна РЛС сама является для наблюдаемой местности источником освещения, а изображение формируется за счет отраженного излучения радара. Можно считать, что волны от радара распространяются прямолинейно, поэтому области, закрываемые холмами или другими крупными вертикальными объектами, не освещаются и, следовательно, не возвращают обратно СВЧ импульсы. Затемненные участки на радарном изображении местности воспринимаются как темные пустоты. Они не похожи на слабо освещенные рассеянным атмосферой солнечным светом участки земной поверхности, находящиеся в тени, например сфотографированные при восходящем или заходящем солнце и слабо освещаемые рассеянным атмосферой светом. Характер радиолокационного изображения зависит от длины волны и поляризации падающего сигнала, а также геометрических характеристик и электрических свойств отражающих участков местности. Давайте рассмотрим характер изображения в зависимости от длины волны сигнала и геометрических свойств местности.

ОТРАЖЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ

В зависимости от соотношения между длинами применяемых для наблюдения электромагнитных волн и характерными размерами неровностей местности поверхность может оказаться шероховатой или гладкой. Поверхность, шероховатая для длины волны видимого света 0,5 мкм,

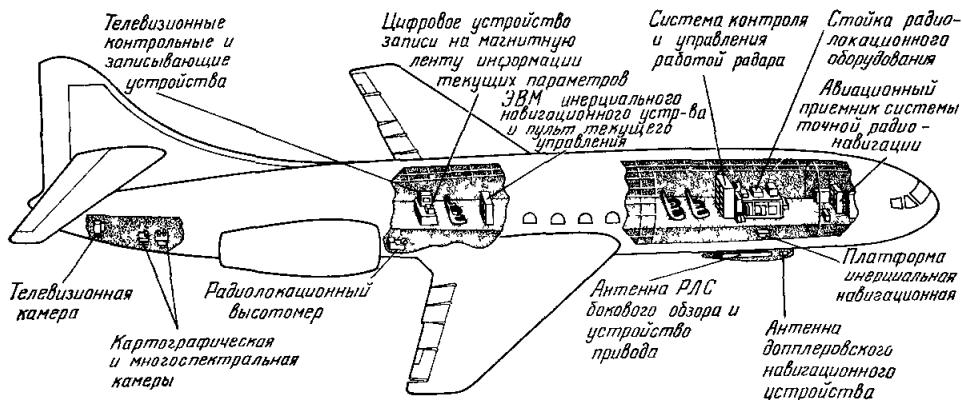


Рис. 1. РЛС бокового обзора, построенная «Goodyear Aerospace Corp.», установлена на самолете «Каравелла», принадлежащем «Aero-Service Division» «Западной Геофизической компании Америки».

Ведение самолета точно по курсу осуществляется запрограммированной инерциальной навигационной системой, которая контролирует также многие показания системы бокового обзора. Другие камеры на борту самолета (телеизионные, картографические и многоспектральные) обеспечивают дополнительный охват местности в видимом и инфракрасном диапазоне.

может оказаться гладкой для микроволн с длиной волны 3 см. Шероховатая поверхность рассеивает падающее излучение во всех направлениях, возвращая только малую ее часть антенне. Гладкая поверхность отражает падающее излучение в одном определенном направлении, действуя как зеркало. Если гладкая поверхность расположена перпендикулярно к лучу радара, то энергия, возвращенная антенне, велика; если она расположена под углом, отличным от прямого, то на антенну ничего не возвращается. Некоторые детали рельефа местности, например кукурузное поле, являются

ся диффузно отражающими объектами как в видимой, так и в СВЧ области спектра. Другие детали, например бетонированная автомобильная стоянка, диффузно отражают в видимой области и зеркально в СВЧ области. Оказывается, что при получении изображений в СВЧ диапазоне большее число объектов являются зеркально отражающими, чем при фотографировании в видимом свете.

Замечательными зеркальными отражателями являются гладкие водные поверхности. Так как их рассматривают обычно не под прямыми углами к лучу радара, то от них ничего не возвращается к антенне радара. В результате на изображениях, получаемых с помощью РЛС бокового обзора, реки и озера кажутся совершенно черными. Напротив, связанные вертикальные и горизонтальные поверхности (например, здание

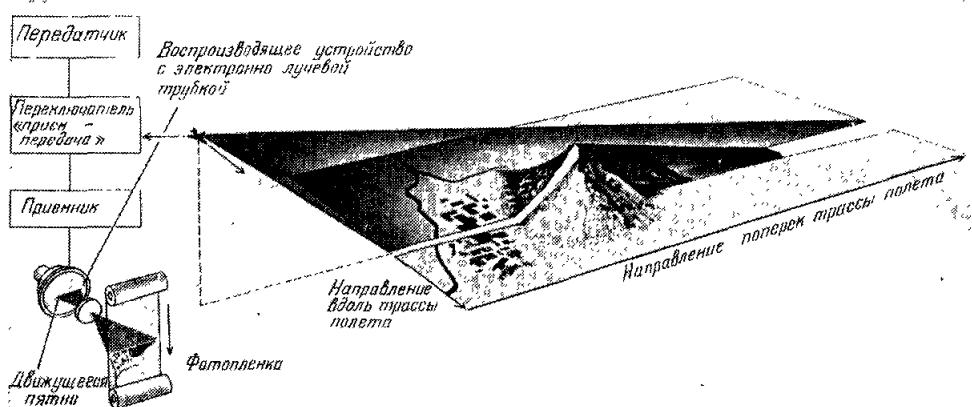


Рис. 2. Геометрия работы радиолокатора бокового обзора показана для воображаемого примера съемки самолетом горной местности.

Антенна на днище самолета излучает короткие электромагнитные импульсы СВЧ диапазона узким веерообразным пучком под прямыми углами к траектории полета самолета. При падении каждого импульса на местность он рассеивается, и часть его отражается обратно к самолету. Здесь он принимается той же антенной и посыпается к чувствительному приемнику. В приемнике возникает сигнал, амплитуда которого зависит от величины микроволновой энергии, принятой в какой-то момент. Этот сигнал управляет яркостью движущейся светящейся точки на экране электронно-лучевой трубы, которая записывается на движущуюся узкую фотопленку. Так как микроволны распространяются по прямым линиям, то области, типа лежащих на обратной стороне горы, не облучаются, не отражают импульсы, и поэтому на радиолокационном изображении они кажутся черными пустотами.

у дороги) могут действовать совместно, образуя уголковый отражатель, возвращающий большую часть энергии обратно антенне. Таким образом, радиолокационный приемник воспримет такие поверхности как в 1000 раз более яркие, чем диффузные поверхности аналогичного размера. В городах имеется множество таких отражателей для волн СВЧ диапазона.

Геометрические размеры фотографического изображения определяются углом между лучами, входящими в линзу от объекта или пейзажа, который сохраняется для лучей, прошедших через линзу и экспонирующей пленку. Размер изображения удаленного объекта обратно пропорционален расстоянию от объекта до линзы. Геометрические соотношения между объектами в предметной плоскости перед линзой сохраняются в параллельной ей плоскости изображений позади линзы; соотношения между наклонными объектами в предметной плоскости будут подчиняться некоторым тригонометрическим соотношениям в плоскости изображений.

Геометрия записи и изображения с помощью РЛС бокового обзора — иная. Изображение в одном направлении, формируемое такой системой, создается при пробегании импульсов радара поперек трассы полета само-

лета, изображение в другом направлении образуется благодаря движению несущего радар самолета параллельно трассе полета. При определении дальности короткий микроволновой импульс от мощного передатчика имеет форму вертикального веерообразного пучка. Он создается с помощью длинной антенны, расположенной на днище самолета и направленной под прямым углом к направлению полета. Импульсы распространяются со скоростью света; время, затрачиваемое импульсом на прохождение

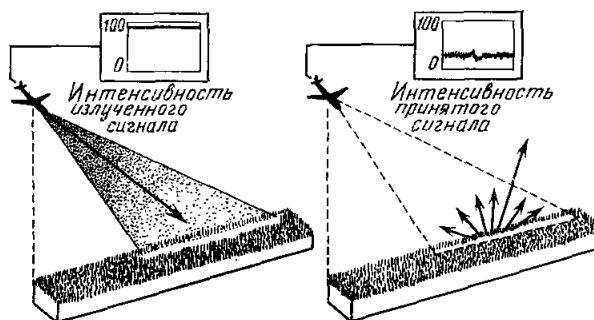


Рис. 3. Диффузный отражатель, например кукурузное поле, рассеивает энергию СВЧ импульса во всех направлениях, возвращая обратно к антенне только малую ее часть.

до объекта и возвращение к самолету, пропорционально расстоянию от объекта до траектории полета самолета.

Интенсивность возвращавшегося обратно сигнала управляет интенсивностью яркой точки, движущейся по экрану электронно-лучевой трубы со скоростью, пропорциональной скорости радиоимпульса. Последовательные положения точки соответствуют последовательным участкам поперек траектории полета. Таким образом, от каждого импульса радиолокационного передатчика на экране электронно-лучевой трубы появляется строка с переменной интенсивностью. Перекрывающаяся последовательность таких строк записывается на узкую фотопленку, движущуюся перпендикулярно к направлению отклонения строк, со скоростью, пропорциональной скорости самолета. Так, линия за линией, на пленке создается непрерывное изображение местности.

Возвышенные места в изображении смещаются от положения, которое они занимали бы, если их рассматривать непосредственно сверху. Причина этого состоит в том, что та часть радиоимпульса, которая отражается от возвышенных областей, удаленных от самолета, возвращается к антенне раньше, чем другая часть импульса, которая отражается от расположенных ниже областей. Поэтому изображения возвышенных областей местности, расположенных ближе к самолету, смещаются к траектории полета самолета. Такого рода смещения появляются на всех радиолокационных изображениях возвышенных областей. В фотографии все объекты с одинаковыми угловыми координатами при рассмотрении пленки через лупу кажутся совпадающими. В радиолокационном изображении все объекты, равноудаленные от антенны при однократном сканировании, также кажутся совпадающими на изображении. Поэтому радиолокационное изображение является грубым аналогом фотографического изображения, полученного при помощи гипотетической камеры, расположенной на линии, перпендикулярной к отрезку, соединяющему объект и радиолокационную антенну.

По сравнению со скоростью импульса самолет движется очень медленно, а веерообразный пучок СВЧ излучения всегда направлен перпендикулярно к направлению полета самолета. В результате этого оказывается, что в направлении поперек трассы полета самолета изображения объектов смещены в сторону самолета, в зависимости от их высоты. В направлении вдоль трассы какие-либо изменения в перспективе полностью отсутствуют.

Масштаб и вид радиолокационного изображения в поперечном направлении по отношению к трассе полета определяется скоростью света,

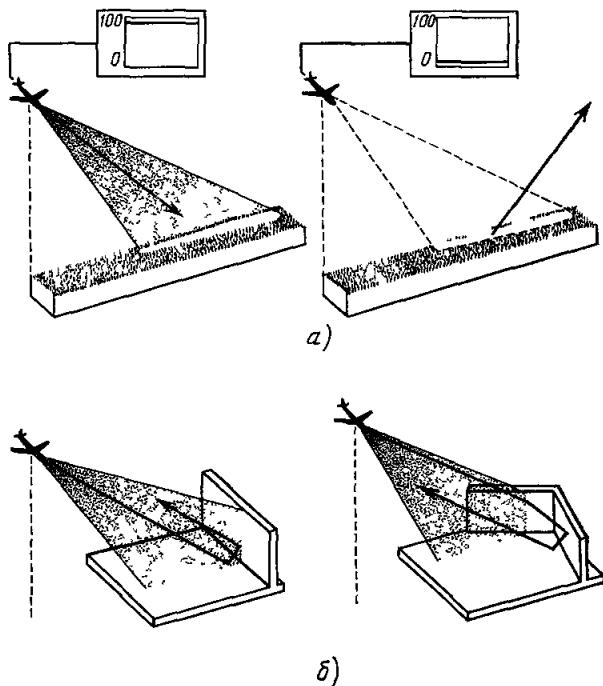


Рис. 4. Зеркальный отражатель, например гладкая поверхность воды или заасфальтированная площадка, действует подобно зеркалу и отражает энергию СВЧ импульса в строго определенном направлении.

Если поверхность расположена не под прямым углом к антенне, то к антenne ничего не возвращается (рис. а), и на радиолокационном изображении поверхность будет казаться черной. Связанные поверхности, например улицы или строения, однако, действуют совместно, образуя угловые отражатели (рис. б), которые возвращают к антenne значительную долю падающей на них энергии.

тогда как масштаб и вид изображения в продольном направлении трассы полета определяется скоростью самолета. Согласование двух независимых масштабов и выравнивание их на конечном изображении является одной из наиболее важных проблем, возникающих при проведении съемок земной поверхности с помощью радиолокатора.

На практике эта проблема, как и многие другие возникающие здесь сложные проблемы, связанные с созданием удовлетворительного радиолокационного изображения, были решены установкой на самолете инерциальной навигационной системы.

Инерциальная навигационная система использует управляющую ЭВМ, которая запрограммирована таким образом, чтобы обеспечить обработку получаемой разнообразной информации и контролировать выполнение необходимых условий для радиолокационной съемки. Она ведет самолет на соответствующей высоте по большим круговым траекториям

длиной в 1000 км. При этом каждая траектория почти параллельна предыдущей, так что из набора полосок можно составить мозаику местности. Инерциальное навигационное устройство ведет самолет над облаками или через них днем и ночью без коррекции по визуальным ориентирам и без помощи радионавигации.

Подавая сигналы автопилоту самолета, инерциальное навигационное устройство держит самолет строго на заданном курсе, не допуская маневров, которые могли бы испортить изображение. Более того, угловые чувствительные элементы инерциального навигационного устройства управляют положением антennы радиолокатора по трем угловым координатам (рыскания, вращения и тангажа), действуя таким образом, чтобы антenna всегда была направлена в сторону земли под постоянным углом по отношению к линии полета самолета. Измеритель скорости инерциальной системы определяет как частоту импульсов, излучаемых радиолокатором, так и скорость движения пленки с записываемым изображением. Скорость движения точки по экрану электронно-лучевой трубки определяет поперечный масштаб изображения, а скорость движения пленки — продольный.

СИНТЕЗИРОВАНИЕ АПЕРТУРЫ

Так как РЛС бокового обзора определяет расстояние до объектов на местности с помощью СВЧ импульсов, то разрешающая способность изображения по координате поперек траектории пропорционально пространственной длине радиоимпульса. Используемые импульсы очень коротки, и сигналы, отраженные от двух удаленных объектов, могут быть разрешены только в том случае, если объекты удалены друг от друга по крайней мере на половину пространственной длины импульса. Например, импульс с длительностью в 10^{-7} с имеет пространственную длину 30 м, поэтому он позволяет разрешить объекты на расстоянии не менее 15 м. Если требуется большее разрешение, то пространственная длина импульса должна быть уменьшена.

В то же время разрешающая способность изображения по координате вдоль траектории, т. е. вдоль дорожки записи, пропорциональна ширине луча радиоволн, посыпаемого антенной.



Рис. 5. На радиолокационном изображении реки Огайо в восточной части штатов Огайо и Кентукки хорошо видно, как различно проявляется действие диффузных и зеркальных отражателей.

На картинке город Портсмут, расположенный на северном берегу реки слева вверху, виден как скопление зеркальных отражателей. Западнее Портсмута река Систо слиивается с Огайо. Заметим, что воды обеих рек кажутся черными. Дорога, идущая вдоль подножия холмов на западной стороне реки в Кентукки — это Федеральное шоссе № 23. Земля на восток от реки — это край Национального заповедника Уэйн. На этом радиолокационном изображении холмистой местности заметны мельчайшие подробности и видны четко очерченные контуры поверхности воды. Два моста, пересекающие северную часть реки, являются перевосходными зеркальными отражателями СВЧ волн, так же как и шлюзы и плотина в середине. Вытянутые белые пятна в середине реки — баржи. Прямые разрезы через лесистые холмы — это лесные просеки для линий электропередач. Местность на изображении имеет размер 10 на 15 миль. Это изображение представляет собой лишь малую часть мозаики изображений, охватывающей около 40 000 кв. миль территории штатов Огайо, Кентукки, Зап. Вирджиния и Вирджиния, сделанной для изучения геологических свойств, связанных с запасами природного газа.

Два равноудаленных объекта, расположенные вдоль трассы полета, могут быть разрешены, если расстояние между ними больше, чем ширина диаграммы направленности антенны для такой дальности. И наоборот, если они одновременно находятся в радиолокационном луче, то антенна примет отраженные от них импульсы одновременно, а на изображении оно появится как единый сильный отклик. Поэтому угловая ширина диаграммы направленности антенны определяет разрешение вдоль траектории

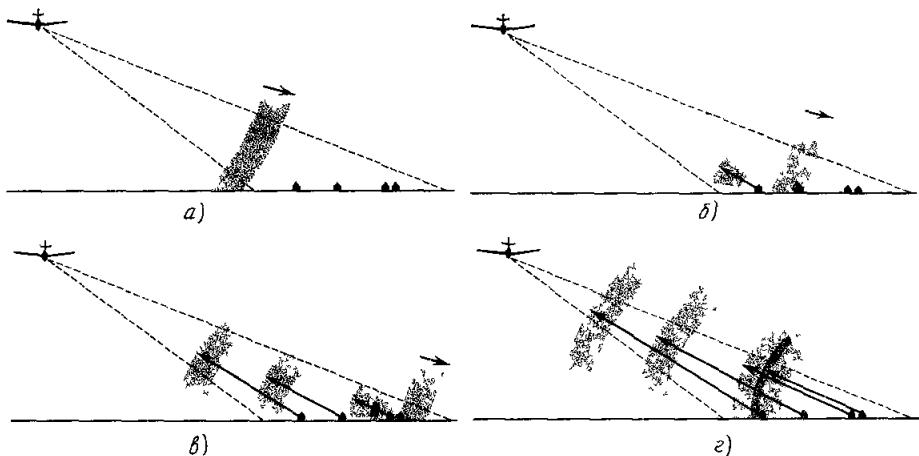


Рис. 6. Удаленность объектов от самолета, или расстояние поперек трассы полета, определяется по промежутку времени, необходимому импульсам СВЧ волны, движущимся со скоростью света, для достижения объекта и возвращения после отражения обратно к антенне.

На рисунках сигналы, возвращающиеся от двух близко расположенных домов, прибудут скорее, чем сигналы от более отдаленного дома (рис. а, б). Разрешение поперек трассы равно половине длины каждого импульса. Другие объекты, такие, как третий и четвертый дома, разнесенные поперек трассы меньше чем на половину длины импульса радара, будут восприниматься антенной как один широкий объект (рис. в, г).

самолета. Так как этот угол остается, по существу, постоянным для всех дальностей, а ширина диаграммы направленности увеличивается с дальностью, то разрешение в направлении вдоль траектории ухудшается при увеличении расстояния до объекта.

Угловая ширина диаграммы направленности антенны обратно пропорциональна ее длине, и поэтому разрешение может быть значительно улучшено с использованием более длинной антенны с более узкой диаграммой. Так как длина антенны, которая может быть установлена на самолете, ограничивается его размерами, то даже обычная радиолокационная система бокового обзора с самой большой возможной антенной имеет значительно худшее разрешение вдоль траектории, чем поперек нее, за исключением очень малых расстояний.

Используя преимущество движущегося самолета, можно, однако, сделать относительно короткую антенну с синтезированным раскрывом, которая ведет себя подобно длинной антенне с узким лучом.

Это достигается следующим образом. Реальная короткая антenna излучает импульсы через регулярные интервалы вдоль траектории полета. Когда самолет пролетает над каким-либо объектом, расположенным на местности, то этот объект сначала входит в диаграмму направленности антенны, некоторое время находится в ее пределах и, наконец, выходит из нее. За время пребывания в пределах диаграммы направленности объект отражает серию радиоимпульсов. Чем больше расстояние до объекта

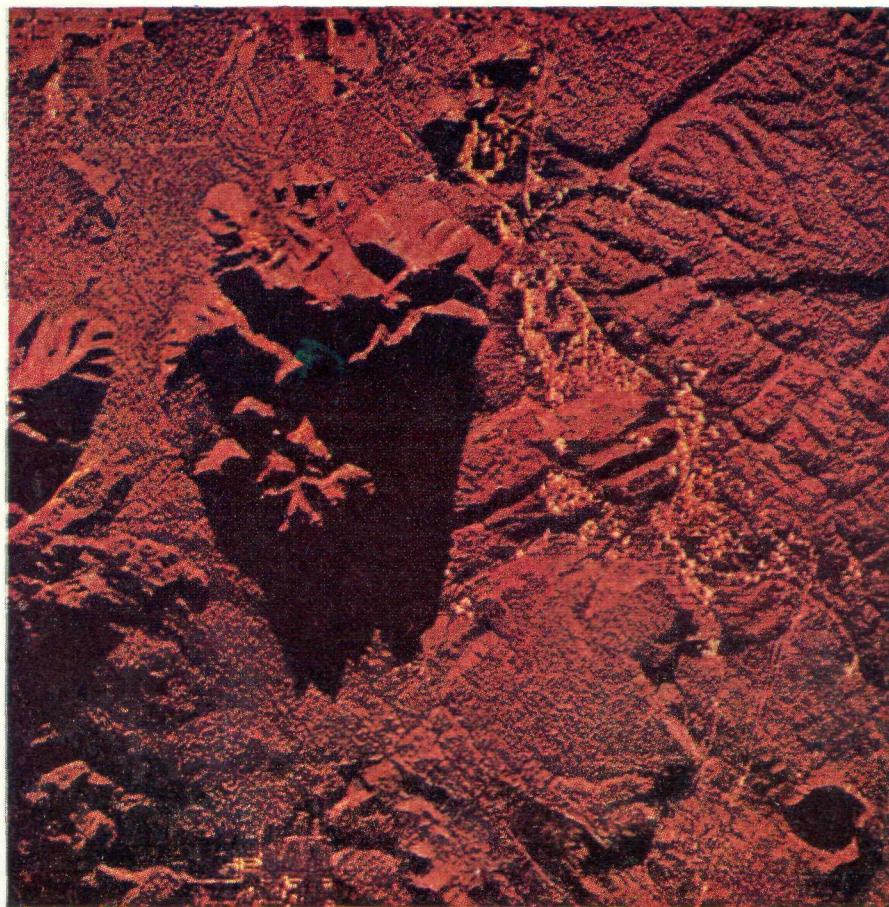


Рис. 7. Изображенное на рисунке напоминает аэрофотоснимок.

Однако это не так. Приведено изображение местности около города Флагстафф, штат Аризона, получено с помощью радиолокационной системы (РЛС) бокового обзора, установленной на самолете. Импульс СВЧ, излученный антенной, падает на поверхность под малым углом скольжения; отражения импульсов принимаются антенной, воспроизводятся на экране электронно-лучевой трубки и записываются на фотопленку, образуя радиолокационную голограмму. Освещая голограмму монохроматическим светом и записывая восстановленное изображение на цветную пленку, получают окончательный снимок местности. Самолет, с которого получено это изображение, пролетал в 25 милях восточнее Флагстаффа, двигаясь слева направо (с севера на юг) на высоте 40 тыс. футов. Значительное возвышение в центре изображения — гора Элден. Город Флагстафф запечатлен здесь в виде группы областей желтого цвета, протянувшейся сверху вниз правее центра. Справа внизу — изображение озера Сухого (Dry Lake), напоминающее кратер. Тонкая прерывистая линия желтого цвета слева вверху представляет собой радиолокационные отражения от линии высоковольтных передач.

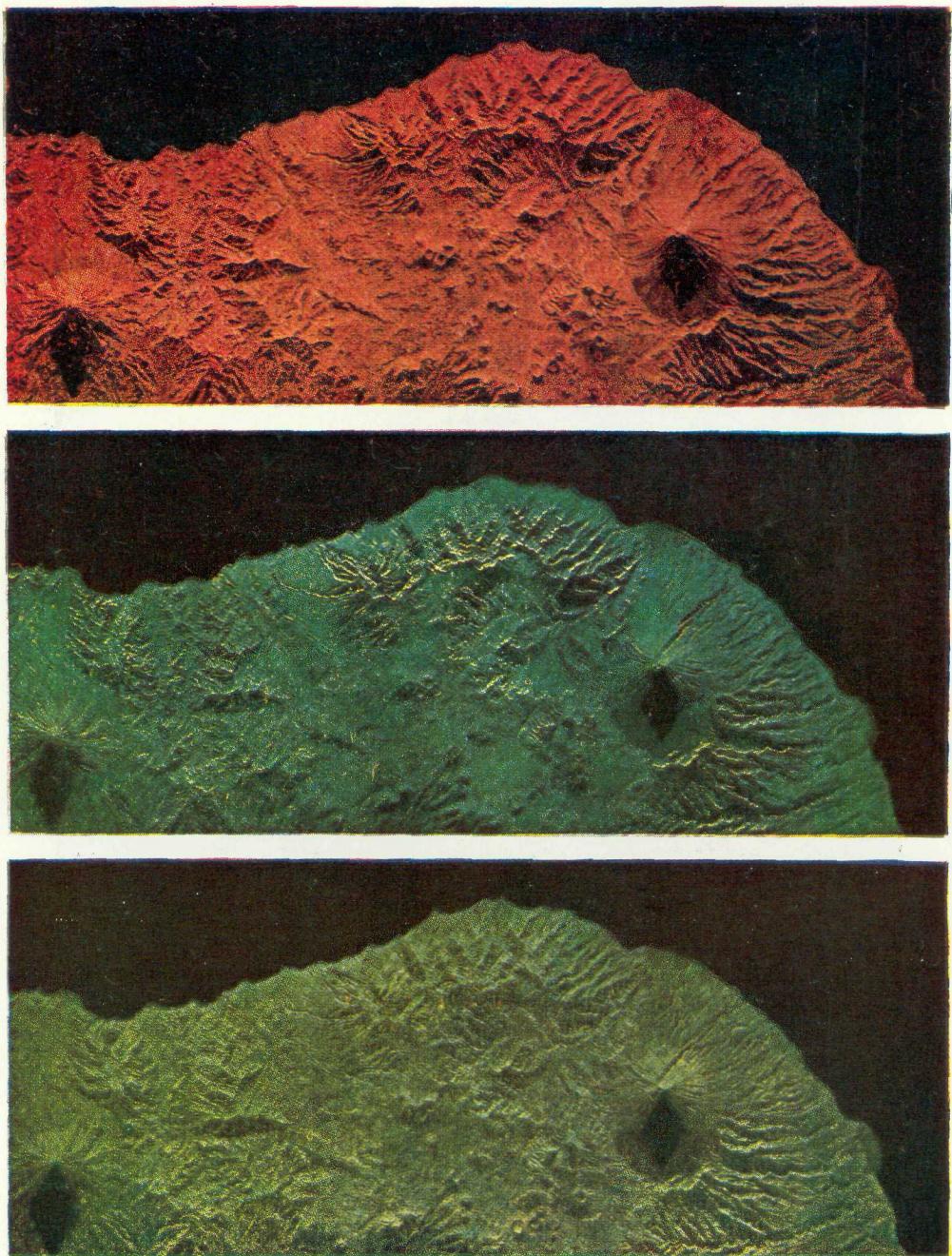


Рис. 8. На изображениях, полученных с помощью РЛС бокового обзора, очень отчетливо показан рельеф местности одного из островов в Индонезии.

Как это видно по теням, самолет, сделавший эти снимки, летел курсом, параллельным длиной стороне изображений. На снимках — 40-километровая береговая линия южной части острова Флорес. Вершина слева — это действующий вулкан высотой 7000 футов; вершина справа — бездействующий вулкан той же высоты. В центре снимков можно видеть также вулканические кратеры меньших размеров, а около моря отчетливо усматриваются гребни гор и долины. Все три картинки получены из одного радиолокационного изображения местности. Их цвета отличаются, так как каждая картинка получена и воспроизведена с использованием монохроматического света различной длины волны. Однако на каждом изображении виден более чем один цвет, так как в определенных частях картинки монохроматический свет был достаточно интенсивным, чтобы оказать действие на второй слой цветной эмульсии фотопленки. Воспроизведение радиолокационных изображений в цвете может сообщить больше информации, чем их черно-белое воспроизведение.

та, тем дальше он остается в пределах диаграммы направленности антенны. Синтезированная антенна ведет себя как более длинная для удаленных объектов и как короткая для более близких. Фактически эффективная длина синтезированной антенны прямо пропорциональна дальности до объекта. Так как разрешение пропорционально длине антенны, но обратно пропорционально дальности, то для радиолокатора с синтезированной апертурой эти два эффекта компенсируют друг друга и разрешающая способность изображения в направлении траектории полета остается одинаковой для всех дальностей. Таким образом, радиолокатор с синтезированной апертурой позволяет получить изображение с высоким разрешением на много миль вокруг.

РАДИОГОЛОГРАФИЯ

Между радиолокационной антенной с синтезированной апертурой и голографической системой в видимом свете существует интересная аналогия. В голографии волны от источника когерентного света, например лазера, освещают объект. Каждая точка объекта отражает свет. Эти отраженные опорные световые волны, и результатирующее семейство интерференционных полос записываются на мелкозернистую фотопленку. Когда проявленная пленка освещается пучком когерентного света, семейство интерференционных полос восстанавливает начальный набор отраженных волн, которые формируют трехмерное изображение исходной сцены, имеющее высокую степень детальности и точности.

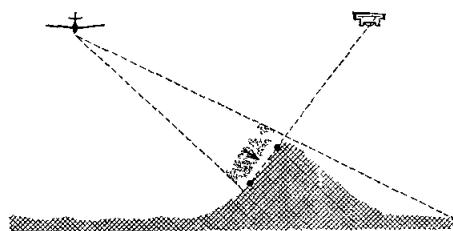


Рис. 9. Перспектива в радиолокационном изображении в некоторой степени отличается от перспективы в обычной аэрофотографии, сделанной в видимом свете.

В радиолокационном изображении объекты, отстоящие друг от друга менее чем на ширину пучка, будут казаться совпадающими, если они находятся на одинаковом расстоянии от самолета. Это происходит из-за того, что микроволновые импульсы достигнут их одновременно и возвратятся к антенне также в одно и то же время, так что два объекта будут восприниматься как один. На фотографии два объекта кажутся совпадающими, если они имеют одинаковые угловые координаты при наблюдении их через линзу. Поэтому перспектива в радиолокационном изображении в некотором смысле аналогична перспективе, получаемой фотокамерой, расположенной в той же самой вертикальной плоскости самолет — объект при фотографировании местности под прямыми углами.

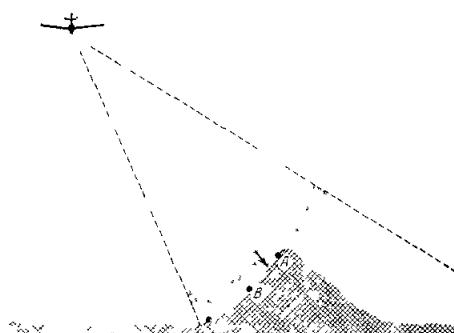


Рис. 10. На радиолокационном изображении местности приподнятые объекты смещены по направлению к траектории полета самолета, и создается впечатление, что они расположены круче, чем на самом деле.

Причина в том, что вершина горы (A) ближе к самолету, чем склон (B) или основание (C), и поэтому импульсы от вершины первыми возвращаются к антенне. Величина смещения увеличивается с высотой.

объекта отражает свет. Эти отраженные опорные световые волны, и результатирующее семейство интерференционных полос записываются на мелкозернистую фотопленку. Когда проявленная пленка освещается пучком когерентного света, семейство интерференционных полос восстанавливает начальный набор отраженных волн, которые формируют трехмерное изображение исходной сцены, имеющее высокую степень детальности и точности.

Радиолокация при помощи антennы с синтезированной апертурой — это процесс получения изображения, в котором когерентные электромагнитные волны освещают местность под самолетом и сбоку от него. Приемники радиолокатора выделяют электромагнитные волны, рассеянные каждой точкой местности. В электронном оборудовании, установленном на борту самолета, сигналы в приемнике от отраженных радиоимпульсов смешиваются с опорными

сигналами и создают интерференционную картину. Линия за линией отображается на экране электронно-6 УФН, т. 131, вып. 2

лучевой трубки и фотографируется на движущуюся пленку, скорость которой пропорциональна скорости самолета. Изображение на пленке можно рассматривать как радиоголограмму.

В радиолокаторе с синтезированной апертурой интерференционная картина от каждого рассеивателя на местности записывается не в виде кольцевого рисунка, а в виде узких прерывистых линий, параллельных краю пленки. Такую прерывистую линию, однако, можно рассматривать как поперечное сечение кольцевой интерференционной картины; толщина прерывистой линии соответствует длительности импульса. Удаленность объекта от рассеивателя записывается пропорционально расстоянию до ближайшего края пленки.

Прерывистые линии от двух достаточно близких друг к другу объектов, находящихся на одном и том же расстоянии, освещаясь одновременно радиолокатором, будут переходить в две наложенные друг на друга, но слегка смещенные последовательности прерывистых линий. Как и в голограммах для видимого света, два семейства интерференционных картин могут налагаться друг на друга без нарушения их способности формировать отдельные изображения.



Рис. 11. С увеличением расстояния от самолета разрешение падает, так как диаграмма направленности обычного (с несинтезированной апертурой) радиолокатора бокового обзора расходится веерообразно поперек трассы и на большей дальности шире, чем на меньшей дальности.

Два близко расположенных объекта будут видны раздельно на близких расстояниях (а), а на далеких расстояниях — как один объект (б). Более длинная антenna имела бы лучшее разрешение, но существует предел для длины антены, которую можно установить на самолете.

рассеивателей, одновременно засвечиваемых антенной радиолокатора, преобразуется в соответствующий набор хорошо различимых изображений. Таким способом в видимом свете формируется миниатюрная копия радиолокационных волн, принятых антенной, и воспроизводится миниатюрное изображение исходной местности.

В радиолокационном голографическом процессе от каждой точки любого объекта местности в пределах длины синтезированного раскрыва антены записывается вся информация. Разрешающая способность голографического изображения соответствует разрешению антены с синтезированной апертурой и больше, чем разрешение короткой антены с действительной апертурой. Поэтому изображение, формируемое голограммой, имеет высокое разрешение.

Для удобства записи изображения с голограммы исходную фотопленку перемещают, пропуская через нее пучок когерентного света. Синхронно с движущимся изображением также перемещают и фотопленку для регистрации получаемого изображения. Таким образом, получается непрерывная картина местности вдоль всего пути самолета. Читатель, знакомый с голографией, мог бы предположить, что оптическая система для получения пленки с изображением проста, так как изображение от голограммы формируется простым ее освещением пучком когерентного света. Однако для радиолокационной голограммы не все так просто.

При записи изображения возникают две проблемы. Одна связана с тем, что голографический принцип записи выполняется только для продольного направления движения пленки.

Когда фотопленка освещается пучком когерентного света, интерференционная картина от каждого рассеивателя преобразует некоторую часть прошедшего через нее света в расходящуюся волну, которую можно сфокусировать линзой. Множество перекрывающихся сигналов от всех

пучков когерентного света, излучаемого антенной, формирует изображение, которое можно воспроизвести на экране телевизора. Для этого изображения требуется определенное разрешение, чтобы оно было различимо. Это разрешение определяется длиной синтезированного раскрыва антены и зависит от длины волны излучения.

Сигналы уже расположены по ширине пленки в соответствии с расстоянием до отразивших их объектов. При фокусировании сигналов по

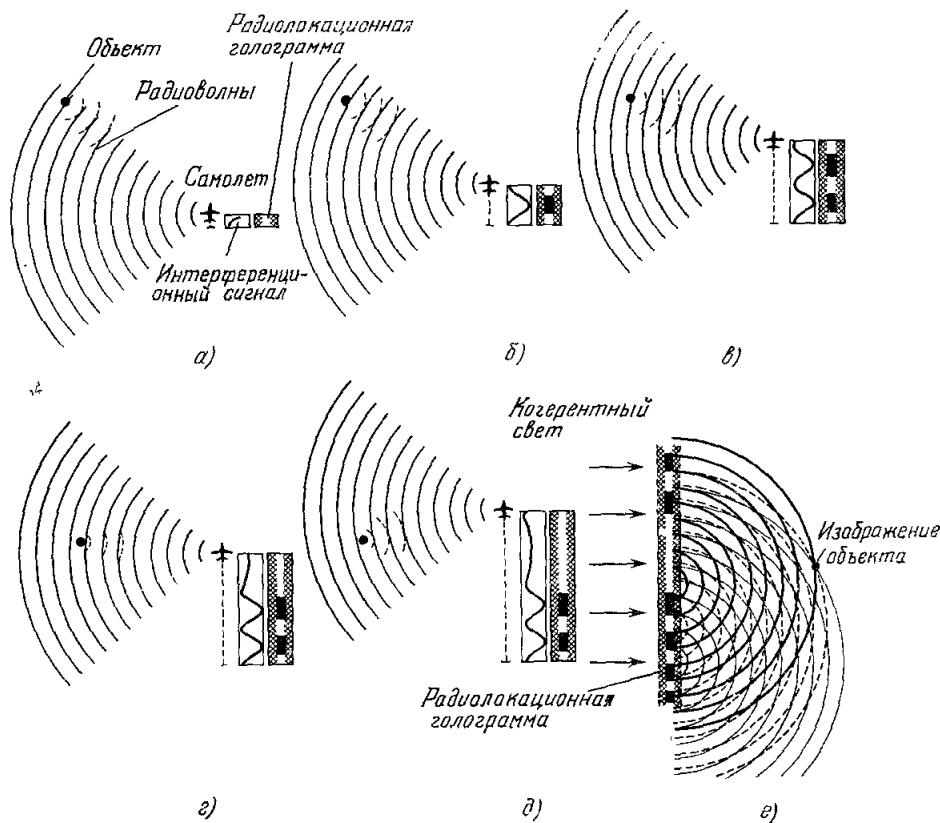


Рис. 12. Длинная антenna может быть синтезирована с помощью короткой антены если использовать преимущество, связанное с движением самолета.

При полете самолета по прямой траектории короткая антenna, установленная на его носице, посыпает ряд импульсов через определенные интервалы времени. Каждый импульс состоит из штага когерентных СВЧ волн. Ход длина импульсов определяет разрешение поперек дорожки, разрешение вдоль дорожки определяет длину волны. При попадании объекта в диаграмму направленности антены он отражает часть импульсов обратно к антенне. Для некоторых точек траектории полета самолета объект будет удален от него на целое число длии волн; в промежуточных положениях между этими точками это не выполняется. На рисунках показано, что объект сначала удален на 11 длии волн (a), затем на 10 (b), 9 (c), 8,5 (d). В последнем случае объект расположен под прямым углом к антенне. С этого момента расстояние между самолетом и объектом увеличивается (d). Антenna принимает последовательность отраженных волн, которые в радиоприемном устройстве смещиваются с опорным напряжением. Сигнал интерференции между ними управляет скоростью смещения с опорным напряжением. Сигнал интерференции между ними управляет скоростью смещения точек, сканирующей по экрану электронно-лучевой трубы. В моменты времени, когда фаза пришедшего импульса совпадает с фазой опорного импульса, происходит усиление; напряжение повышается, и движущаяся точка будет яркой. Когда же фазы этих импульсов не совпадают, сигнал уменьшается; напряжение уменьшается, и яркость точки будет слабая. Таким образом, движущаяся точка выписывает серию темных и светлых штрихов неравной длины, которые записываются на полосу пленки, движущуюся со скоростью, пропорциональной скорости самолета. Группа прозрачных и непрозрачных штрихов на пленке — это фактически одномерная интерференционная картина; пленка, на которой были записаны, — это радиолокационная голограмма. Когда обработанная голограмма освещается источником когерентного света (e), каждый прозрачный штрих будет действовать как отдельный источник когерентного света. За голограммой будет наблюдаваться единственная точка, где результирующие волны сойдутся в фазе. Здесь 11-я длина волны света (толстые линии) от прозрачного штриха, созданного 11-й СВЧ волной, встретится с 10-й длиной волны света (штриховые линии) от прозрачного штриха, созданного 10-й СВЧ волной, и обе встретят 9-ю длину волны света (толстые линии) от прозрачного штриха, созданного 9-й микроволной. В этой точке фокусируется свет от всей интерференционной картины и образуется миниатюрное изображение исходного объекта.

направлению вдоль траектории, сигналы в направлении поперек траектории полета дефокусируются. Эта трудность разрешается введением цилиндрической линзы между исходной пленкой и пленкой с изображени-

ем, так как цилиндрическая линза фокусирует волны только в поперечном направлении. С помощью оптической компенсации можно сформировать изображение, которое будет четким по обоим направлениям.

Вторая проблема заключается в том, что при освещении пленки исходных данных сигналы от более удаленных объектов образуют волновые фронты с большим радиусом кривизны, чем сигналы от близлежащих объектов. Сигналы от противоположных краев пленки, таким образом, фокусируют свет на разных расстояниях от пленки. Эти расстояния зависят от удаленности объектов. В результате плоскость изображений искривляется, и регистрирующая камера, записывающая изображение, не может одновременно сфокусироваться на всю ширину пленки. Эту проблему можно уяснить путем элементарных соображений. Пусть местность, которую необходимо нанести на карту, заметным образом наклонена по отношению к самолетной радиолокационной антенне. Полученное изображение будет также наклонено. Этот дефект можно устранить, поместив коническую линзу перед исходной пленкой. Оптические системы для восстановления радиолокационных голограмм и корректирующие линзы для приведения изображения в плоскость пленки кажутся несколько необычными для разработчиков. Тем не менее они нашли практические применения.

ПРИМЕНЕНИЕ РЛС СИСТЕМЫ

Первой широкомасштабной программой картографирования местности самолетным радиолокатором бокового обзора явилась программа полной съемки провинции Дариен, которая находится на границе Панамы с Южной Америкой.

В 1968 г. «Westinghous Electric Corporation» совместно с «Raytheon Company» использовала радиолокатор бокового обзора с обычной апертурой, которую фирма «Westinghouse» разработала для армии США, и получила первые удачные мозаичные изображения по площади в 20 000 кв. км. Ранее эта область целиком не картографировалась из-за почти постоянного облачного покрова над ней. Позднее «Grumman Ecosystems» провела аналогичные съемки местности радиолокационной системой, разработанной «Motorola, Inc.» также для армии. Это оборудование с некоторыми изменениями используется и сейчас для съемки местности компанией «Motorola Aerial Remote Sensing, Inc.».

В 1970 г. радиолокационная система с синтезированной апертурой была исключена из секретной военной классификации. Группа из «Goodyear Aerospace Corporation and Aero-Service Division of the Western Geophysical Company of America» филиала «Litton Industries» переоборудовала для съемки местности в гражданских целях радиолокационную систему с синтезированной апертурой, построенную «Goodyear», и установила ее на «Каравелле», принадлежащей «Aero-Service». Еще две компании совместно предложили услуги по использованию систем радиолокационного картографирования. Подобные радиолокационные системы были сконструированы и использовались группой исследователей в Мичиганском университете, чьи программы сейчас продолжает Мичиганский институт исследования окружающей среды. Ряд других организаций также внес существенный вклад в этом направлении.

До 1971 г. тропические леса Южной Америки, главным образом в бассейне Амазонки, оставались последней большой областью в мире, которая была плохо и неточно нанесена на карту. Венесуэла и Бразилия, осуществляя планы развития своих тропических областей, выделили для радиолокационной съемки обширные районы своих стран. При этом нужно было удовлетворить ряду требований. Изображение всех снимаемых участков

должно было быть составлено так, чтобы одна область легко состыковалась с другой. Более того, изображение, полученное с помощью радиолокатора,

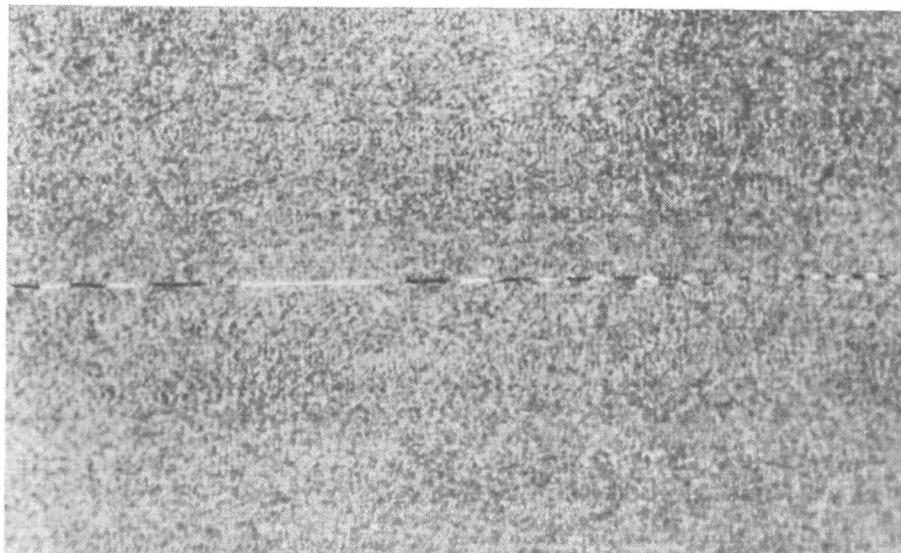


Рис. 13. Часть пленки исходных данных показывает интерференционные картины, полученные с помощью возвращающихся групп волн в РЛС бокового обзора с синтезированной апертурой.

Для наглядности радиолокационная голограмма увеличена в 10 раз. Длинная горизонтальная линия в центре из черных и белых штрихов — это интерференционная картина одного сильного отклика от необычно большого зеркального отражателя, такого, как одна из выше линии электропередач в радиолокационном изображении рис. 1. Более мелкие и менее упорядоченные измерения — это менее интенсивные отклики от сотен более мелких мишеней.

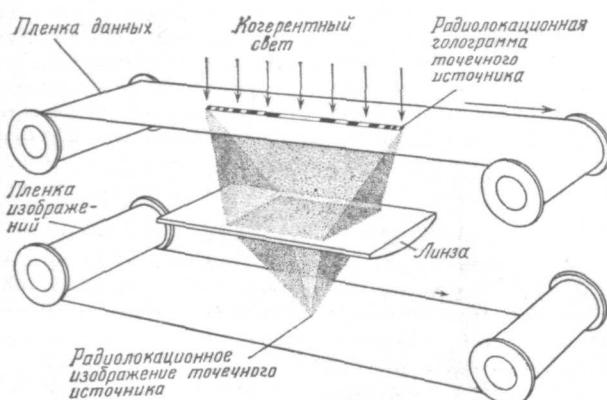


Рис. 14. Голографическое изображение восстанавливается освещением когерентным светом лазера пленки исходных данных.

По мере движения пленки данных через луч света восстановленное изображение записывается на другую узкую фотопленку. Так как пленка данных является голограммой только в продольном направлении, изображения в поперечном направлении должны быть сфокусированы цилиндрической линзой. Богатство подробностей на изображении возникает частично из-за того, что длина интерференционной картины на пленке данных в 72 раза больше, чем изображение, которое оно восстанавливает.

должно быть совместным с изображением, полученным с помощью «Earth Resources Technology Satellite» (теперь называемым «Landsat»), который был запущен для фотографирования всей земной поверхности по местному

времени около 9.00 утра, т. е. когда Земля освещалась косыми лучами утреннего солнца.

С тех пор, как радиолокационные изображения стали использовать для составления карт, был достигнут наивысший на практике уровень точности определения местоположения. Инерциальное навигационное устройство, совершенно адекватное тому, которое используется при управлении полетом самолета, оказалось недостаточно точным для определения опорных точек при картографировании. Поэтому по всему бассейну Амазонки была создана сетка из 30 точек для новой тогда «Transit Satellite Positioning System». Эти точки промерялись с точностью до 10 м. В каждую точку был помещен приемоответчик для системы точной радионавигации. Оборудование на борту самолета могло выделять сигналы от приемо-

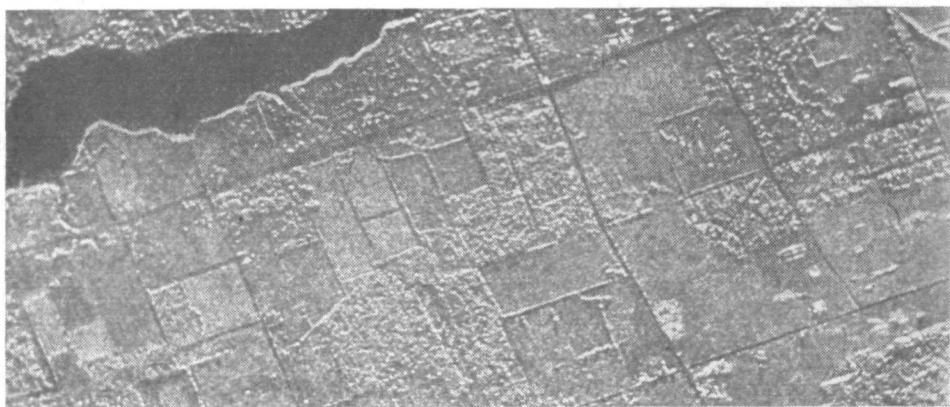


Рис. 15. Часть пленки с изображением, записанным РЛС бокового обзора Мичиганского

Детройта и

Север — внизу изображения. При такой ориентации самолет летел в том же направлении, что представляют собой черные места, где импульсы радиолокатора зеркально отражались. Деревьевые отражатели и направляют интенсивное зеркальное отражение назад к антенне. Изображение изменилось

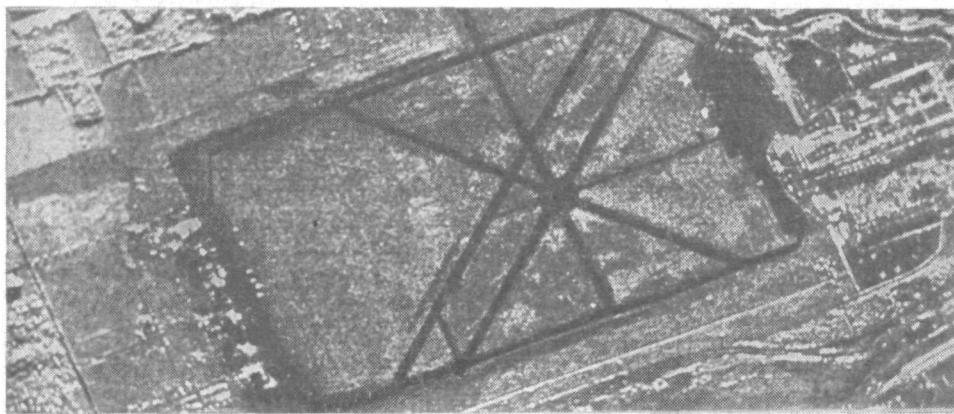
ответчика на расстоянии до 500 км. При одновременном приеме сигналов от двух таких точек положение самолета определялось с точностью до 75 м и контролировалось каждые 6 с. Во время съемки местоположение самолета, т. е. высота и другие необходимые параметры записывались на магнитную ленту. Этой системой, менее чем за год, изображение всего бразильского бассейна Амазонки, площадью около 4 млн. кв. км, равной половине площади США, было записано и собрано в мозаику. Окончательно отснятые изображения имеют точность около 500 м.

Для продолжения радиолокационных съемок и более полного использования радиолокационного изображения Бразилия учредила центр Радам (Радиолокатор для Амазонки), базирующийся в Белеме. Проект Радам объединил большое число геологов, почвоведов и других технических специалистов. Мозаики стали основными картами для всех их исследований. Геологические анализы привели к тщательному составлению карт и обширным полевым работам в определенных областях, с использованием радиоизображения в качестве руководства. Структурная информация, полученная из недавно раскрытых характеристик поверхности, дала ключ к пересмотру и расширению существующих геологических знаний о бассейне Амазонки. К настоящему времени группа «Goodyear Aero Service» выполнила съемку тропических лесов Амазонки в Бразилии, Венесуэле, Перу,

Боливии. Эти съемки стерли белые пятна с карты Южной Америки. Ни одно другое устройство не смогло бы сделать этого. Успех таких съемок обусловил продолжение работ в уже картографированных другими средствами районах. В марте 1976 г. последней серией полетов завершилась беспрецедентная по масштабам программа картографирования всей Бразилии посредством радиолокационной съемки.

ДРУГИЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Радиолокатор бокового обзора явился уникальным инструментом и в других областях исследований. Изучение дрейфа континентов показало, как важно знать определенные типы разрывов, очертания материков



института по исследованию окружающей среды, показывает полосу местности около Энн-Арбора.

и длинная сторона фотографии. Воды озера Бельвиль и взлетные полосы аэропорта Уиллоу-ран и кустарники — диффузные отражатели. Здания и тротуары, действуя совместно, образуют угление несколько искажено, вытягивая квадраты в ромбы, потому что скорость исходной фотографии не точно.

и другие тектонические признаки. Во многих случаях они видны с поверхности. Однако они проявляются очень слабо либо слишком велики по масштабам, чтобы их можно было распознать большинством имеющихся средств. Скользящее под острым углом электромагнитное излучение радиолокатора бокового обзора учитывает форму Земли, а возможность снять при низменных условиях обширные области Земли благоприятствуют распознаванию характерных протяженных признаков. В связи с важностью избежать активных геологических разломов при размещении заводов ядерного топлива, радиолокационное изображение играет важную роль при выборе их местоположения. Благодаря отсутствию рассеянного радиолокационного отражения от водной поверхности на радиолокационном изображении водоемов, рек и каналов, хорошо видны пределы подъема воды при наводнениях.

Какие еще применения может найти в будущем радиолокатор бокового обзора? Среди тех, кто работает в этой области, принято считать, что умение создавать радиолокационное изображение превосходит умение извлекать из него информацию. Поэтому теперь все большее внимание уделяется расшифровке зарегистрированной информации.

Несколько совершенно очевидных усовершенствований в технике воспроизведения привели к появлению новых методов извлечения дополн-

нительной визуальной информации из их изображений. Один из этих методов состоит в применении для увеличения яркости изображения цветового кодирования. Цветное изображение часто значительно превосходит по информационной емкости черно-белое.

Второй метод заключается в использовании стереографической техники для воспроизведения данных о высоте, которые имеются в соответствующим образом созданных парах радиолокационных изображений. В третьем методе используется тот факт, что два разнесенных чувствительных элемента действуют в комбинации обычно значительно эффективнее, чем один.

Исследователи в «U.S. Geological Survey» и в «Goodyear Aerospace» работали совместно над сопоставлением изображений, сделанных самолетным радиолокатором бокового обзора, с изображениями от «Landsat», комбинация которых сохраняет характерные черты обеих систем. При таком сопоставлении цветоразностное представление изображения от «Landsat» становится более значимым в сочетании с богатой информацией о форме Земли и подробностях рельефа, даваемой радиолокационным изображением.

Может быть, в дальнейшем станет возможным извлекать большее количество информации из многоспектральных радиолокационных изображений, образующихся на различных длинах волн и различным образом поляризованных электромагнитных сигналов. Изучая, как изменяется поляризация и отражающие свойства поверхности с изменением длины волны, может быть удастся улучшить микроволновое восприятие различий по поверхности, т. е. различий, скажем, между разными почвами и разными посевами.

Радиолокатор бокового обзора может также внести важный вклад в исследование планет. Картинны поверхности Луны и Венеры уже сделаны большими радиолокационными системами, расположенными на Земле. Установленная на борту «Аполлона-17» радиолокационная система с синтезированной апертурой работала на трех длинах волн и сделала снимки лунной поверхности с высоты в 100 км с разрешением в 10 метров на самой короткой длине волны (2 м). Однако поверхность Луны никогда не скрыта под облаками, тогда как поверхность Венеры всегда. В последние годы возрос интерес к установке радиолокационной системы на спутнике, запущенном на орбиту вокруг Венеры, и передаче радиолокационных изображений на Землю. Такая система будет способна отобразить поверхность облачной планеты с прекрасным разрешением по ограниченным площадям, дополняя широкозахватные с ограниченным разрешением радиолокационные картины, сделанные с Земли.

ЛИТЕРАТУРА

- Cutrona L. J., Leith E. N., Roccetto L. J., Vivian W. E.— Proc. IEEE, 1966, v. 54, p. 1026.
 Brown W. M., Roccetto L. J.— IEEE Spectrum, 1969, v. 6, No. 9, p. 52.
 Graham L. C.— Proc. IEEE, 1974, v. 63, p. 763.
 Synthetic Aperture Radar/Ed. J. Kovaly.— Artech House, 1976.
 Hammond A. L.— Science, 1977, v. 196, No. 4289, p. 511.