

УДК 621.397.43

## МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В РАДИОДИАПАЗОНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Хамадж Наср Еддин, Сальников И.И.

*Пензенский государственный технологический университет, Пенза, e-mail: iis@penzgtu.ru*

В статье представлен обзор методов дистанционного зондирования с использованием различных летательных аппаратов целью мониторинга земной поверхности. Для уменьшения влияния атмосферы Земли обосновывается использование радиодиапазона электромагнитных (ЭМ) волн. Показано, что переход от фотографии земной поверхности в оптическом диапазоне к дистанционному зондированию в радиодиапазоне ЭМ-волн приводит к существенному снижению разрешающей способности аэрофотосъемки. С целью увеличения разрешающей способности используют методы синтеза апертуры с использованием запоминания фазовой структуры ЭМ-волны, отраженной от земной поверхности в виде радиоголограммы. При последующем восстановлении радиоголограммы в видимом свете формируется изображение земной поверхности в уменьшенном виде и с разрешающей способностью не хуже чем в оптическом диапазоне ЭМ-волн. Показано, что современные информационные технологии в настоящее время позволяют заменить фотографирование отраженного от земной поверхности радиопульса и последующего восстановления сформированной радиоголограммы в луче лазера цифровой обработкой, которая позволяет сформировать изображение земной поверхности с разрешающей способностью не хуже, чем в оптическом диапазоне. Подобный переход от аналоговых когерентно-оптических методов формирования изображения земной поверхности к цифровым методам стал возможен благодаря успехам интегральной технологии вычислительных систем.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, мониторинг земной поверхности, влияние атмосферы Земли, разрешающая способность аэрофотосъемки, синтезированная апертура, радиоголограмма

## METHODS OF REMOTE EXPLORATION OF A TERRESTRIAL SURFACE IN A RADIORANGE OF ELECTROMAGNETIC WAVES

Khamadj Nasr Eddine, Salnikov I.I.

*Penza State Technological University, Penza, e-mail: iis@penzgtu.ru*

In a paper the review of methods of remote exploration with use of various flight vehicles by the purpose of monitoring of a terrestrial surface is represented. The influence of atmosphere of the Earth is marked, for a diminution of which influence the use of a radiorange of EM-waves is justified. It is shown, that the passage from a photography of a terrestrial surface in an optical range to remote exploration in a radiorange of EM-waves reduces in an essential drop of a resolving power of air photography. With the purpose of magnification of a resolving power use methods of synthesizing of the aperture with use of reminder of a phase structure of an EM-wave reflected from a terrestrial surface as the radiohologram. At consequent restoring of the radiohologram in visible light the image of a terrestrial surface in the reduced aspect and with a resolving power not worse than in an optical range of EM-waves is formed. It is shown, that the modern information process engineerings now allow to replace a photography of a radio pulse, reflected from a terrestrial surface, and consequent restoring of the generated radiohologram in a ray of the laser by digital handling, which allows to generate an image of a terrestrial surface with a resolving power not worse, than in an optical range. The similar passage from analog coherent – optical methods of image generation of a terrestrial surface to digital methods has become possible(probable) due to successes of an integrated process engineering of computing systems.

**Keyword:** remote exploration, monitoring of a terrestrial surface, influence of atmosphere of the Earth, resolving power of air photography, synthesized aperture, radiohologram

Под дистанционным зондированием понимается метод получения информации о физическом объекте на расстоянии при помощи целенаправленной обработки принятых электромагнитных (ЭМ) волн, которые провзаимодействовали с исследуемым объектом. Энергия ЭМ-волн может принадлежать как собственному излучению физического тела, так и быть отраженной энергией от постороннего источника, например, Солнца или радиолокационной станции (РЛС) [1]. Электромагнитное излучение характеризуется частотой колебаний  $f$  и длиной волны  $\lambda$ , связанные между собой соотношением  $c = \lambda f$ , где  $c \approx 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость распространения ЭМ-волн в вакууме.

В дистанционном зондировании и в целом ряде важных прикладных направлений активно используется инфракрасный диапазон от красной границы видимого спектра до длин волн порядка 100 мкм, в котором заключена основная часть энергии теплового излучения объектов земной поверхности [2]. Огромную роль в дистанционном зондировании земной поверхности играет атмосфера Земли, которая существенным образом препятствует прохождению ЭМ-волн видимого и ИК диапазонов. Вполне удовлетворительно с малым рассеянием и поглощением сквозь атмосферу Земли проходят ЭМ-волны радиодиапазонов. Авиационная и космическая радиолокационная

съёмка осуществляется в миллиметровом, сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн.

В процессе полёта спутника по орбите или самолета, антенна на борту излучает радиоволны в направлении земной поверхности под углом к ней (рис. 1). Радиолокационное изображение формируется путём регистрации отраженного поверхностью Земли сигнала по наклонной дальности. Съёмку непосредственно под носителем (в надир) не проводят, так как в этом случае дальности различаются незначительно, обратные сигналы от близких объектов местности возвращаются к радиолокатору почти одновременно и на снимке эти объекты неразличимы [3], поэтому подобные системы носят название радиолокационные станции бокового обзора (РЛС БО), то есть РЛС как бы смотрят вбок от направления движения. Углом съёмки обычно называют углы падения –  $\theta_6$  и  $\theta_d$ , соответственно для ближней и дальней зоны. Угол падения ЭМ-волны для современных космических радиолокационных систем может варьировать в больших пределах: например, для ИСЗ Radarsat-2 – от  $10^\circ$  до  $60^\circ$ . Весь диапазон углов падения определяет ширину полосы обзора – полосу на земной поверхности, в пределах которой может проводиться съёмка.

Важнейшей характеристикой РЛС БО является пространственное разрешение, которое определяется длиной волны ЭМ-излучения и шириной диаграммы направ-

ленности антенны в направлении движения летательного аппарата (ЛА) (азимута) и разрешением по наклонной дальности  $\rho_{sr}$  пропорционально длительности импульса: чем короче импульс, тем выше разрешение. Оно вычисляется по формуле  $\rho_{sr} = \tau c/2$ , где  $\tau$  – длительность импульса,  $c$  – скорость света в вакууме. При работе со снимками земной поверхности значение имеет пространственное разрешение на земной поверхности  $\rho_{gr}$ , которое определяется через разрешение по наклонной дальности по формуле:

$$\rho_{gr} = \rho_{sr} / \cos(90 - \theta) = \rho_{sr} / \sin \theta, \quad (1)$$

где  $\theta$  – угол падения волны [3].

В РЛС БО используют антенну с ножеобразным лучом. Её устанавливают вдоль фюзеляжа самолёта таким образом, чтобы плоскость луча была перпендикулярна линии полёта (или расположена под заданным углом) и чтобы луч был направлен вниз к земной поверхности (рис. 2). Часто используют двусторонний обзор вправо и влево относительно линии полета носителя. Отраженный сигнал от объектов приходит с задержками относительно зондирующего импульса на время  $t_d$  распространения радиоволн

$$t_d = 2R / c, \quad (2)$$

где  $R$  – дальность до цели,  $c$  – скорость распространения электромагнитной энергии.

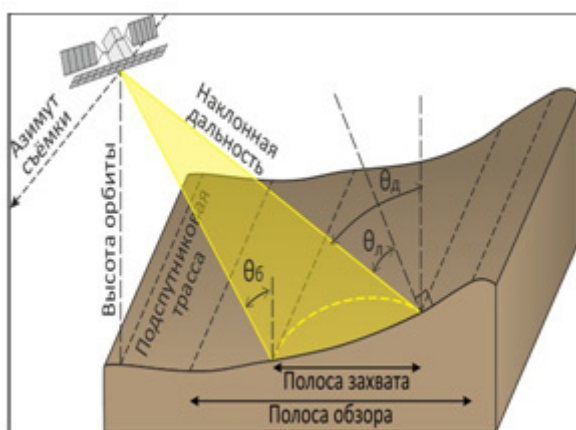


Рис. 1. Геометрия радиолокационной съёмки

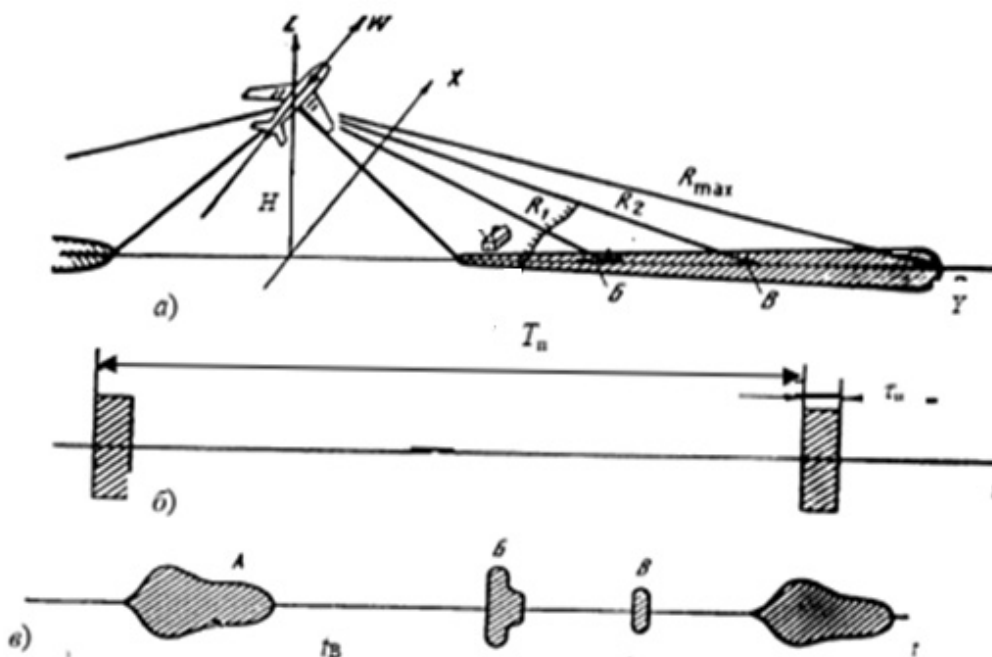


Рис. 2. РЛС БО:

*a* – геометрия обзора пространства; *б* – зондирующий сигнал; *в* – отраженный сигнал; *A, B, B'* – радиолокационные цели; *Y* – горизонтальная дальность

Начало строки соответствует моменту излучения зондирующего импульса. В момент прихода отраженного сигнала от цели яркость пятна возрастает пропорционально мощности принятого сигнала [4, 5]. Изображение на экране РЛС или на фотопленке напоминает карту местности. Различие состоит

в том, что на экране регистрируется не горизонтальная, а наклонная дальность. Это вносит искажения, особенно при съемке с больших высот: масштаб изображения на малых дальностях резко меняется, а на краю может появиться темная полоса, дальность до которой определяется высотой полета.

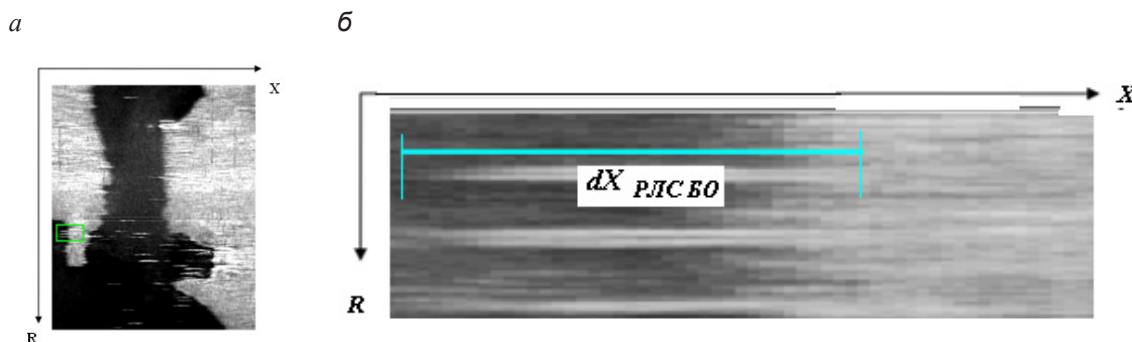


Рис. 3. Изображения земной поверхности в РЛС БО

На рис. 3,а представлено выходное изображения в РЛС БО. А на рис.3,б показан увеличенный фрагмент радиолокационного изображения от трех судов на морской поверхности и часть суши. Размер кадра на местности примерно  $40 \times 40$  км. В РЛС БО, где разрешающая способность по азимуту равна около 3 км, отметки вытянуты по оси  $X$ . Длина отметки от судна равна размеру зоны облучения  $X_a$ , вдоль линии пути, определяющей азимутальное разрешение  $\delta X_{\text{РЛС БО}}$ . Разрешающая способность по азимуту РЛС БО определяется размерами апертуры антенны в вертикальной плоскости и длиной волны. Для радиодиапозона, когда  $\lambda$  равна  $1 \div 100$  см, на высотах зондирования порядка 1 км разрешающая способность по размерам объектов составляет несколько км, что является неприемлемым для различных приложений. Для решения задачи уменьшения элемента разрешения в РЛС БО при зондировании земной поверхности был разработан метод синтеза апертуры (СА) за счет движения летательного аппарата. При СА для получения высокого разрешения вдоль линии пути необходимо максимально увеличивать горизонтальный размер антенны  $D_r$ . Принцип синтеза состоит в том, что на самолете устанавливается малоразмерная антенна, приемопередатчик делается когерентным, способным определять не только огибающую, но и фазу отраженного сигнала [4]. Искусственный раскрыв синтезированной

антенны в РСА соизмерим с размером элемента разрешения РЛС БО вдоль линии пути и значительно превышает размеры физической антенны, установленной на самолете, что и позволяет реализовать высокое разрешение в РЛС СА.

Угловая разрешающая способность в радианах РЛС СА по линии пути определяется не раскрывом реальной антенны, установленной на самолете, а длиной синтезированной  $L_a$ :

$$\alpha_c = \frac{\lambda}{2L_a} \quad (3)$$

В синтезированной антенне в каждом положении самолета сигнал проходит от антенны до цели и обратно от цели до антенны, в результате чего он получает двойной фазовый набег [4]. Линейное разрешение РЛС СА по путевой дальности определяется длиной синтезированной антенны и наклонной дальностью  $R$ :

$$\delta X = \frac{R\lambda}{2L_a} \quad (4)$$

Запись фазовой структуры отраженного сигнала в РЛС СА называется радиоголограммой. Синтез радиоголограммы с длиной апертуры  $L_{a,\text{max}} = X_a$  позволяет реализовать предельное азимутальное разрешение, близкое к  $D_r/2$  с получением детального радиоизображения, фрагмент которого приведен на рис. 4.

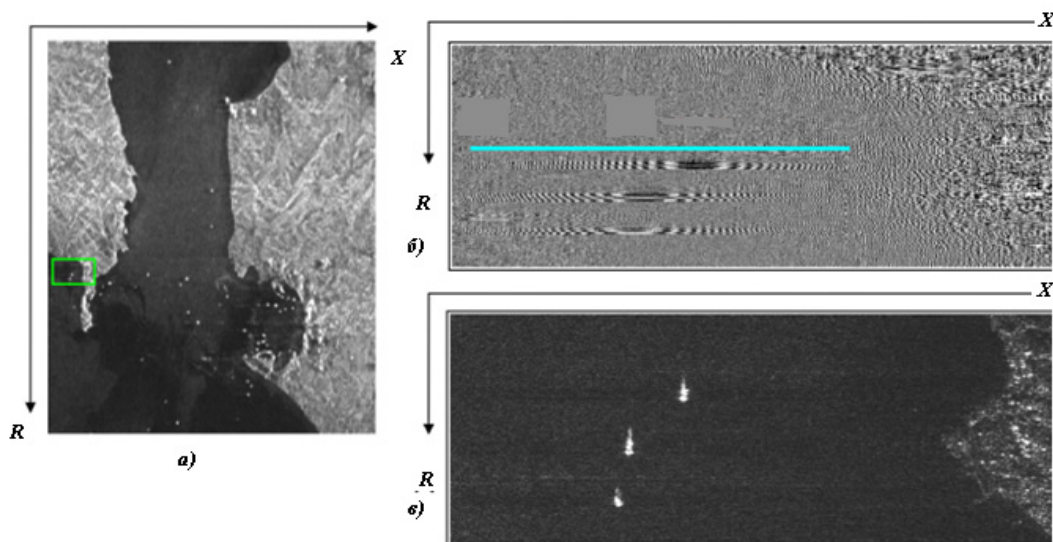


Рис. 4. Восстановленные изображения в РЛС СА (а, в) и радиоголограмма (б)

В первых РЛС СА использовался оптический синтез искусственной апертуры. Применялись также электронные методы синтеза. В настоящее время все эти методы вытеснены цифровым синтезом апертуры с использованием универсальных вычислительных машин или спецвычислителей на сигнальных процессорах.

#### Список литературы

1. Шарков Е.А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы: в 2 т. / Евгений Шарков. – Т. 1. — М.: ИКИ РАН, 2014.—544 с.

2. Electromagnetic Radiation: [Электронный ресурс] // Natural Resources Canada. – URL: <https://www.nrcan.gc.ca/>

[earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/14621](http://earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/14621). (Дата обращения: 20.09.2018).

3. Технология съёмки [Электронный ресурс] // Радиолокационные данные в географических исследованиях и картографировании. – URL: <http://www.geogr.msu.ru/cafedra/karta/maerials/radiolocation> (Дата обращения: 08.11.2018).

4. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: учебное пособие Ч. 2. / Л.Б. Неронский, В.Ф. Михайлов, И.В. Брагин. – СПб: СПбГУАП, 1999. – 220 с.

5. Токарева О.С. Обработка и интерпретация данных дистанционного зондирования Земли: учебное пособие / О.С. Токарева; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 148 с.