**Методика анализа влияния информационных показателей космической радиолокационной системы наблюдения на выбор параметров съемки**

1. **Введение**

Современные космические радиолокационные системы наблюдения (КРЛСН) характеризуются, многорежимностью работы радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА). Исключая поляриметрические и многочастотные возможности РСА, основными способами съемки являются [1]:

1) Режим нормальной боковой (маршрутной) съемки – детальный непрерывный режим (Stripmap), когда максимум диаграммы направленности антенны (ДНА) в процессе выполнения съемки остается под постоянным углом к траектории КА.

2) Режим максимального разрешения – детальный прожекторный режим (Spotlight). Съемка осуществляется с использованием электронного разворота антенны в азимутальной плоскости, а РЛИ представляется в виде кадра местности.

3) Широкозахватный режим съемки – обзорный режим (ScanSAR), когда съемка осуществляется с использованием электронного сканирования ДНА в вертикальной плоскости и РЛИ представляет собой набор парциальных кадров, из которых составляется полоса захвата по поверхности Земли вдоль маршрута движения КА.

При текущем планировании съемки КА, на основе анализа задач, стоящих перед КРЛСН, выделяется перечень районов наблюдения, которые характеризуются положением на земной поверхности (координатами, превышением), линейными размерами (шириной и протяженностью относительно трассы предполагаемого движения КА). Для районов съемки определяются классы объектов и требуемый уровень решения задач по их наблюдению (обнаружение, распознавание, идентификация) и задаются предельные величины пространственного разрешения по дальности  и азимуту , которые, в свою очередь, определяют используемый режим съемки РСА и параметры зондирующих импульсов.

Для обеспечения условия однозначного приема отраженных сигналов и получения изображения требуемого качества, в режимах съёмки РСА используют сложную геометрию наблюдения, когда выполняется наведение антенны на требуемую дальность по углу крена и осуществляется отклонение ДН антенны по азимуту (углу рыскания). Угол отклонения ДН по рысканию также компенсирует набег доплеровской частоты отраженного сигнала, который возникает за счет вращения Земли и разворотов КА при детальном и широкозахватном режимах съемки,

Возможности при РСА съемке объекта наблюдения в заданный момент времени нахождения КА на траектории характеризуются зоной захвата (полосой съемки) в продольном и поперечном направлениях в которой возможно получение отраженных сигналов с требуемыми параметрами и полосой обзора (полоса возможного перенацеливания), в которой может выбираться зона захвата. В РСА, кроме общих ограничений, связанных с обеспечением заданного потенциала существуют принципиальные ограничения по выбору зоны захвата. Ограничения обеспечивают однозначное воспроизведение спектра доплеровских частот принимаемого сигнала, определяемого конструктивными параметрами антенны и требуемым разрешением по азимуту. Указанное противоречие разрешается путем выбора оптимальных параметров РСА (частоты повторения зондирующих импульсов) и способов компенсации смещения центральной доплеровской частоты отраженных сигналов.

1. **Выбор параметров РСА, определяющих геометрию обзора**

Определим длительность контакта КА с районом земной поверхности, имеющим линейную протяженность вдоль трассы , или угловую протяженность , где  - локальный радиус Земли, при наведении антенны на требуемую дальность до цели и отклонения антенны по азимуту и при условии получения гарантированного качества изображения.

Геометрия съемки объекта наблюдения поясняется на Рис.1. Длительность контакта  определяется временем движения КА между точками  и , которым соответствуют истинные аномалии  и , и может быть найдена при интегрировании уравнения [2]

,

где  -угловая скорость движения КА.

После преобразований представим уравнение в виде

,

где - фокальный параметр орбиты,

- эксцентриситет,

 и - высота апогея и перигея соответственно,

 – геоцентрическая постоянная поля тяготения.



Рис.1 Определение длительности контакта с районом наблюдения

Истинная аномалия  определяется через задаваемую начальную высоту съемки

,

а аномалия  - как корень уравнения

.

Центральные углы  и  рассчитываются в системе координат, связанной с носителем через углы ориентирования вектора наклонной дальности  и , которые в свою очередь зависят от требований к параметрам принимаемых сигналов

, .

Угол крена  соответствует положению полосы наблюдения относительно орбиты КА, временной задержке отраженного сигнала и наклонной дальности, - угол отклонения вектора наклонной дальности по азимуту зависит от скорости взаимного перемещения носителя РЛС и цели, от угловых разворотов антенны и КА и определяется доплеровским смещением частоты сигнала.

**2. Фотограмметрическая модель радиолокационной съемки**

Под математической моделью процессов РЛ съемки, в соответствии с рассматриваемыми задачами наблюдения, будем понимать такое представление геометрии РЛ зондирования земной поверхности в виде соотношений между координатами объектов на местности, где бы наиболее полно учитывались все основные физические факторы, определяющие параметры отраженного сигнала.

В любой заданный момент времени положение КА и его движение определяются в принятой системе координат радиус-вектором  и вектором скорости  на основе прогноза движения КА по орбите. Для РСА ориентация вектора наклонной дальности отраженного сигнала есть результат пересечения фронта падающей волны и земного эллипсоида с учетом смещения частоты отраженного сигнала, возникающего из-за взаимного перемещения носителя РЛС и цели.

Координаты точки  на поверхности Земли задаются уравнением эллипсоида вращения в экваториальной инерциальной СК с учетом превышения района съемки над уровенной поверхностью

;

где ,

- экваториальный и полярный радиусы эллипсоида.

Уравнение для наклонной дальности представим в виде следующего выражения

.

Доплеровская частота  отраженного сигнала находится как [3]:

,

где - длина волны излучения, а вектор скорости цели (точки на поверхности Земли) в инерциальной экваториальной СК

,

 рад/с - угловая скорость вращения Земли.

Очевидно, что прямая задача нахождения зависимости географической широты и долготы  точки местности в зависимости от координат вектора положения, вектора скорости КА и параметров зондирующего излучения не может быть решена в явном виде. Обычно используются численные методы решения системы уравнений эллипсоида, наклонной дальности и доплеровской частоты отраженного сигнала [4] относительно координат точки на поверхности Земли  в экваториальной инерциальной СК, в которой обычно выполняется прогноз движения КА.

Предполагая местную сферичность Земли в районе наблюдаемой цели с известным средним радиусом кривизны , положение цели на поверхности эллипсоида в барицентрической [5] СК (Рис.2) можно задать через направляющие косинусы вектора :

; ; ,

где , , ,

,- углы в сферической системе координат.

Координаты вектора  в барицентрической СК преобразуем в геоцентрическую инерциальную СК по формулам:

,

где -матрица поворота, характеризуемая параметрами орбиты КА и элементы которой определяются составляющими вектора площадей  [5]:

.

Согласно второму закону Кеплера, постоянная площадей находится в результате векторного произведения

,

с модулем  и углом между  и 

.

Компоненты вектора площадей  определим по известным соотношениям [5]

.

Выражая через полярные координаты, положение точки:

,

,

.

.Уравнение удовлетворяет всем точкам малой окружности с полярным углом . После тригонометрических преобразований угол  можно выразить через угол обзора следующим образом (Рис.2

.

В этом случае зависимость доплеровской частоты от углов ориентации наклонной дальности  в барицентрической СК имеет вид:









Преобразуем данное выражение к квадратному уравнению, которое может быть решено относительно неизвестного :

,

где

;

;







Рис.2 Барицентрическая орбитальная СК

Уравнение определяет ориентацию вектора наклонной дальности, параметры принимаемого сигнала в зависимости от вектора положения КА, его скорости, положения объекта съемки на поверхности Земли и в дальнейшем будут рассматриваться в качестве аналитической модели РЛ съемки.

**3. Методика анализа влияния информационных показателей КРЛСН на выбор параметров съемки**

На основе проведенного анализа было рассмотрено влияние геометрических и информационных ограничений (разрешения) на общее время наблюдения объекта с заданными координатами. Представляет практический интерес задача определения оптимальных значений углов наблюдения , которые обеспечивают максимальную ширину полосы обзора  при заданном качестве получаемых изображений. Данная задача реализуется в виде методики анализа влияния информационных показателей КРЛСН на выбор параметров съемки.

Исходя из технических возможностей системы управления КА и дешифрируемости получаемых изображений задаются ограничения по предельным значениям углов наблюдения. По каждому из факторов с учетом ограничений определяется область компромиссных решений, представляющую собой окрестность параметров при которых реализуются их предельные значения. В этом случае, исходя из требуемых значений информационных и оперативных показателей  и т.п. через углы  могут быть предъявлены требования к баллистическим и геометрическим характеристикам системы наблюдения.

Отклонение антенны по азимуту для компенсации соответствующего смещения доплеровской частоты отраженных сигналов позволяет начинать съемку при подлете к району наблюдения, а заканчивать уже после выхода из него, что обеспечивает увеличение длительности видеоконтакта КА с районом объекта наблюдения.

Угол  найдем из решения квадратного уравнения для требуемой частоты (при ).

Предлагаемые соотношения справедливы и в том случае, если предусмотрен механический разворот антенны относительно корпуса носителя, либо используется электронное отклонение луча фазированной антенной решетки.

Расчет значений  для диапазона изменения углов визирования , и соответствующего им диапазона наклонных дальностей , позволяет определить значение наклонной дальности  для которого . После разворота ДН антенны на угол  для данной точки на поверхности отраженный сигнал будет иметь требуемую доплеровскую частоту (). Ширина доплеровского спектра  для рассматриваемой полосы обзора

.

Методика состоит из следующих основных этапов.

1. Прогноз движения КА, расчет длительности видеоконтакта с районом наблюдения  и начального времени съемки .

2. Расчет элементов матрицы поворота, определяемой параметрами орбиты КА - .

3. Вычисление азимутального угла для диапазона углов визирования по формулам на моменты времени .

4. Нахождение азимутального угла , определение углов ориентации для наведения антенны на центр полосы обзора.

5. Определение ширины спектра отраженного сигнала;

6. Расчет информационных показателей и выбор параметров РСА.

Приведенные соотношения позволяют провести обоснование и расчет параметров радиолокатора, характеризующих геометрию обзора поверхности:

- размер полосы обзора ;

- положение непросматриваемой зоны (ближней границы полосы наблюдения);

- минимальную и максимальную наклонные дальности ;

- минимальный и максимальный углы обзора ;

- верхнюю и нижнюю границы частоты повторения импульсов .

При формировании длинных маршрутов наблюдения выполнение задачи съемки возможно путем разбиения всей длины маршрута на элементарные участки с дополнительным перенацеливанием антенны перед сканированием каждого такого участка.

Количество снимаемых объектов в полосе обзора  зависит от суммарного времени нахождения КА над заданной территорией  и определяется длительностью контакта с районом съемки [2]

,

где  -время разворота КА для наведения антенны и время стабилизации КА,

-время включения аппаратуры (время пролета КА между первым и последним объектом в полосе захвата).

С другой стороны, время  характеризует число съемок одного объекта через некоторые временные интервалы  под различными углами наблюдения (ракурсами)

.

Длительность видеоконтакта  определяется параметрами орбиты КА наблюдения (высотой орбиты, эксцентриситетом), параметрами радиолокатора (предельными углами отклонения по крену и рысканию) и характеризует возможности орбиты по распределению времени наблюдения заданных объектов за период обращения КА

,

где -период обращения КА, -коэффициент производительности за виток.

1. **Выводы**

Проведена оценка потенциальных возможностей РСА для расчета информативности с учетом влияния геометрических условий съемки.

Получены соотношения, при помощи которых можно определить оптимальные параметры и режим съемки для достижения максимальной обзорности системы при сохранении информативных свойств получаемых изображений.

Для обеспечения съемки необходимо учитывать возникающие искажения физического характера в пределах полосы обзора. Показано влияние углов ориентации КА на основные показатели КРЛСН. Соотношения позволяют провести оценку возможностей РСА при решении задач наблюдения или при проектировании облика системы наблюденеия и предъявить требования к выбору основных характеристик РСА и баллистических параметров группировки КА.

**Литература**

1. РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» В.Э.Турук, В.С.Верба, М.В.Голованова, П.Е.Голубцов, М.В.Евсиков, Л.Б.Неронский, С.Э.Зайцев, Е.Ф.Толстов Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. No 5. С. 69–83
2. Чевычелов Е.А., Ломов В.А. Определение длительности видеоконтакта ИСЗ с районом наблюдения. //Исследование Земли из космоса, 1991 г., № 3, стр.67-72.
3. F. Li, D.Held, J.Curlander, C.Wu, Doppler Parameter Estimation for Spaceborne Synthetic Aperture Radars. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, GE-23, no.1, pp. 47-55, 1985.
4. Curlander J. and McDonough., Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing, John Wiley & Sonc, Inc., New York, 1991.
5. Основы теории полета космических аппаратов/ Под ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. - М.: Машиностроение, 1972. - 607 с.