Перечень сокращений

|  |  |
| --- | --- |
| БРЛС | - бортовая радиолокационная станция |
| ДНА | - диаграмма направленности антенны |
| ЗС | - зондирующий сигнал |
| ЗМ | - закон модуляции |
| ЛА | - летательный аппарат |
| ПБО | - переднебоковой обзор |
| ПП | - подстилающая поверхность |
| РЛИ | - радиолокационное изображение |
| СА | - синтезированная апертура антенны |
| ТО | - телескопический обзор |
| ТТХ | - тактико-технические характеристики |
| ФЦА | - фазовый центр антенны |
| ЭПР | - эффективная поверхность рассеивания |

## Алгоритм формирования отраженного сигнала БРЛС в режиме «воздух-поверхность»

Представленный алгоритм формирования отраженного сигнала учитывает статистические характеристики отражений электромагнитной волны от наземных объектов, модуляцию реальной диаграммой направленности, а также расчет координат пространственных элементов, занятых тенью наземных объектов, высота которых превышает в два или три раза линейный размер пространственного элемента.

### Предустановленные параметры

При моделировании отсчетов принятого сигнала, используются предустановленные параметры, обусловленные характеристиками БРЛС, видом обзора земной поверхности, а также характеристиками конкретного типа цели. Перечень используемых параметров представлен в таблице 1.1.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Таблица | | 1.1 | – Предустановленные параметры моделирования | | | | |
| **№** | **Обозначение** | | | **Ед. изм.** | **Значение** | **Название** |
| 1 |  | | | м | 0,0,6000 | Прямоугольные координаты ФЦА БРЛС в момент времени синтезирования |
| 2 |  | | | м | 0, 0, 0 | Координаты центра участка картографирования |
| 3 |  | | | град | 3.0 | Ширина ДНА по азимуту |
| 4 |  | | | град | 3.0 | Ширина ДНА по углу места |
| 5 |  | | | м/с | 350 | Скорость движения носителя БРЛС |
| 6 |  | | | кВт | 10 | Импульсная мощность зондирующего сигнала |
| 7 |  | | | м/c | 3e8 | Скорость распространения ЭМВ |
| 8 |  | | | мкс | 100 | Длительность зондирующего импульса |
| 9 |  | | | МГц | 150 | Ширина спектра зондирующего сигнала |
| 10 |  | | | мс | 3 | Период повторения импульсов |
| 11 |  | | | м | 0.03 | Длина волны зондирующего сигнала |
| 12 |  | | | м | 1.0 | Разрешение по дальности/азимуту |
| 13 |  | | | м | 0 | Массив координат наземной цели по оси X |
| 14 |  | | | м | 0 | Массив координат наземной цели по оси Y |
| 15 |  | | | м | 0 | Массив координат наземной цели по оси Z |

### Параметры, поступающие на вход алгоритма в процессе моделирования

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Таблица | | | 1.2 | – Параметры, поступающие на вход алгоритма в процессе моделирования для *k*-ого зондирования | | | | |
| **№** | **Обозначение** | | | **Ед. изм.** | **Значение** | **Название** | **Куда поступает** | |
| 1 |  | | | м | Соответствуют текущему пространственному положению цели | Текущее положение БРЛС | В алгоритм формирования отраженного сигнала | |
| 2 |  | | | м2 | 0,0,0 | Массив значений среднего ЭПР наземных целей | В алгоритм формирования отраженного сигнала | |
| 3 |  | | | усл. ед. | Зависит от исходных условий | Реальная квадратура фазы переотражения | В алгоритм формирования отраженного сигнала | |
| 4 |  | | | усл. ед. | Зависит от исходных условий | Мнимая квадратура фазы переотражения | В алгоритм формирования отраженного сигнала | |

### Выходные параметры алгоритма

Выходные данные алгоритма приведены в таблице 1.3.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Таблица | | | 1.3 | – Выходные данные алгоритма | | | | |
| **№** | **Обознач.** | | | **Ед. изм.** | **Значение** | **Название** | **Куда поступает** | |
| 1 |  | | | усл. ед. | Зависит от исходных условий | Реальная квадратурная составляющая сигнала | В алгоритм формирования принятого сигнала | |
| 2 |  | | | усл. ед. | Зависит от исходных условий | Мнимая квадратурная составляющая сигнала | В алгоритм формирования принятого сигнала | |
| 3 |  | | | м | Зависит от исходных условий | Координаты теней по оси Y | В алгоритм формирования сигнала отраженного от подстилающей поверхности | |
| 4 |  | | | м | Зависит от исходных условий | Координаты теней по оси Y | В алгоритм формирования сигнала отраженного от подстилающей поверхности | |
| 5 |  | | | м | Зависит от исходных условий | Координаты теней по оси X для элементов выше на 2 | В алгоритм формирования сигнала отраженного от подстилающей поверхности | |
| 6 |  | | | м | Зависит от исходных условий | Координаты теней по оси X для элементов выше на 3 | В алгоритм формирования сигнала отраженного от подстилающей поверхности | |

### Описание последовательности выполнения алгоритма

Блок схема алгоритма формирования отраженного от участка картографирования сигнала представлена на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 ‑ Схема алгоритма формирования отраженного сигнала

Последовательность выполнения алгоритма формирования отраженного сигнала.

Этапы, выполняемые однократно.

1. Чтение данных:

‑ координаты центра участка картографирования (,,);

‑ координаты БРЛС в середине интервала синтезирования апертуры   
(,,);

‑ скорость движения БРЛС ;

‑ ширина ДНА по углу места ;

‑ ширина ДНА по азимуту ;

‑ скорость распространения электромагнитной волны ;

‑ длина волны зондирующего сигнала ;

‑ длительность зондирующего импульса ;

‑ ширина спектра закона модуляции зондирующего сигнала ;

‑ период повторения импульсов ;

‑ мощность передатчика БРЛС ;

‑ массив координат пространственных элементов участка картографирования, в которых размещена моделируемая цель  
 (, , ).

1. Расчет наклонной дальности центра участка картографирования

 (1.1)

1. Расчет протяженности участка картографирования по дальности

 (1.2)

1. Расчет координат  пространственных элементов, занятых тенью

Определение элементов, превышающих минимальную высоту объекта более чем на *два* элемента разрешения:

 (1.3)

Расчет массива координат , занятых тенью

 (1.4)

Определение элементов, превышающих минимальную высоту объекта более чем на *три* элемента разрешения:

 (1.5)

Расчет массива координат , занятых тенью

 (1.6)

1. Расчет времени начала и окончания приема сигнала, отраженного от участка картографирования

 (1.7)

1. Расчет шага временной развертки по дальности

 (1.8)

1. Расчет временного интервала, соответствующего протяжённости по дальности, в пределы которой попадают импульсы, отраженные от любой точки участка картографирования

 (1.9)

1. Расчет энергетического коэффициента БРЛС

 (1.10)

 (1.11)

 (1.12)

Этапы, выполняемые каждый период повторения.

1. Чтение данных

‑ координаты текущего положения БРЛС для *k*-го периода повторения   
();

‑ значение фазового множителя, соответствующего отражению сигнала в *k*-ом периоде повторения ;

‑ значение среднего ЭПР моделируемого *i*-го пространственного элемента участка картографирования  (среднее значение ЭПР рассчитывается как поток мощности с 1 м2 и изменяется в каждом периоде повторения из-за изменения ракурса наблюдения моделируемого участка).

1. Расчет значения ДНА для центра участка картографирования

 (1.13)

Функция . Результат расчета значений реальной ДНА за интервал синтезирования апертуры приведен на рисунке 1.3.

1. Расчет текущей дальности для *i*-го пространственного элемента

 (1.14)

1. Расчет комплексного значения сигнала на частоте Доплера для *i*-го пространственного элемента (траекторный сигнал)

 (1.15)

На рисунке 1.3 в качестве примера приведены квадратуры сигнала с частотой Доплера и его энергетический спектр для одного пространственного элемента (центр участка картографирования).



Рисунок 1.3 – Квадратуры сигнала на доплеровской частоте и энергетический спектр с модуляцией ДНА

Моделирование выполнено для следующих условий  = 250 м/c,   
 = 4000 м,  = 20000 м,  = 0 м,  = 10000 м,  = 2 мс,  = 0.03 м,   
 = 1 c. Смещение центральной частоты спектра сигнала относительно нуля вызвано углом ориентации реальной ДНА в азимутальной плоскости отличного от 90 градусов (для данных условий моделирования угол составляет 78.69 градуса).

1. Расчет амплитудного множителя 

 (1.16)

1. Расчет закона модуляции ЗС для *i*-го элемента в *k*-ом зондировании

Временная развертка по дальности, смещенная в отрицательную область

 (1.17)

ЛЧМ импульс, преобразованный на видеочастоту

 (1.18)

 (1.19)

На рисунке 1.4 показан алгоритм моделирования положения импульса на временной развертке по дальности, отраженного от *i*-го элемента участка картографирования в *k*-ом зондировании.



Рисунок 1.4 ‑ Моделирование временного положения отраженного импульса на развертке по дальности: а) общая временная развертка по дальности; б) развертка, смещенная на  в отрицательную область; в) результат наложения смещенной временной развертки

Время задержки импульса, отраженного от *i*-го элемента участка картографирования в *k*-ом зондировании составляет . На это значение временная развертка  смещается в отрицательную область и обозначается . На смещенной развертке с учетом условия  определяется положение импульса. Далее смещенная развертка с определенным положением импульса накладывается на общую временную развертку, тогда начало отраженного импульса соответствует времени задержки .

Реальная квадратура отраженного ЛЧМ импульса на временной развертке по дальности приведена в качестве примера на рисунке 1.5.



Рисунок 1.5 ‑ Квадратуры отраженного ЛЧМ импульса на видеочастоте   
( = 50 МГц,  = 4 мкс,  = 2 мкс, = 10 мкс)

Отраженный ЛЧМ импульс рассчитан по выражению (1.18) с учетом времени задержки, равного 4 мкс. Частота ЛЧМ импульса в результате преобразования изменяется с  на .

1. Расчет координаты x пространственных элементов, занятых тенью

 (1.20)

 (1.21)

1. Формирование отраженного сигнала для *k*-го периода повторения

 (1.22)

Выходом алгоритма формирования отраженного сигнала являются реальная и мнимая квадратуры сигнала  рассчитываемые для каждого периода повторения.

### Пояснения к алгоритму

Аналитическое выражение, характеризующее сигнал БРЛС, отраженный от наземного точечного *i*-го излучателя имеет вид:

(1.23)

где  ‑ «медленное» и «быстрое» время, которые в контексте РСА характеризуют изменение межпериодных и внутрипериодных параметров сигнала;

‑ амплитудный множитель необходимый для придания требуемой мощности сигналу, отраженному от *i*-го излучателя;

 ‑ комплексный отсчет фазового множителя отражённого от *i*-го излучателя сигнала;

 ‑ множитель, учитывающий модуляцию сигнала ДНА;

 ‑ комплексный закон модуляции зондирующего сигнала;  ‑ огибающая сигнала;  ‑ комплексный множитель, учитывающий линейную частотную модуляцию зондирующего сигнала;  ‑ ширина спектра закона модуляции;  ‑ длительность одиночного импульса;  ‑ скорость распространения электромагнитной волны;

 ‑ отсчёт комплексного множителя, учитывающего постоянную начальную фазу отраженного импульса, обусловленную изменением радиальной скорости носителя БРЛС и *i*-го излучателя на интервале синтезирования (комплексный отсчет траекторного сигнала).

Соответственно сигнал от участка картографирования, состоящий из N элементов, представляет собой сумму сигналов, отраженных от каждого элемента для одного периода повторения:

. (1.24)

Кинематика движения БРЛС относительно участка картографирования представлена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.5 – Кинематическая схема картографирования земной поверхности при переднебоковом обзоре

Наклонная дальность центра участка картографирования и середина интервала синтезирования рассчитываются во время  = 0, когда ФЦА находится в начале системы координат ( = 0,  = 0) на высоте . Траектория движения БРЛС – прямолинейная с постоянной скоростью.

Наземная цель представляет собой совокупность пространственных элементов разрешения участка картографирования (площадь элемента 1 м2). Каждый элемент разрешения характеризуется своими координатами в общей с БРЛС декартовой системе координат (,,) и средней ЭПР .

Поясним расчет координат пространственных элементов, занятых тенью объекта.

Координаты пространственных элементов, занятых тенью, рассчитываются для объектов, высота которых превышает пространственное разрешение БРЛС.

Геометрия расчета координат пространственного элемента, занятого тенью, для точечного объекта высотой, равной двум элементам разрешения, приведена на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Геометрия расчета пространственного элемента, занятого тенью, для наземного объекта высотой в два элемента разрешения

На рисунке БРЛС расположена в начале декартовой системы координат (точка ) на высоте . Наземный объект находится в точках , , высота соответствует пространственному разрешению БРЛС. Необходимо определить координаты точки , которая является центром пространственного элемента разрешения, занятого тенью наземного объекта.

Точки  и  с учетом предположения, что элемент, занятый тенью, расположен на одной высоте с наземной целью, имеют координату .

Уравнение прямой , проходящей через точки , ,  имеет вид:

 (1.25)

Тогда координаты ,  из уравнения (1.25):

. (1.26)

Так как траектория полета носителя БРЛС расположена в плоскости , то в процессе полета меняется только координата , в то время как  остается без изменений:

 (1.27)

Таким образом, координаты пространственных элементов, занятых тенью наземного объекта, рассчитываются однократно для оси Y и каждый период повторения для оси X.

Множитель диаграммы направленности антенны на приём по азимуту определяется выражением:

,

где ,

,

– ширина диаграммы направленности на приём по азимуту для текущего угла отклонения луча от нормали к антенному полотну и текущей несущей частоты зондирующего сигнала 10ГГц,

,

,

– текущее положение биссектрисы диаграммы направленности антенны БРЛС;

текущее положение нормали к антенному полотну.

Примечание. В приведенных выше математических выражениях используется значение уровня боковых лепестков в единицах. Для получения этого значения выполняется пересчёт из дБ в единицы по формуле:

.