# ДАЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ РЛС

# Дальность действия РЛС в свободном пространстве

Уравнение дальности занимает особое положение при расчете основных характеристик РЛС, так как функционально связывает их в явном и неявном видах с дальностью действия РЛС. В этом смысле уравнение дальности называют системообразующим. Существует много различных форм записи уравнения дальности, отличающихся степенью подробности входящих в него ТТХ. Для начала выведем уравнение дальности РЛС в свободном пространстве для точечной цели. То есть для цели, размеры которой не превышают разрешаемого объема.

|  |
| --- |
| Рис.1 |

Под действием падающей на цель (первичной) электромагнитной волны на облучаемой поверхности объекта локации возникают ***токи проводимости*** (если поверхность цели проводящая) или ***токи******смещения*** (если поверхность - диэлектрик). Эти токи приводят, в свою очередь, к появлению поля вторичного излучения (рассеяния) радиоволн. Вторичная электромагнитная волна распространяется от цели во всех направлениях, в том числе, и в направлении на РЛС и регистрируется приемным устройством радиолокатора.

Количественной мерой интенсивности поля вторичного излучения является эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) цели.

***Эффективная поверхность рассеяния*** цели  - это площадь такого эквивалентного вторичного излучателя, который равномерно во всех направлениях рассеивает всю падающую на него энергию первичной волны и создает на входе приемника РЛС такую же плотность потока мощности вторичной волны, как и реальная цель. ЭПР измеряется в м2.

Пусть в свободном пространстве расположены приемопередатчик и цель на удалении от него (рис.1). Плотности потоков мощности первичной волны у цели , а вторичной волны на входе приемника .

Чтобы не рассматривать неравномерность переотражения, связанную с ярко выраженной анизотропией реальной цели сложной конфигурации, введем фиктивную поверхность - изотропный эквивалентный вторичный излучатель площадью , создающий на всей поверхности шара радиусом  плотность потока мощности .

Значит, мощность излучения в точке приема будет равна *.* С другой стороны, исходя из определения ЭПР, вся энергия падающей первичной волны должна перейти в энергию вторичного излучения. Поэтому ,  и *.*

Следовательно, ЭПР цели

 (1)

Поскольку плотность потока мощности пропорциональна квадрату напряженности электрического или магнитного полей, можно привести еще два соотношения, позволяющие рассчитать ЭПР цели:

 (2)

 (3)

С учетом вводимого понятия ЭПР, рассчитаем дальность действия РЛС в свободном пространстве. Пусть РЛС имеет следующие технические характеристики:

- мощность излучаемого (зондирующего) сигнала;

 - коэффициент усиления передающей антенны (учитывает направленные свойства антенны, согласно которым мощность излучается в фиксированном угловом направлении);

- эффективная площадь приемной антенны.

В свободном пространстве на расстоянии  от РЛС плотность потока мощности первичной электромагнитной волны, создаваемой ненаправленной антенной, определяется отношением излучаемой импульсной мощности зондирующего импульса передатчика к поверхности сферы *.*

С учетом направленных свойств передающей антенны, обладающей коэффициентом усиления , указанная плотность потока мощности увеличивается в раз и будет равна

 (4)

С другой стороны, плотность потока мощности вторичной волны в точке расположения приемной антенны РЛС равна

 (5)

Воспользовавшись формулой для расчета ЭПР (1), имеем:

 (6)

Если пренебречь изменением длительности импульсного сигнала  при отражении от движущейся цели, то из (6) можно получить

, (7)

где  и , где , - энергия излучаемого и принимаемого сигналов соответственно.

Таким образом, энергия (как и мощность) принимаемого сигнала зависит от отражающих свойств цели , характеристик приемного устройства , энергии зондирующего сигнала  направленных свойств передающей антенны и обратно пропорциональна четвертой степени дальности до цели. Ограничивая снизу значение принимаемой энергии, то есть, вводя минимальную (пороговую) энергию принимаемого сигнала , можно определить максимальную дальность действия РЛС в свободном пространстве

. (8)

Соотношение (8) называется ***основным уравнением радиолокации***.

Минимальная (пороговая) энергия принимаемого сигнала определяется из энергетического условия локации и равна

, (9)

где  - суммарный коэффициент различимости, показывающий во сколько раз минимальная энергия принимаемого сигнала должна превосходить спектральную плотность мощности шумов, чтобы цель была обнаружена с заданными показателями качества  и.

Приведем ***алгоритм*** (последовательность действий) ***расчета дальности действия РЛС в свободном пространстве***.

1. Расчет суммарного коэффициента различимости  или в децибелах

. (10)

Вначале из кривых обнаружения для заданной модели сигнала и заданных показателей качества обнаружения  и  по нижней децибельной шкале абсцисс определяется .

В том случае, если в качестве зондирующего используется пачечный сигнал, а принимаемый сигнал представляет собой некогерентную пачку радиоимпульсов, необходимо учесть неоптимальность обработки - потери на некогерентное накопление. Коэффициент потерь на некогерентное накопление  зависит от числа накапливаемых импульсов и определяется из соответствующих графиков.

После этого оцениваются потери другого рода и составляют в сумме 

Затем определяется суммарный коэффициент различимости  в соответствии с (10). Для использования его при расчете  (9) необходимо от дБ перейти к безразмерным величинам (разам)

. (11)

1. Расчет спектральной плотности мощности внутренних шумов.

Производится по известной формуле



где  - постоянная Больцмана;

 - коэффициент шума приемника;

 - шумовая температура (К)*.*

и  полагаются известными.

1. Расчет пороговой энергии принимаемого сигнала.

Производится в соответствии с выражением (9).

1. Расчет дальности действия РЛС в свободном пространстве.

Производится по формуле (8).

При этом технические характеристики РЛС - , , , а также ЭПР цели *,* должны быть заданы.

Отметим здесь, что если в качестве зондирующего используется пачечный сигнал, то

,

где  - энергия одного импульса пачки;

 - число импульсов.

Использование пачечного сигнала, таким образом, позволяет увеличить дальность действия РЛС при заданных показателях качества обнаружения  и .

Уравнение дальности (8) применимо для совмещенного радиолокатора, как с раздельными, так и с общими антеннами на передачу и прием. Для одной антенны на прием и передачу коэффициенты  и связаны соотношением:

. (12)

При этом формула (8) может быть записана следующим образом:

, (13)

или

. (14)

Технические характеристики РЛС, используемые при расчете дальности действия в свободном пространстве, связывает обобщающая техническая характеристика, так называемый ***потенциал РЛС*** *П*, определяющий энергетические возможности станции:

 (15)

С учетом (12) выражение для *П* имеет вид:

, (16)

где - мощность шумов на входе приемного устройства.

Выраженное через потенциал РЛС уравнение дальности действия РЛС, таким образом, запишется в виде:

 (17)

Анализируя влияние различных факторов на дальность действия РЛС в свободном пространстве, можно сделать следующие выводы:

1. Дальность действия РЛС увеличивается с ростом мощности передатчика . Для увеличения дальности действия в 2 раза мощность передатчика при прочих одинаковых характеристиках, необходимо увеличить в 16 раз.
2. Дальность действия одноантенной РЛС зависит от коэффициента усиления передающей антенны  и площади ее апертуры . Для увеличения дальности действия в 2 раза при прочих равных условиях,  или  необходимо увеличить лишь в 4 раза (что следует непосредственно из (13) и (14)).
3. Зависимость дальности действия от длины волны  имеет более сложный характер.

При заданном  увеличение  в соответствии с (12) ведет к увеличению эффективной площади антенны *,* идальность действия в соответствии с (14) увеличивается.

При заданной  увеличение  в соответствии с (12) ведет к уменьшению коэффициента усиления антенны , и дальность действия в соответствии с (13) уменьшается.

Следовательно, для увеличения дальности действия РЛС в 2 раза необходимо при заданном увеличить длину волны в 4 раза, а при заданной , наоборот, уменьшить длину волны РЛС  в 4 раза.

1. Дальность действия РЛС в свободном пространстве существенно зависит от средней ЭПР лоцируемого объекта, величина которой для радиолокационных целей различного типа может меняться в весьма широких пределах.

Средние значения ЭПР некоторых классов целей приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № п/п | Тип радиолокационной цели | Средняя ЭПР цели , м2 |
| 1. | Транспортный самолет, самолет дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО) | ~102 |
| 2. | Стратегический бомбардировщик | 10…50 |
| 3. | Средний бомбардировщик (истребитель-бомбардировщик) | 5…20 |
| 4. | Истребитель | 1…5 |
| 5. | Беспилотный летательный аппарат | 0,1…0,5 |
| 6. | Крылатая ракета | 0,1…0,8 |
| 7. | Боевой блок баллистической ракеты (ББ БР) | до 10-3 |

Анализируя данные, приведенные в таблице, приходим к выводу, что дальность обнаружения с заданными показателями качества наиболее опасных объектов (типа ББ БР) будет весьма мала. В целом же, при изменении ЭПР цели в 104 раз дальность действия изменится в 10 раз.

Реальная дальность действия РЛС всегда меньше дальности действия в свободном пространстве.

Ограничимся рассмотрением следующих факторов, влияющих на дальность действия РЛС:

1. Влияние характеристик направленности, приемной и передающей антенн.
2. Влияние атмосферы.
3. Влияние поверхности Земли.

С учетом этих факторов дальность действия РЛС можно записать в виде:

 (18)

где  - дальность действия РЛС в свободном пространстве,

 – нормированная характеристика направленности антенны (по полю).

 – множитель атмосферы.

 – интерференционный множитель Земли.

Смысл характеристик  и  раскрывается ниже. Что касается , то отметим здесь следующее.

В основном уравнении радиолокации (8) величина  определялась значениями  и . Однако и коэффициент усиления передающей антенны и эффективная площадь приемной антенны являются функциями угловых координат  (угол места) и  (азимут). Для них можно записать

 (19)

где  и  - нормированные характеристики направленности по полю на передачу и прием, соответственно (диаграммы направленности).

Поскольку для совмещенного радиолокатора с одной антенной на прием и передачу , то



и дальность действия РЛС с учетом только направленных свойств антенны имеет вид  и совпадает с  только тогда, когда ось диаграммы направленности совпадает с направлением на цель.

# Влияние атмосферы на дальность действия РЛС

При распространении радиоволн в атмосфере происходит искривление траектории радиоволн (рефракция), рассеяние электромагнитной энергии свободными электронами в ионосфере и поглощение ее свободными молекулами кислорода, водорода, частицами воды и пыли (аэрозолями) в тропосфере. Рассеяние и поглощение электромагнитной энергии приводит к затуханию радиоволн, а, значит, к уменьшению дальности действия РЛС.

***Рефракция*** обусловлена изменением коэффициента преломления тропосферы и ионосферы, главным образом, по высоте. В тропосфере, особенно в нижних ее слоях, изменение коэффициента преломления  по высоте  обусловлено соответствующим изменением давления, температуры и абсолютной влажности воздуха. Скорость изменения коэффициента преломления по высоте (то есть, градиент коэффициента преломления ) определяет следующие виды рефракции:

1.  - рефракция отсутствует, траектория прямолинейна (рис.2, кривая 1);
2.  - отрицательная рефракция, траектория отклоняется вверх (рис.2, кривая 2);
3.  - положительная рефракция, траектория отклоняется вниз (рис.2, кривая 3);
4.  - критическая рефракция, траектория радиоволн круговая относительно центра Земли (рис.2, кривая 4);
5.  - сверхрефракция (рис.2, кривая 5), кривизна луча оказывается больше кривизны Земли, поэтому радиолуч, претерпевая полное внутреннее отражение от атмосферы, возвращается на Землю, отразившись от ее поверхности, вновь претерпевает полное внутреннее отражение и так далее. В результате возникает «атмосферный волновод» и радиоволны распространяются на большие расстояния.

Для точного расчета траекторий радиоволн необходимо знать закон изменения коэффициента преломления по высоте, а это, как правило, невозможно. Поэтому задаются так называемой «стандартной атмосферой», для которой

. (20)

|  |
| --- |
| Рис.2 |

Для учета влияния рефракции на дальность действия часто вводят эффективный радиус Земли , отличающийся от истинного  км. Эффективная кривизна Земли  отличается от истинной , на величину кривизны луча , то есть .

Учитывая, что , имеем

. (21)

При эквивалентном радиусе Земли высоты точек траектории луча над Землей остаются прежними, а радиоволны распространяются как бы по прямолинейной траектории (рис.3).

Для стандартной атмосферы (формулы (20) и (21)) имеем

 (22)

В силу кривизны земной поверхности рефракция влияет на дальность обнаружения радиолокатором низколетящих целей. При отрицательной рефракции дальность действия РЛС уменьшается, при положительной - увеличивается.

Остановимся подробнее на влиянии затухания радиоволн в атмосфере на дальность действия РЛС. Затухание начинает сказываться при длине волны РЛС  и зависит от длины волны  и состояния атмосферы. При в силу дифракции атмосфера «прозрачна».

|  |
| --- |
| Рис.3 |

При практическом расчете затухания учитывают поглощение и рассеяние энергии радиоволн:

дипольными молекулами кислорода;

водяными парами;

дождем;

туманом.

Учет всех этих факторов производится введением множителя атмосферы

, (23)

где – удельный коэффициент затухания волны за счет действия *i*-го возмущающего фактора;

 – длина участка трассы «РЛС – цель», где имеет место *i*-й возмущающий фактор.

Для однородной трассы имеем

. (24)

где  - суммарный удельный коэффициент затухания .

Составляющие суммарного коэффициента затухания определяются из соответствующих графиков (рис.4, 5) с учетом длины волны РЛС . При этом зависимость затухания от длины волны для дождя (рис.5) дается для различной его интенсивности , а аналогичная зависимость для тумана - для различной его плотности .

Сплошные кривые 1, 2, 3, 4 на рис.5 соответствуют затуханию от дождя с интенсивностью *α* = 0,25мм/час (моросящий); *α* = 1мм/час (слабый); *α* = 4мм/час (средней силы); *α* = 16мм/час (сильный). Пунктирные кривые 5, 6, 7 на рис.5 соответствуют затуханию в тумане или облаках с плотностью *ρ* = 0,032г/м3 (видимость 600 м); *ρ*= 0,32г/м3 (видимость 130 м); *ρ* = 2,3г/м3 (видимость 30 м).

Из графиков на рис.4, в частности, следует, что для длин волн  смзатухание мало, но существенно возрастает при укорочении *.*

В миллиметровом диапазоне существуют так называемые «окна прозрачности» между резонансными пиками на рис.4.

|  |  |
| --- | --- |
| Рис.4 | Рис.5 |

Итак, определив суммарный коэффициент затухания, можно по формуле (24) рассчитать множитель атмосферы.

С учетом влияния только затухания в атмосфере дальность действия РЛС выражается формулой

 (25)

где - дальность действия в свободном пространстве. Данное трансцендентное уравнение можно решить либо методом итераций, либо графически, если воспользоваться рис.6.

|  |
| --- |
| Рис.6 |

Отметим здесь, что кроме поглощения и рассеяния в тропосфере, рассмотренных выше, при распространении радиоволн происходит их затухание в ионосфере, обусловленное наличием здесь большого количества свободных электронов.

Однако, для областей естественной ионизации в радиодиапазоне это затухание пренебрежимо мало. Исключение может составлять случай, когда имеет место ядерный взрыв, приводящий к значительному увеличению электронной концентрации.

Еще одним фактором, обусловленным влиянием ионосферы и приводящим к уменьшению дальности действия РЛС, является эффект Фарадея, связанный с изменением поляризации принимаемых колебаний за счет действия магнитного поля Земли. Этот эффект имеет место для плоскополяризованного зондирующего сигнала и существенно ослабляется, если имеются раздельные каналы приема ортогонально поляризованных колебаний, либо используются сигналы с круговой поляризацией или многочастотные и широкополосные сигналы.

Дальность действия РЛС с учетом только эффекта Фарадея запишется в виде

 (26)

где  - дальность действия без учета эффекта Фарадея;

*Ф* – угол поворота плоскости поляризации при прохождении волны до цели и обратно;

 - коэффициент деполяризации, равный отношению ЭПР при полной деполяризации к основной ЭПР цели.

# Влияние земной поверхности на дальность действия РЛС

Кривизна Земли ограничивает видимость целей, а значит, и дальность действия РЛС, ***дальностью прямой видимости***  (рис.7). Если высота цели над поверхностью Земли *Н*, а высота подъема антенны , то при учете рефракции в стандартной атмосфере будем иметь

 (27)

где  - эффективный радиус Земли (учитывает рефракцию в стандартной атмосфере),  - в км, *Н* и  - в м.

|  |
| --- |
| Рис.7 |

В пределах прямой видимости вдоль радиогоризонта возможна интерференция прямых сигналов с отраженными от земной поверхности сигналами.

При отражении радиоволн от поверхности Земли могут иметь место два вида отражения: зеркальное (рис.8, а) и диффузное (рис.8, б), подчиняющееся закону Ламберта.

Переход от зеркального к диффузному отражению определяется высотой неровностей поверхности *h*, длиной волны РЛС  и углом скольжения .

При этом высота неровностей, при которой отражение становится зеркальным, удовлетворяет условию:

. (28)

|  |  |
| --- | --- |
| Рис.8 | Рис.9 |

Очевидно, что при наблюдении низколетящих целей имеет место именно зеркальное отражение. Итак, пусть имеется антенна, расположенная на высоте *hа* над поверхностью Земли, и цель на высоте *Н* (рис.9).

|  |
| --- |
| Рис.10 |

Поскольку электромагнитная энергия зондирующего сигнала распределяется, в основном, в пределах главного лепестка диаграммы направленности антенны, часть ее, перед тем как отразиться от цели, отражается от поверхности Земли.

Если прямая и отраженная от Земли волны синфазны, то дальность действия возрастает, если противофазны, то - уменьшается.

Учет интерференции реализуется введением множителя Земли . При этом дальность действия РЛС с учетом только множителя земли равна

. (29)

В простейшем случае, когда диаграмма направленности РЛС симметрична, расположена горизонтально, а отражение от земли зеркальное, имеем

. (30)

Кривые множителя земли для  представлены на рис.10.

Преобразуем (29) с учетом (30), имея ввиду, что угол  -мал. Тогда  и

. (31)

Таким образом, при локации низколетящих целей дальность действия РЛС пропорциональна корню восьмой степени от технических характеристик РЛС, то есть существенно меньше дальности действия в свободном пространстве. Связано это с наличием провалов множителя земли при малых углах места .

**Зоны видимости РЛС**

|  |
| --- |
| Рис.11 |

Зоной видимости РЛС называют часть пространства, в пределах которой радиолокатор функционирует с заданными показателями качества при заданной ЭПР цели. Зона видимости имеет пространственную конфигурацию, определяемую формой диаграммы направленности РЛС. Ее отображают в виде горизонтальных и вертикальных сечений.

Границы зоны видимости для обзорных РЛС в горизонтальной плоскости представляют собой окружности. При построении вертикального сечения зоны видимости необходимо учитывать множитель земли. Вертикальное сечение зоны видимости строится в декартовой системе координат «высота – дальность» и для горизонтально ориентированной ДН антенны и множителя земли вида (10) показано на рис.11, в. На рис.7.11, а и рис.7.11, б соответственно представлены диаграмма направленности РЛС и интерференционный множитель земли.

Учитывая рефракцию и кривизну Земли, зоны видимости корректируют, используя прямоугольную систему координат «наклонная дальность - приведенная высота», как это показано на рис.12.

При этом приведенная высота, как следует из рис.13, равна

, (32)

где  - истинная высота цели;

 - поправка высоты, учитывающая сферичность Земли и рефракцию;

 - наклонная дальность.

На графике зон видимости (рис.12) обычно указывают линии равных истинных высот и линии равных углов места.

|  |  |
| --- | --- |
| Рис.12 | Рис.13 |

# Разновидности уравнений дальности

Выше получены уравнения дальности действия РЛС в свободном пространстве (8), дальности действия с учетом различных возмущающих факторов (18), дальности прямой видимости (27).

Приведем еще некоторые разновидности уравнений дальности.

Технические характеристики, используемые при расчете дальности действия РЛС в свободном пространстве (8), можно считать независимыми лишь при отсутствии обзора. В режиме обзора энергия излучаемого сигнала не концентрируется в секторе, определяемом шириной диаграммы направленности по уровню половинной мощности , а распределяется по всему сектору обзора . Поэтому наряду с коэффициентом усиления антенны  вводится эквивалентный коэффициент усиления . Тогда число накапливаемых импульсов пачки (если используется пачечный сигнал) равно

,

где  - период обзора (время, затраченное на один цикл обзора);

 - период следования импульсов пачки.

Поэтому

,

где  - энергия излучаемой пачки импульсов;

 *-* энергия одного импульса пачки.

Из данного выражения следует, что  и , входящие в выражение дальности (8), уже не являются независимыми.

Так как , то  и, окончательно,

. (33)

Или, т.к.  и , , то , откуда , и

 (34)

Это **уравнение дальности действия РЛС в режиме обзора**. Из (33) следует, что для увеличения дальности действия в режиме обзора необходимо увеличивать:

* 1. период обзора, что при заданном секторе обзора соответствует уменьшению угловой скорости сканирования;
  2. среднюю мощность передатчика;
  3. эквивалентный коэффициент усиления антенны . Поскольку , для увеличения дальности при прочих равных условиях необходимо уменьшать сектор обзора.

Однако практическое использование всех этих способов увеличения дальности ограничено. Действительно, сектор обзора является важнейшей тактической характеристикой РЛС и наперед задан, поэтому уменьшать его нельзя.

Увеличение средней мощности передатчика ограничено электрической прочностью трактов, а увеличение периода обзора приводит к уменьшению темпа выдачи данных, что в ряде случаев тоже недопустимо.

Еще одной модификацией уравнения дальности является дальность действия запросной и ответной линии связи, если реализуется активный вид радиолокации с активным ответом. Индекс 1 ниже относится к запросчику, а индекс 2 к ответчику.

Итак, для решения задачи обнаружения запросных сигналов приемником ответчика необходимо, чтобы энергия принятого сигнала запроса  (в соответствии с (4) и )превышала пороговую энергию приемника ответчика .

Отсюда максимальная дальность действия ***запросной*** линии связи

. (35)

Аналогично максимальная дальность действия ***ответной*** линии связи

. (36)

Общей особенностью выражений (34) и (35) является пропорциональность максимальных дальностей квадратному корню отношения , что отличает линии связи от линий активной локации с пассивным ответом.

Благодаря этому **дальность радиолокационного наблюдения в РЛС с активным ответом** существенно больше, чем у обычных активных РЛС, обладающих тем же энергетическим потенциалом.

Для односторонней линии связи можно записать в общем виде:

 (37)

Результирующая дальность локации с активным ответом ограничивается минимальной из двух перечисленных. В сбалансированных системах выполняется равенство .

**Точки излучения и приема радиоволн могут быть разнесены в пространстве** (рис. 14). При этом максимальное значение произведения дальности  от передатчика до цели и  от цели до приемника определяется формулой:

. (38)

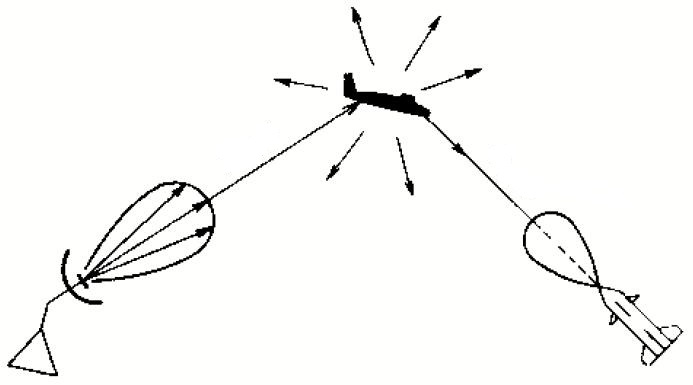


Рис.14.