# ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМНИКА

Чувствительность приемника РЛС характеризует его способность принимать слабые сигналы. Реальной чувствительностью , входящей в уравнение дальности, называется минимальная мощность сигнала на входе приемника, при которой на выходе его линейной части обеспечивается необходимое отношение сигнал/шум по мощности :

, (1)

где  Дж/К – постоянная Больцмана;

 - абсолютная температура в Кельвинах (применяется равной 290 К);

 - эффективная шумовая полоса пропускания приемника;

 - коэффициент шума приемной аппаратуры;

 - суммарный коэффициент различимости.

***Эффективная шумовая полоса пропускания приемника*** связана с полосой пропускания приемника  приближенным соотношением

. (2)

Входящая в эту формулу полоса пропускания приемника  определяется равенством

, (3)

где  - эффективная ширина спектра импульса длительностью ;

 - коэффициент формы (для прямоугольного импульса равный 1,37);

 - максимально возможное доплеровское смещение частоты;

 - абсолютная нестабильность частоты, определяемая формулой

, (4)

где  и  - нестабильности несущей частоты сигнала  и частоты гетеродина  соответственно;

 и  - неточность настроек частот гетеродина и УПЧ.

В таблице 1 приведены относительные нестабильности частоты различных типов генераторов, которые могут использоваться в передатчиках и в качестве гетеродинов.

Относительные нестабильности  и  имеют порядок соответственно (0,003…0,01) и (0,0003…0,003).

Если применяется частотная автоподстройка частоты гетеродина, то

, (5)

где  - коэффициент стабилизации системы частотной автоподстройки частоты.

Если применяется фазовая автоподстройка частоты гетеродина, то

, (6)

так как коэффициент стабилизации системы фазовой автоподстройки частоты .

Таблица 1.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Тип гетеродина** | | |  | |
| Ниже 30 МГц | Выше 30 МГц |
| Транзисторный | Однокаскадный | Без кварцевой стабилизации |  |  |
| С кварцевой стабилизацией |  | - |
| Многокаскадный с умножением частоты и кварцевой стабилизацией | |  |  |
| На туннельном диоде | | | - |  |
| На отражательном клистроне | | | - |  |

Транзисторные однокаскадные гетеродины с кварцевой стабилизацией можно применять до частот 10 МГц, а без кварцевой стабилизации – до 500 МГц. Транзисторные многокаскадные гетеродины с умножением частоты и кварцевой стабилизацией применяют до частот 10 ГГц.

Гетеродины на туннельных диодах применяют на частотах 0.5…100 ГГц, а на отражательных клистронах – на частотах 3…50 ГГц.

***Коэффициент шума приемной части радиоканала*** , входящий в выражение, определяющее чувствительность приемной части, определяется не только тепловым шумом собственно приемника, но и внешними шумами, характеризуемыми шумовой температурой антенны и коэффициентом шума фидера, соединяющего антенну с входом приемника

, (7)

где  - суммарная эквивалентная эффективная шумовая температура приемной части РЛС, пересчитанная к облучателю антенны (входу антенны);

 - стандартная шумовая температура, принимаемая в расчетах, равной 290 Кельвинов.

Шумовая температура

, (8)

где  - шумовая температура антенны, порожденная внешними источниками теплового шума – космоса, атмосферы и Земли;

 - шумовая температура фидера, соединяющего антенну с входом приемника, пересчитанная ко входу антенны;

 - шумовая температура собственно приемника, пересчитанная ко входу антенны.

, (9)

, (10)

, (11)

где  - коэффициент передачи фидера по мощности;

 - погонное затухание в фидере (таблица 2);

 - длина фидера;

 - шумовая температура собственно приемника;

 - коэффициент шума приемника.

Таблица 2.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Тип фидера** | **Частота, ГГц** | **Затухание, дБ/м** |
| Волновод прямоугольный, медный, посеребренный | 75…150 | 3,5…7 |
| 37,5…75 | 1,2…2,9 |
| 25…37,5 | 0,46…1,2 |
| 7,5…10 | 0,09…0,13 |
| 4,0…6,5 | 0,037…0,046 |
| 2,0…3,0 | 0,015…0,022 |
| Коаксиальный кабель РК-103 | 0,045 | 0,05 |
| 3,0 | 0,9 |
| Коаксиальный кабель РК-120 | 0,045 | 0,19 |
| 3,0 | 1,1 |
| Коаксиальный кабель РК-64 | 0,045 | 0,08 |
| 3,0 | 1,0 |

Шумовая температура внешних источников шума  определяется выражением

, (12)

где  - шумовая температура космических источников теплового шума;

 - шумовая температура неба;

ε – угловое положение максимума луча диаграммы направленности антенны относительно горизонта;

 - шумовая температура атмосферы;

 - совокупный коэффициент затухания радиоволн в атмосфере Земли (включая поглощение в парах воды и в кислороде, а также в метеообразованиях);

 - удельный коэффициент затухания *i*-го фактора;

 - протяженность участка действия *i*-го поглощающего фактора;

 - коэффициент, учитывающий прием по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны.

Количественные значения  в зависимости от частоты приведены в таблице 3.

Таблица 3.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***f*, ГГц** | | **0,1** | **0,3** | **0,6** | **0,9** | **1,2** | **1,5** | **1,8** | **2,1** |
| К | от экватора Галактики | 1000 | 140 | 30 | 12 | 6 | 4 | 2,5 | 1,3 |
| от полюсов Галактики | 100 | 12 | 3 | 1,2 | - | - | - | - |

В таблице 4 приведены графические зависимости  от частоты и угла места ε направления максимума диаграммы направленности антенны.

Таблица 4.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***f*, ГГц** | | **0,1** | **0,2** | **0,4** | **0,6** | **0,8** | **1,0** | **2,0** | **4,0** | **6,0** | **8,0** | **10,0** | **15,0** |
| К |  | 7,0 | 20,0 | 47,0 | 64,0 | 80,0 | 85,0 | 100,0 | 120,0 | 130,0 | 140,0 | 150,0 | 200,0 |
|  | 3,0 | 7,0 | 14,0 | 16,0 | 19,0 | 20,0 | 22,0 | 24,0 | 27,0 | 32,0 | 39,0 | 60,0 |
|  | 1,3 | 7,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 11,0 | 13,0 | 14,0 | 15,0 | 16,0 | 19,0 | 26,0 |
|  | - | 1,0 | 2,0 | 2,4 | 2,8 | 3,0 | 3,3 | 3,6 | 3,7 | 3,9 | 4,3 | 6,0 |
|  | - | - | 1,0 | 1,6 | 1,8 | 2,0 | 2,2 | 2,4 | 2,8 | 3,4 | 4,1 | 5,0 |

В таблице 5 приведены графические зависимости удельных коэффициентов затухания радиоволн в метеообразованиях , позволяющие рассчитать совокупный коэффициент затухания  на трассе их распространения, где 1 – очень слабый дождь (0,2 мм/ч); 2 - слабый дождь (1 мм/ч); 3 - средний дождь (4 мм/ч); 4 – сильный дождь (16 мм/ч); 5 – туман с видимостью 600 м, 6 – туман с видимостью 130 м; 7 – туман с видимостью 30 м.

Таблица 5.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **λ, см** | **0,3** | **0,4** | **0,6** | **0,8** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
| **дБ/км** |
| **1** | 0,3 | 0,2 | 0,12 | 0,073 | 0,043 | 0,008 | 0,003 | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** |
| **2** | 1,0 | 0,75 | 0,44 | 0,3 | 0,2 | 0,34 | 0,01 | 0,005 | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** |
| **3** | 2,4 | 2,0 | 1,3 | 1,0 | 0,7 | 0,17 | 0,03 | 0,022 | 0,009 | 0,005 | **-** | **-** | **-** | **-** |
| **4** | 9,0 | 8,3 | 6,4 | 5,2 | 4,0 | 1,3 | 0,005 | 0,2 | 0,084 | 0,043 | 0,02 | 0,008 | 0,004 | **-** |
| **5** | 0,13 | 0,08 | 0,034 | 0,022 | 0,014 | 0,04 | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** |
| **6** | 1,5 | 0,9 | 0,4 | 0,23 | 0,15 | 0,038 | 0,016 | 0,01 | 0,006 | **-** | **-** | **-** | **-** | **-** |
| **7** | 10 | 6 | 2,4 | 1,6 | 0,09 | 0,24 | 0,11 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,022 | 0,015 | 0,013 | 0,01 |

В таблице 6 приведены удельные коэффициенты затухания в парах воды и атомах кислорода атмосферы Земли.

Таблица 6.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **λ, см** | **0,1** | **0,3** | **0,5** | **0,8** | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
| **дБ/км** |
| **O2** | 0,009 | 0,1 | 11,0 | 0,09 | 0,04 | 0,008 | 0,005 | 0,0045 | 0,004 | 0,0035 | 0,003 | 0,0028 | 0,0025 | 0,0023 |
| **Пары**  **H2O** | 0,003 | 0,1 | 0,07 | 0,09 | 1,0 | 0,06 | 0,006 | 0,0008 | 0,0008 | - | - | - | - | - |

***Коэффициент различимости*** , входящий в формулу (1), определяется в конечном итоге требуемыми условными вероятностями правильного обнаружения *D* и ложной тревоги *F* и зависит от качества обработки сигнала в приемном тракте, характеризуемого коэффициентом потерь :

, (13)

где  - пороговое отношение сигнал/шум, однозначно определяемое заданными значениями условных вероятностей правильного обнаружения *D* и ложной тревоги *F* при определенном типе принимаемого сигнала;

*M* – число импульсов в пачке (если используется непрерывное излучение, то );

 - коэффициент сжатия импульса в согласованном приемнике, равный единице для простых сигналов и больше единицы у широкополосных сигналов (, где *B* – база сигнала).

Для одиночного сигнала с полностью известными параметрами  определяется выражениями

, (14)

, (15)

где  - функция Крампа;

 - нормированный порог обнаружения;

σ - среднеквадратическое значение шума.

При обнаружении одиночного сигнала, известного полностью при  и , с погрешностью, не превышающей 15%,  можно определить по приближенной формуле

. (16)

Если принимается одиночный сигнал со случайной начальной фазой, то при  и , с погрешностью, не превышающей 15%,  приближенно равен

. (17)

Если принимается одиночный сигнал со случайной начальной фазой и флуктуирующей амплитудой, то  определяется формулой

. (18)

Этой же формулой можно пользоваться, если сигнал представляет собой когерентную пачку из *M* одинаковых импульсов, которая обрабатывается согласованным фильтром. При этом  заменяется на отношение мощности пачки к мощности шума на выходе устройства обработки

.

Если принимаемый сигнал представляет собой пачку некогерентных *M* импульсов, то

. (19)

Эта формула может использоваться с погрешностью вычисления, не превышающей 2 дБ, если выполняется условие

 (20)

и амплитуда импульсов в пачке не флуктуирует.

Для флуктуирующих по амплитуде пачек импульсов (случай дружных флуктуаций) среднее значение отношения сигнал/шум определяется выражением

. (21)

Погрешность вычислений не превышает 15% при  и .

Коэффициент потерь отношения сигнал/шум

, (22)

где  - коэффициент потерь в *i*-ом функциональном узле приемного тракта.

Наиболее часто встречающиеся коэффициенты потерь , которыми могут характеризоваться узлы в приемнике РЛС, следующие:

 - потери, возникающие вследствие изменения амплитуды принимаемых сигналов при сканировании ДН;

 - потери в высокочастотном тракте, вызываемые затуханием энергии в фидерах и антенных коммутаторах;

 - потери в детекторе, среднее значение которых может быть определено по таблице 7, в зависимости от числа импульсов *M* в пачке;

Таблица 7.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***M*** | **1** | **6** | **10** | **20** | **40** | **60** | **80** | **100** | **200** | **400** | **600** | **800** | **1000** |
|  | 1 | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 2,4 | 3,0 | 3,3 | 3,4 | 4,7 | 6,3 | 7,3 | 8,4 | 9,5 |

 - потери, вызванные заменой оптимального фильтра в приемнике квазиоптимальным фильтром, согласованным со спектром сигнала только по полосе пропускания (таблица 8).

Таблица 8.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Форма импульса** | **Форма ЧХ** |  |  |
| Прямоугольная | Прямоугольная | 1,37 | 1,21 |
| Прямоугольная | Гауссова | 0,72 | 1,26 |
| Гауссова | Гауссова | 0,44 | 1,00 |
| Прямоугольная | Одиночный резонансный контур | 0,40 | 1,24 |
| Прямоугольная | Два резонансных контура | 0,613 | 1,14 |
| Прямоугольная | Пять резонансных контура | 0,672 | 1,12 |

 - потери в видеоусилителе, которые могут быть определены по таблице 8 вычислением удвоенной полосы пропускания ФНЧ  на длительность импульса ,

,

где  - согласованная полоса пропускания УПЧ, равная эффективной ширине спектра сигнала ;

 - потери, возникающие вследствие несогласования УПЧ с сигналом по полосе пропускания и является функцией отношения реальной полосы пропускания УПЧ  (3) к согласованной .

Определяется эффективное число импульсов

. (23)

Затем по таблице 7 определяется  при , и по ранее найденному  определяется

, (24)

 - потери в накопителе, определяемые нелинейностью характеристики накопителя.

При использовании экспоненциального накопителя (рециркулятора) с весовым множителем  потери  можно найти по таблице 9.

Таблица 9.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***M*** | | **1** | **10** | **20** | **30** | **40** | **50** | **60** | **70** | **80** | **90** | **100** |
|  |  | 1 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 3,8 | 5,0 | 6,0 | 7,3 | 8,8 | 11,5 | 14 |
|  | 1 | 1,1 | 1,3 | 1,7 | 2,2 | 2,6 | 3,2 | 3,4 | 4,0 | 4,5 | 5 |
|  | 1 | 1,05 | 1,1 | 1,2 | 1,5 | 1,7 | 2,0 | 2,3 | 2,6 | 2,9 | 3,4 |
|  | 1 | 1,01 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,06 | 1,1 | 1,15 | 1,21 | 1,29 | 1,39 |

Если накопитель линейный, ;

 - потери в индикаторе, возникающие при использовании для наблюдения отметок целей ЭЛТ с яркостной отметкой. Эти потери связаны с различным временем накопления в индикаторе полезного сигнала и шума.

Для определения  нужно вычислить величину

, (25)

где  - скорость перемещения рисующего пятна диаметром  по экрану индикатора, затем найти

, (26)

и, пользуясь таблицей 7, определить

, (27)

 - потери оператора, связанные с условиями работы оператора (затенённость помещения, утомление, рассеивание внимания, число одновременно наблюдаемых целей и т.д.) и равные

; (28)

 - потери при автоматическом съеме данных, возникающие вследствие того, что отсчет выходного напряжения производится не в тот момент, когда сигнальная составляющая достигает максимума. Эти потери

; (29)

 - потери, связанные с бинарным квантованием видеосигнала перед накопителем. Эта величина зависит от вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги.

В таблице 10 подставлена зависимость  как функция числа *M* импульсов в пачке при вероятностях правильного обнаружения  и ложной тревоги . Этой таблицей можно пользоваться при ориентировочном расчете  с учетом того, что при увеличении вероятности правильного обнаружения *D* коэффициент  уменьшается. В таблице 10  - значение порога обнаружения пачки бинарно-квантованных импульсов.

Таблица 10.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***M*** | | **1** | **2** | **4** | **6** | **8** | **10** | **20** | **40** | **60** | **80** | **100** |
| дБ |  | 0 | 2,3 | 4,5 | 6,0 | 6,8 | 7,5 | 9,8 | 12,0 | 13,5 | 14,5 | 16,0 |
|  | 0 | 1,0 | 2,0 | 2,8 | 3,3 | 3,5 | 4,6 | 5,7 | 6,3 | 6,8 | 7,0 |
| Некогерентное накопление | 0 | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 1,9 | 1,4 | 2,0 | 3,0 | 3,8 | 4,0 | 4,3 |