

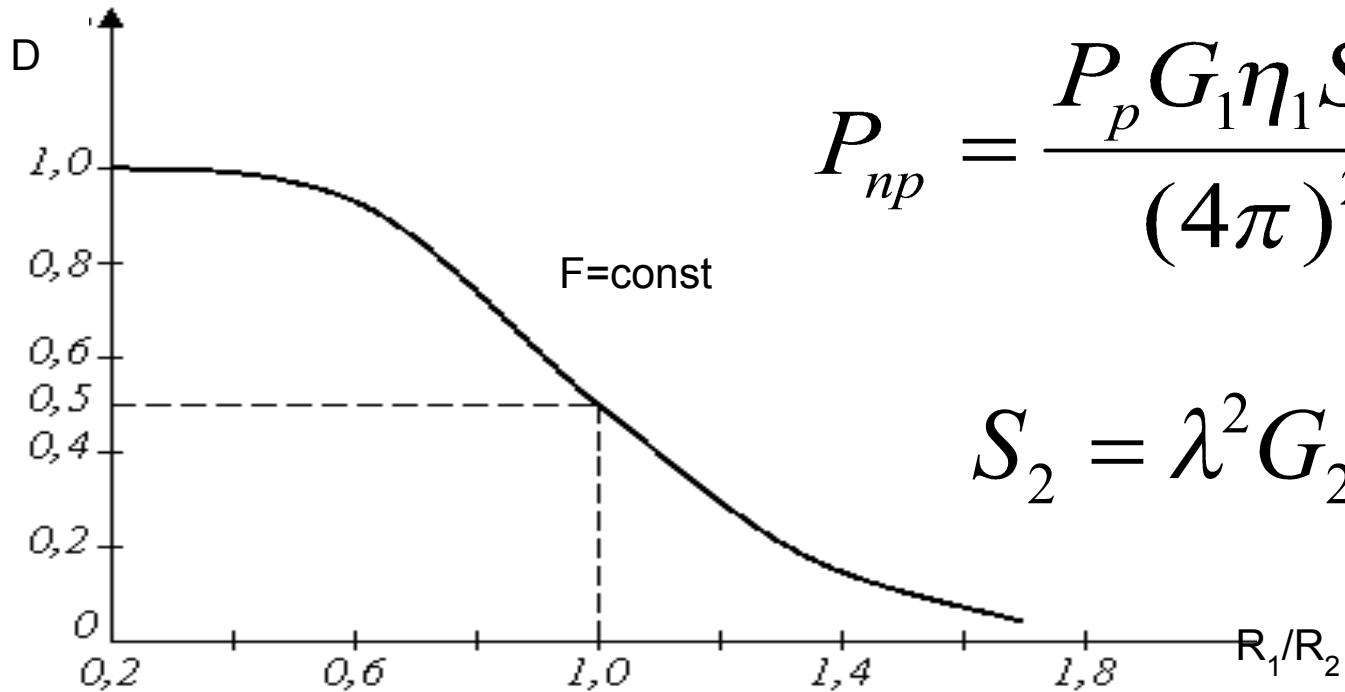
УРАВНЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Дальность действия РЛС в свободном пространстве

Дальностью действия радиолокационной станции называется наибольшее расстояние между РЛС и целью, на котором ее обнаружение производится с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги.

Дальность действия зависит от различных факторов: технических параметров станции, характеристик цели, условий распространения радиоволн, наличия и уровня различного рода помех и ряда других факторов, большинство из которых изменяется во времени случайным образом. График иллюстрирует характер зависимости относительного изменения дальности обнаружения от значения вероятности правильного обнаружения D при заданной ложной тревоге F .

Вначале рассмотрим дальность действия РЛС без учёта влияния земной поверхности и атмосферы на распространение радиоволн, т.е. РЛС и цель находятся в «свободном» пространстве.



$$P_{np} = \frac{P_p G_1 \eta_1 S_2 \eta_2 S_0}{(4\pi)^2 R^4}$$

$$S_2 = \lambda^2 G_2 / 4\pi$$

На входе приемника активной РЛС пороговая мощность сигнала при обнаружении:

$$P_{пор} = \frac{P_p G_1 G_2 \lambda^2 S_c}{(4\pi)^3 R_{max}^4} \quad \frac{P_c}{P_{ш} k_r} > q_c k_p'$$

$S_a = S_2$ – активная площадь антенны, $S_c = S_0$ – ЭПР цели.

Для РЛС с пассивным ответом

$$R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p G_1 G_2 \lambda^2 S_c}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}}}} \quad R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p S_{a1} S_{a2} S_c}{4\pi \lambda^2 P_{\text{пор}}}}$$

Для РЛС с активным ответом

$$R_{\max 0} = \sqrt{\frac{P_p G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}}}} \quad R_{\max 0} = \sqrt{\frac{P_p S_{a1} S_{a2}}{4\pi \lambda^2 P_{\text{пор}}}}$$

Если РЛС использует импульсный сигнал и имеет одну антенну (на передачу – прием), то УДРО упрощается:

$$R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p G^2 \lambda^2 S_c}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}}}} \quad R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p S_a^2 S_c}{4\pi \lambda^2 P_{\text{пор}}}}$$

Дальность действия запросчика и ответчика активной РЛС должны быть эквивалентными.

При прямолинейном распространении радиоволн дальность действия ограничивается зоной прямой видимости.

Зона прямой видимости и учет сферичности земли для вычисления высоты цели:

$$R_{\text{ПВ}} = 4,12(\sqrt{H} + \sqrt{h}) \quad H = H_{\Gamma} + \Delta H \quad \begin{array}{l} H_{\Gamma} - \text{высота цели над} \\ \text{горизонтальной поверхностью, } \Delta H - \\ \text{поправка на сферичность, } R_3 - \\ \text{радиус Земли.} \end{array}$$
$$H_{\Gamma} = h + R \sin \beta \quad \Delta H = R^2 / (2R_3)$$

Форма ДНА влияет на наблюдаемость целей на экране индикатора и поэтому в РЛС УВД и РЛС обзора земной поверхности используют ДН типа «cosec».

Влияние атмосферы и подстилающей поверхности на дальность действия РЛС

Причина затухание и рефракция (отрицательная или положительная, а также сверхрефракция – явление атмосферного волновода).

Градиент коэффициента преломления радиоволн для стандартной атмосферы:

$dn / dH = -4 * 10^{-8} \text{ м}^{-1}$ Эффективный радиус Земли, при котором высота траектории РРВ не меняется за счет рефракции, а сигнал распространяется прямолинейно. Радиус кривизны траектории в атмосфере R_T :

$$\frac{1}{R_{3.\text{эф}}} = \frac{1}{R_3} + \frac{dn}{dH}.$$

$$R_T = \frac{dn}{dH}; \quad R_{3.\text{эф}} = \frac{R_3}{1 + R_3 \frac{dn}{dH}} = k R_3$$

Т.к. $R_{з} \approx 6370$ км, то $R_{з.эф} \approx 8500$ км. Пусть удельное затухание в атмосфере α , то общее затухание на трассе $2R$ равно $L = 2\alpha R$. Затухание

$$L = 10 \log \frac{P_{20}}{P_2}; \quad P_2 = P_{20} 10^{-0,2\alpha R}.$$

На предельной
дальности

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_p G_1 G_2 \lambda^2 S_c}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}}}} 10^{-0,05\alpha R_{\max}} \quad R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_p S_{a1} S_{a2} S_c}{4\pi \lambda^2 P_{\text{пор}}}} 10^{-0,05\alpha R_{\max}}$$

Ил
и

$$R_{\max} = R_{\max 0} 10^{-0,05\alpha R_{\max}}$$

Более подробно влияние атмосферы и подстилающей поверхности Бакулев П.А. Радиолокационные системы, изд. 2007 г., стр.128-133. (Изд. 2005 г., стр. 122-127).

Влияние подстилающей поверхности на дальность обнаружения низколетящих целей

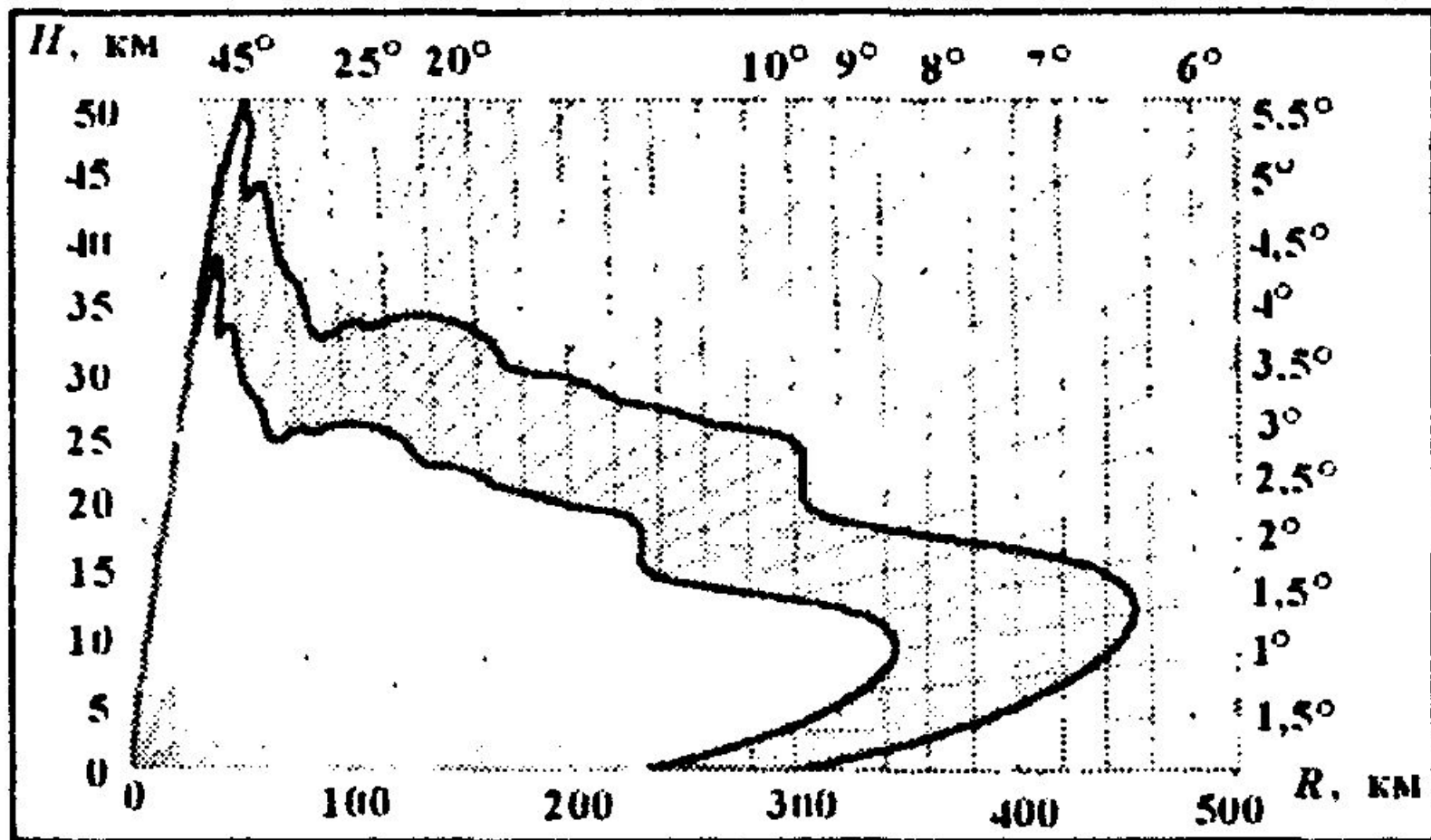
Т.к.

$$R_{\max} = R_{\max 0} \frac{4\pi h}{\lambda R_{\max}}, \quad R_{\text{ПВ}} = 4,12(\sqrt{H} + \sqrt{h})$$

Тогда с учетом атмосферы и при малой высоте цели

$$R_{\max} = \sqrt[8]{\frac{P_p G^2 S_c 4\pi h^4 H^4}{\lambda^2 P_{\text{пор}}}} 10^{-0,05\alpha R_{\max}}$$

Зона обнаружения (зона видимости) строится в координатах «высота-дальность»
С учетом влияния рефракции и подстилающей поверхности.



Пример зоны обнаружения в вертикальной плоскости для радиолокатора «Утес-Т» (светлая зона – работа на одной частоте, темная зона – на двух частотах)

Пассивные помехи в РЭС

1. Пассивные помехи проявляются только при работе радиопередающих устройств. Пассивные помехи формируются за счет отражения зондирующих сигналов подавляемых РЛС от искусственно создаваемых отражателей (облаков дипольных отражателей, аэрозолей).
2. Источник пассивных помех пространственно расположен в непосредственной близости от обнаруживаемого объекта.
3. Мощность пассивных помех, как правило, значительно больше мощности шума на входе приемника РЛС.
4. Источник пассивной помехи, как правило, значительно медленнее перемещается в пространстве по сравнению с целью.
5. Пассивную помеху от белого гауссовского шума отличает узкополосность спектра. Эти отличия во временной области проявляются в структуре и параметрах корреляционной функции.

Таким образом отражения типа пассивной помехи – узкополосный случайный процесс, центральная частота спектра которого незначительно смещена относительно частоты зондирующего сигнала (доплеровская составляющая спектра мала).

Дальность действия РЛС в условиях пассивных помех

$$P_c = K S_c,$$

$$P_n = K S_n,$$

$$K = \frac{P_p G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

где S_c, S_n – эффективные площади рассеяния цели и помехи,

$$\frac{P_c}{(P_n + P_{ш})k_r} > q_c k_p \quad - \text{условие обнаружения цели, } k_r \text{ и } k_p \text{ - потери при приеме и обработке сигнала}$$

Т.к.

$$D = F^{\frac{1}{1 + \mu q_{вх}}} \quad q_{вх} = q_{вх} \mu \quad D = F^{\frac{1}{1 + q_{вх}}}$$

$$q_{вх} = \left(\frac{\ln F}{\ln D} - 1 \right) k_r k_p$$

P_0 – минимальная мощность сигнала на входе приемного устройства, необходимая для обнаружения цели с ЭПР S_c при заданных вероятностях правильного обнаружения D и ложной тревоги F (пороговая мощность).

$$P_0 = \frac{k_c P_c / P_{ш}}{k_n P_n / P_{ш} + 1}$$

k_c, k_n – коэффициенты передачи сигнала и помехи по мощности.

$$\mu = \frac{P_c P_0}{P_n + P_{ш}}$$

$K_{с max} = N$; $k_n = P_{ш}/P_n$, где N – число импульсов в пачке.

$$P_p = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_{ш}}{G^2 \lambda^2 \left(\frac{S_c k_c}{q_{вых}} - S_n k_n \right)} \quad R = \sqrt[4]{\frac{P_p G^2 \lambda^2 \left(\frac{S_c k_c}{q_{вых}} - S_n k_n \right)}{(4\pi)^3 P_{ш}}}$$

$P_{ш} = P_{пор}$ соответствует минимальной чувствительности приемника РЛС.

Формулы для P_p и R отражают взаимозависимость энергетических и вероятностных параметров РЛС в условиях помех.

Методы защиты РЛС от пассивных помех

Мощность пассивных помех (ПП) значительно превышает мощность сигналов целей и шумов. В результате перегружается приемник РЛС, маскируются сигналы целей, повышается вероятность ЛТ.

Защита от ПП осуществляется в антенном тракте, тракте ВЧ, ПЧ (внутриимпульсная обработка), видеочастоты (межпериодная обработка).

Создаются ДНА с «подрезанной» нижней кромкой, двухлучевые антенны с компенсацией, используется ВАРУ, МАРУ и БАРУ.

Для защиты РЛС от пассивных помех в тракте видеочастоты используются свойства, отличающие их от сигнала цели:

1. узкополосный характер спектра ПП;
2. центральная частота спектра ПП незначительно смещена относительно несущей частоты зондирующего сигнала.

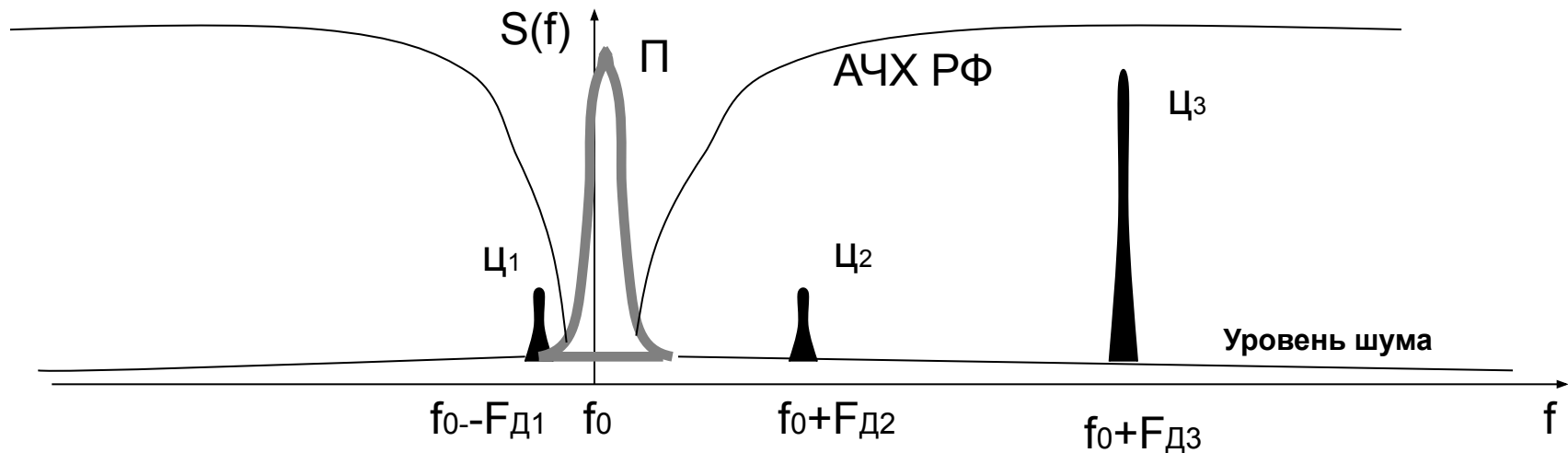


Рис. Спектры сигналов цели, пассивной помехи и шума, АЧХ режекторного фильтра

Активные помехи



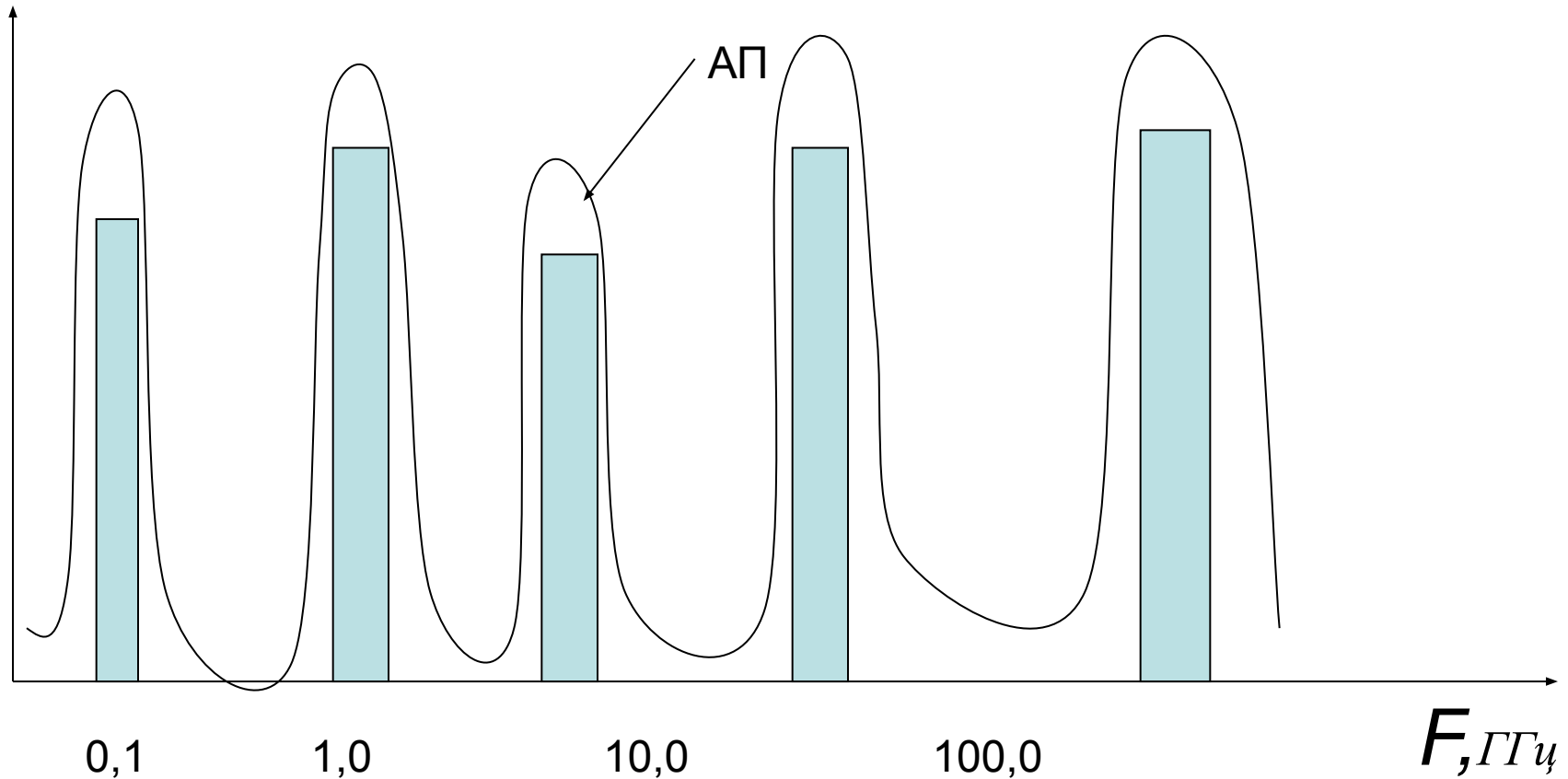
Частотные диапазоны АП

Для обнаружения необходимо превышение сигналом шума на $\sim q > 5$ дБ, поэтому целью создания помех является снижение этого показателя.

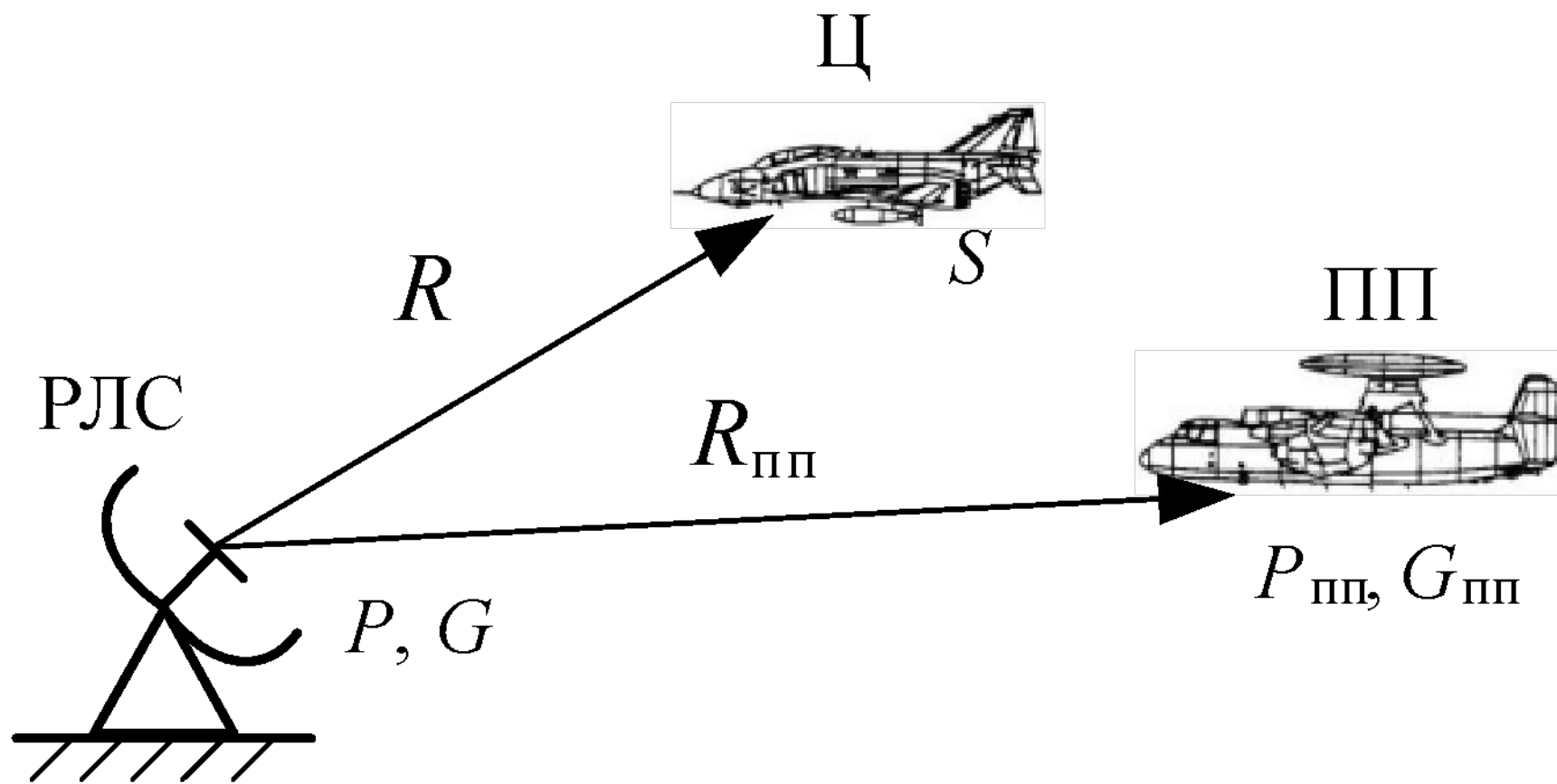
Генерацию и излучение помех осуществляют специализированные станции активных помех (САП). По принципу формирования несущей частоты помехи САП делятся на САП ретрансляционного типа и САП генераторного типа.

САП размещают на защищаемых объектах или вне их. Современные самолётные станции помех имеют мощность $\sim (10 \dots 10^3)$ Вт в непрерывном режиме и примерно на порядок выше — в импульсном; максимальное усиление антенны 10—20 дБ. В качестве передающего устройства применяются широкополосные усилители на лампах бегущей волны и усилители с распределёнными постоянными, генераторы на лампах обратной волны, магнетронах и др. приборах СВЧ, перестраиваемых в широком диапазоне частот. Наиболее эффективны станции помех с фазированными антенными решётками. Современные пассивные отражатели реализуют на миниатюрных электронных усилителях и генераторах, т.е. и они уже являются активными средствами радиопротиводействия.

Активность РЭС по частотному диапазону



Обозначение	L	S	C	X	K_u	K	K_a	MM
Диапазон, ГГц	2,0	4,0	8,0	12,5	18,0	26,5	40,0	>40



Дальность действия РЛС в условиях активных помех

Типы активных помех: заградительные, прицельные (импульсные или непрерывные; по частоте и направлению), маскирующие, уводящие, мерцательные, имитирующие, ответные (однократные или многократные). По характеру перекрытия частотного диапазона активные помехи разделяют на заградительные и прицельные. Заградительные помехи имеют широкий спектр частот, значительно превышающий полосу пропускания приемника подавляемой РЛС: $\Delta f_{пп} \gg \Delta f_{пр}$, где $\Delta f_{пп}$ – диапазон спектра частот помехи, $\Delta f_{пр}$ – полоса пропускания приемника. Для создания ЗП достаточно приближенно знать рабочие частоты РЛС, поэтому разведывательная аппаратура ПП является относительно простой.

Недостаток: малая эффективность использования энергии передатчика помех, т.к. мощность помехи на входе приемника пропорциональна $\Delta f_{пр} / \Delta f_{пп}$.

Прицельные помехи имеют спектр частот, соизмеримый с полосой пропускания подавляемой РЛС: $\Delta f_{пп} \approx \Delta f_{пр}$. Центральная частота спектра прицельной помехи должна соответствовать несущей частоте РЛС. Мощность передатчика ПП используется эффективнее, чем у ЗП. Однако необходимо точнее знать несущую частоту РЛС и требуются ВЧ генераторы помех с быстрой перестройкой частоты.

Таким образом:

заградительные имеют $\Delta F_{\Pi} \gg \Delta f_{\text{пр}}$.

Отношение $\mathcal{E}_{\Pi} / \Delta F_{\text{пп}}$ определяет спектральную плотность помех.

Энергетически выгоднее применение прицельных помех. $\Delta F_{\text{пп}} \approx \Delta f_{\text{пр}}$.

Отсюда следует, что параметр $\mathcal{E}_{\Pi} / \Delta F_{\text{пп}}$ для прицельных помех много меньше, чем для заградительных помех.

$$\Pi_{\Pi} = \frac{P_{\text{пп}} G_{\text{пп}} \eta_{\text{пп}}}{4\pi R_{\text{пп}}^2} \quad \text{- плотность потока мощности на вх. антенны РЛС}$$

$$S_a = G' \lambda^2 / 4\pi \quad \text{- эффективная площадь раскрыва антенны}$$

$$P_{\text{п0}} = \Pi_{\Pi} S_a \eta \frac{\Delta f_{\text{пр}}}{\Delta F_{\text{пп}}} = \frac{P_{\text{пп}} G_{\text{пп}} G' \eta \eta_{\text{пп}} \lambda^2 \Delta f_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R_{\text{пп}}^2 \Delta F_{\text{пп}}} \quad \text{- мощность АП на вх. приемника}$$

Обозначим $K_{\text{бл}}$ - уровень БЛ ДНА РЛС, K_{Π} - коэффициент подавления активной помехи в РЛС,

$$P_{\Pi} = \frac{P_{\text{III}} G_{\text{III}} G' \eta \eta_{\text{III}} \lambda^2 \Delta f_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R_{\text{III}}^2 K_{\Pi} \Delta F_{\text{III}}}$$

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{PG^2\eta^2\lambda^2S}{(4\pi)^3 q_{\text{пор}} \left(LP_{\text{III}} + \frac{P_{\text{III}} G_{\text{III}} GK_{\text{бл}} \eta \eta_{\text{III}} \lambda^2 \Delta f_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R_{\text{III}}^2 K_{\Pi} \Delta F_{\text{III}}} \right)}}$$

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{PG^2\eta^2\lambda^2S}{(4\pi)^3 q_{\text{пор}} \left(LP_{\text{III}} + \frac{P_{\text{III}} G_{\text{III}} G \eta \eta_{\text{III}} \lambda^2 \Delta f_{\text{пр}}}{(4\pi)^2 R_{\text{max}}^2 K_{\Pi} \Delta F_{\text{III}}} \right)}}$$

$$\frac{PG^2\eta^2\lambda^2S}{(4\pi)^3R^4} = \frac{P_{\text{III}}G_{\text{III}}G'\eta\eta_{\text{III}}\lambda^2\Delta f_{\text{пр}}}{(4\pi)^2R_{\text{III}}^2K_{\text{II}}\Delta F_{\text{III}}}$$

$$R = \sqrt[4]{\frac{PG^2\eta SR_{\text{III}}^2K_{\text{II}}\Delta F_{\text{III}}}{4\pi P_{\text{III}}G_{\text{III}}G'\eta_{\text{III}}\Delta f_{\text{пр}}}}$$

АП из вынесенной точки пр-ва

$$R_{\text{max}} = \sqrt[4]{\frac{PG\eta SR_{\text{III}}^2K_{\text{II}}\Delta F_{\text{III}}}{4\pi P_{\text{III}}G_{\text{III}}K_{\text{бл}}\eta_{\text{III}}\Delta f_{\text{пр}}}}$$

$$R_{\text{max}} = \sqrt{\frac{PG\eta SK_{\text{II}}\Delta F_{\text{III}}}{4\pi P_{\text{III}}G_{\text{III}}\eta_{\text{III}}\Delta f_{\text{пр}}}}$$

АП из совмещенной точки пр-ва

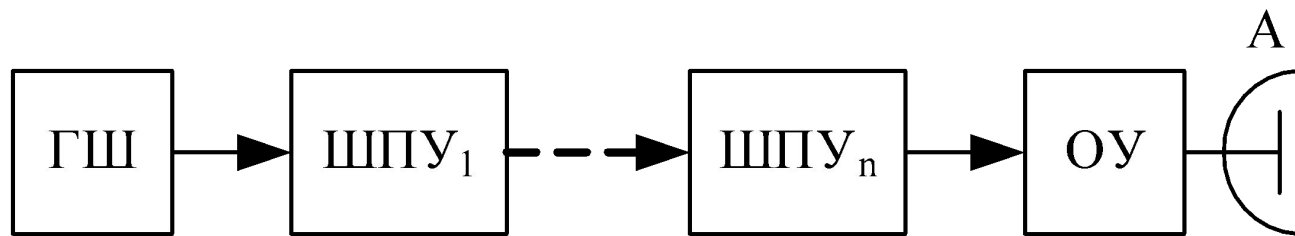
Самой важной характеристикой формирователя активных помех (ФАП) является энергетический потенциал, под которым подразумевается величина:

$$\mathcal{E}_n = P_n G_a,$$

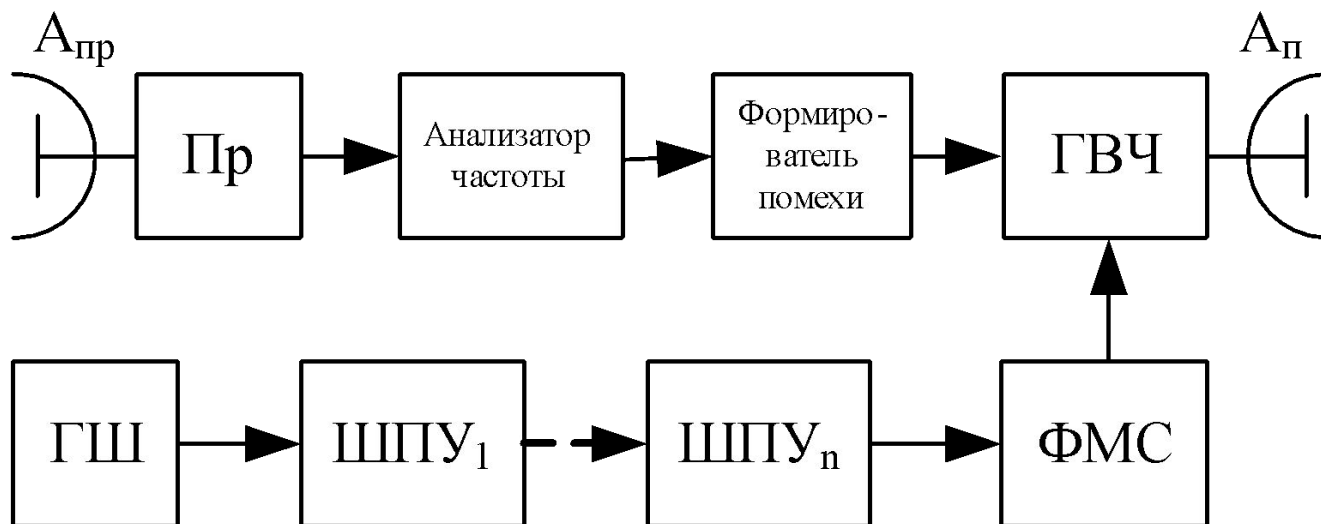
где P_n - мощность помехи на выходе передатчика, $P_n = \int_0^{\infty} G_n(f) df$;

G_a - коэффициент усиления антенной системы; G_n - спектральная плотность помехи, Δf_n - эффективная ширина полосы спектра помехи - это полоса, которую занимает спектр помехи с постоянной плотностью и такой же средней мощностью. \mathcal{E}_n называют также эффективной мощностью ФАП.

Эффективная мощность и энергетический потенциал помехи фактически соответствует мощности, излучаемой в направлении максимума диаграммы направленности антенны ФАП.



Структурная схема передатчика прямошумовых помех



Структурная схема постановщика прицельных помех

Наиболее сложным узлом постановщика прицельных помех является ГВЧ и его характеристики определяют тактико-технические характеристики ПП.

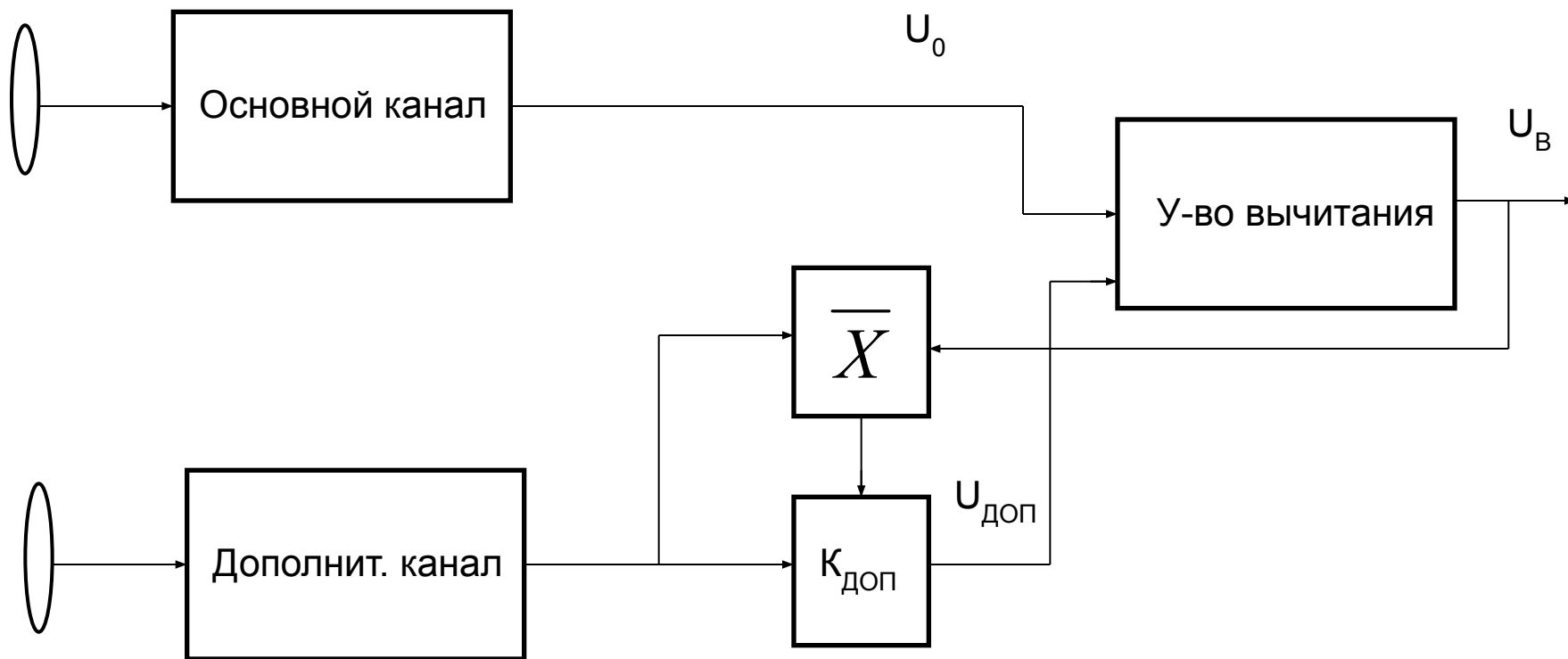
К ГВЧ ПП предъявляются следующие требования:

- работа в широком диапазоне частот;
- обеспечение требуемой выходной мощности и равномерность мощности по частоте;
- высокая скорость перестройки по частоте;
- высокий КПД и приемлемые массогабаритные характеристики.

В качестве ГВЧ, в зависимости от рабочего диапазона частот, могут использоваться электронно-вакуумные и полупроводниковые приборы. В дециметровом, сантиметровом и миллиметровом диапазонах длин волн преимущественно применяют клистроны, магнетроны, ЛБВ и ЛОВ. Клистроны и магнетроны имеют высокую выходную мощность и большой КПД. В непрерывном режиме выходные мощности клистронных генераторов могут достигать 1,0 МВт в дециметровом, 300...500 кВт в сантиметровом и 10...20 кВт в миллиметровом диапазонах длин волн. В импульсном режиме работы значения выходной мощности клистронных генераторов могут достигать соответственно 100 МВт, 20...30 МВт и 100 кВт. Применяются также генераторы на пролетных клистромах.

Защита от активных помех

СХЕМА КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО КАНАЛА



Сигнал присутствует в основном канале, а активная помеха и в основном и дополнительном каналах. Корреляционная ОС обеспечивает эквивалентность АП в каналах, что необходимо для ее компенсации. Определим коэффициент передачи по дополнительному каналу (и цепи ОС).

$$U_0 = U_s + U_n \quad U_{\text{доп}} = U_n$$

$$k_{\text{доп}} = k_{\text{рег}} \overline{U_{\text{вых}} U_{\text{доп}}} = k_{\text{рег}} \overline{(k_0 U_0 - k_{\text{доп}} U_{\text{доп}}) U_{\text{доп}}} =$$

$$k_{\text{рег}} (\overline{k_0 U_s U_n} + k_0 \overline{U_n^2} - k_{\text{доп}} \overline{U_n^2}) = k_{\text{рег}} (k_0 \overline{U_n^2} - k_{\text{доп}} \overline{U_n^2}),$$

$$k_{\text{доп}} = k_{\text{рег}} [k_0 \overline{U_n^2} / (1 + k_{\text{рег}} \overline{U_n^2})] \approx k_0 \quad \text{При} \quad k_{\text{рег}} \overline{U_n^2} \gg 1$$

В отсутствие помехи дополнительный канал «не работает», т.к. $k_{\text{доп}} = 0$.

При равенстве фаз можно обеспечить компенсацию на ПЧ (когерентно), в противном случае компенсация осуществляется некогерентно.

Для компенсации АП от нескольких источников применяются когерентные компенсаторы с несколькими линейными каналами компенсации.