

УДК 621.375.8

ФЛУКТУАЦИОННАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИЕМНИКА И ФОРМА ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕГО ВХОДНОГО УСТРОЙСТВА

И. И. Ерү, А. С. Песковацкий

Проведен анализ чувствительности приемника с малошумящим усилителем на входе с учетом формы частотной характеристики усилителя и степени рассогласования полос пропускания усилителя и остальной части схемы приемника.

В высокочувствительных приемниках в качестве входного устройства обычно используются малошумящие усилители. Это позволяет снизить требования к шумовым параметрам последующих каскадов приемника и повысить его чувствительность.

Однако в некоторых случаях полоса пропускания этих входных усилителей по тем или иным причинам оказывается ограниченной сравнительно невысокими значениями. В частности, это имеет место в приемниках миллиметрового диапазона, где пока практически единственным (по крайней мере, в коротковолновой части диапазона) типом малошумящего усилителя является квантовый парамагнитный усилитель (КПУ) [1-5]. Полосы пропускания КПУ миллиметрового диапазона пока сравнительно невелики и не превышают 50—70 МГц. В то же время полосы пропускания супергетеродинных приемников в этом диапазоне уже достигают нескольких сотен мегагерц.

Во всех подобных случаях, когда полоса пропускания входного усилителя оказывается существенно уже полосы пропускания остальной части приемника, возникает вопрос о целесообразности использования такого усилителя при приеме широкополосного шумового сигнала. Неопределенность в этом вопросе усугубляется еще и влиянием формы частотной характеристики входного усилителя на чувствительность всего приемника.

В работе [6] была рассмотрена возможность повышения чувствительности приемника путем оптимизации формы частотной характеристики входного устройства при заданной полосе пропускания. Однако вопрос о влиянии на флюктуационную чувствительность приемника степени рассогласования полос пропускания и шумовых температур входного каскада и остальной части приемника оставался открытым. В связи с этим основное внимание в статье уделено анализу влияния формы частотной характеристики входного усилителя и степени рассогласования шумовых температур и полос пропускания усилителя и остальной части приемника на его флюктуационную чувствительность в режиме приема широкополосного шумового сигнала.

Анализируется приемная система, состоящая из собственно приемника с прямоугольной энергетической частотной характеристикой $b_2(f)$, полосой пропускания B_2 и шумовой температурой T_2 , на вход которого включен усилитель с энергетической частотной характеристикой $b_1(f)$ и полосой пропускания B_1 . Суммарная температура шумов антенны и усилителя на входе системы составляет T_1 .

Флуктуационная чувствительность приемника ΔT определяется выражением [7]

$$\Delta T = \alpha T / \sqrt{B_{\text{рад}} \tau}, \quad (1)$$

где $\alpha = (0,7 \dots 2)$ — коэффициент, зависящий от схемы приемника, T — температура шумов на входе приемника, τ — постоянная времени однозвездного фильтра после квадратичного детектора, $B_{\text{рад}}$ — радиометрическая полоса приемника, равная

$$B_{\text{рад}} = B_{\text{эн}}^2 / \int_0^\infty b^2(f) df.$$

Здесь $B_{\text{эн}}$ — эквивалентная энергетическая прямоугольная полоса входных шумов на квадратичном детекторе, $b(f)$ — энергетическая частотная характеристика приемной системы до квадратичного детектора.

В рассматриваемом случае полный спектр шумов на квадратичном детекторе можно записать в виде

$$G_0 G_1 k T_1 b(f) = G_0 G_1 k T_1 b_1(f) b_2(f) + G_1 k T_2 b_2(f),$$

где G_0 и G_1 — коэффициенты усиления по мощности входного усилителя и остальной части приемника в центре полосы пропускания.

Отсюда

$$b(f) = b_1(f) b_2(f) + (T_2/G_0 T_1) b_2(f). \quad (2)$$

Воспользовавшись выражением (2) и записав эквивалентную энергетическую прямоугольную полосу входных шумов на квадратичном детекторе для рассматриваемого случая, определяем радиометрическую полосу системы

$$B_{\text{рад}} = B_{1\text{рад}} \left[1 + \frac{2T_2}{G_0 T_1} \frac{B_{1\text{рад}}}{B_{1\text{эн}}} + \left(\frac{T_2}{G_0 T_1} \right)^2 \frac{B_{1\text{рад}} B_2}{B_{1\text{эн}}^2} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где

$$B_{1\text{рад}} = \left[\int_{f_0 - B_2/2}^{f_0 + B_2/2} b_1(f) df \right]^2 \left[\int_{f_0 - B_2/2}^{f_0 + B_2/2} b_1^2(f) df \right]^{-1}.$$

Подставив выражение (3) в формулу для флуктуационной чувствительности и полагая, как обычно, $\tau = 1$ с, получим, что для рассматриваемой приемной системы

$$\Delta T = \alpha (T_1 / \sqrt{B_{1\text{рад}}}) (1 + P) \sqrt{1 + Q}, \quad (4)$$

где

$$P = \frac{T_2}{G_0 T_1} \frac{B_{1\text{рад}}}{B_{1\text{эн}}}, \quad Q = \frac{B_2 - B_{1\text{рад}}}{B_{1\text{рад}} (1 + P)^2},$$

а величины $B_{1\text{рад}}$ и $B_{1\text{эн}}$ определяются частотной характеристикой входного усилителя и шириной полосы пропускания остальной части приемника B_2 . Нетрудно понять поэтому, что выигрыш по чувствительности, обеспечиваемый входным усилителем, будет равен

$$\gamma = (T_2/T_1) F, \quad (5)$$

где
 $F = \{g_2[(1 + T_2 g_1/G_0 T_1)^2 + g_2 - 1]\}^{-1/2}$, $g_1 = B_{1\text{рад}}/B_{1\text{эн}}$, $g_2 = B_2/B_{1\text{рад}}$. (6)

Анализ различных возможных форм частотной характеристики входного усилителя $b_1(f)$ приводит к следующим соотношениям.

1) Если $b_1(f)$ имеет прямоугольную форму,

$$b_1(f) = \begin{cases} 1, & f_0 - B_1/2 \leq f \leq f_0 + B_1/2, \\ 0, & f_0 + B_1/2 < f < f_0 - B_1/2 \end{cases},$$

то

$$g_1 = 1, \quad g_2 = \beta = B_2/B_1. \quad (7)$$

2) Если $b_1(f)$ имеет гауссову форму,

$$b_1(f) = \exp \left[-\frac{4(f-f_0)^2}{1,44 B_1^2} \right],$$

то

$$g_1 = 1,41\Phi(1,67\beta)/\Phi(1,18\beta). \quad (8)$$

$$g_2 = 0,67\beta\Phi(1,67\beta)/\Phi^2(1,18\beta),$$

где

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt.$$

3) Если $b_1(f)$ имеет лоренцевскую форму,

$$b_1(f) = (1+4(f-f_0)^2 B_1^{-2})^{-1},$$

то

$$g_1 = 2 \frac{(1+\beta^2)\operatorname{arctg}\beta}{\beta+(1+\beta^2)\operatorname{arctg}\beta}, \quad g_2 = \beta \frac{\beta+(1+\beta^2)\operatorname{arctg}\beta}{2(1+\beta^2)\operatorname{arctg}^2\beta}. \quad (9)$$

Полученные точные аналитические выражения дают возможность определить выигрыш по чувствительности γ , связанный с включением на вход приемника малошумящего усилителя, для любых значений параметров $b_1(f)$, B_1 , B_2 , T_1 , T_2 и G_0 .

В качестве примера проанализируем с помощью полученных выражений возможности повышения чувствительности приемников миллиметрового диапазона, связанные с включением на вход их КПУ.

Одним из важных параметров активного вещества КПУ является ширина линии ЭПР на рабочем переходе (Δf_L), поскольку для усилителя бегущей волны (КПУБВ) [8]

$$B_1 = \Delta f_L \sqrt{3/(G_{0dB} - 3)},$$

а для резонаторного квантового усилителя (РКПУ) [8]

$$B_1 \leq \Delta f_L 2/\sqrt{G_0}.$$

Поэтому анализ проведен для случаев КПУБВ и РКПУ на андалузите, у которого наибольшая ширина линии ($\Delta f_L = 150 \text{ МГц}$) среди исследованных активных кристаллов для КПУ миллиметрового диапазона [9]. Если считать, что $G_0 = 20 \text{ дБ}$ (это типичная величина для разработанных КПУ миллиметрового диапазона), то для андалузита это означает, что в случае КПУБВ его полоса $B_1 = 63 \text{ МГц}$, а в случае РКПУ — соответственно $B_1 \leq 30 \text{ МГц}$. Температура шумов на входе КПУ принята равной $T_1 = 100 \text{ K}$, что является обычным уровнем для миллиметрового диапазона.

Сравним по чувствительности приемник с параметрами B_2 и T_2 , на вход которого включен КПУ на андалузите ($G_0 = 20 \text{ дБ}$), и современный широкополосный ($B_2^0 = 500 \text{ МГц}$) приемник миллиметрового диапазона, работающий в двухполосном режиме с шумовой температурой $T_2^{DSB} = (1/2)T_2$. На рис. 1 приведены зависимости получающегося при этом выигрыша γ_0 от степени рассогласования полос пропускания (β) КПУ и приемника для нескольких значений T_2 (на рис. 1а — для КПУБВ, на рис. 1б — для РКПУ, кривая 1 — 1000 K, 2 — 2000 K, 3 — 4000 K, 4 — 6000 K). Из приведенных на этом рисунке графиков видно, что даже простейший однорезонаторный КПУ на андалузите

позволяет заметно повысить чувствительность приемника, причем тем больше, чем выше шумовая температура приемника T_2 . Еще более значителен выигрыш по чувствительности при использовании КПУБВ.

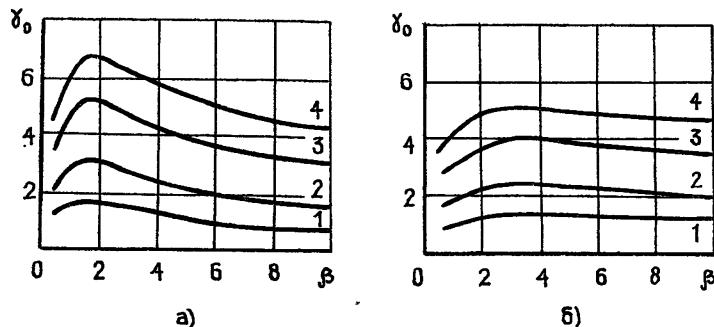


Рис. 1.

Однако, как видно из этого рисунка, для полной реализации всех возможностей, связанных с применением КПУ в качестве входного усилителя приемников миллиметрового диапазона, требуется определенное рассогласование полос пропускания КПУ и приемника (в приведенном примере, для андалузита, $\beta = 1,5 - 2$ для КПУБВ и $2,5 - 3,5$ — для РКПУ).

В то же время эти результаты свидетельствуют о необходимости проведения исследований, направленных на дальнейшее совершенствование методов расширения полосы пропускания КПУ [10].

ЛИТЕРАТУРА

- Еру И. И., Песковацкий А. С., Чернец А. Н. — Радиофизика и электроника, 1968, 13, № 16, с. 1049
- Sollner T. C., Clemens D. P., Kozieniowski T. L., Mc Intosh G. C., Moore E. L., Yngvesson K. S. — Appl. Phys. Lett., 1975, 35, № 11, p. 833.
- Cardiamenos A. G., Chanley J. F., Yngvesson K. S. — IEEE Trans., 1976, MTT-24, № 11, p. 725.
- Moore E. L., Neff Dudley — IEEE Trans., 1982, MTT-30, № 11, p. 2013.
- Черпак Н. Т., Смирнова Т. А., Мышенко В. В., Лавринович А. А. — Радиотехника и электроника, 1982, 27, № 9, с 1804.
- Малахов А. Н. — Изв. вузов — Радиофизика, 1959, 2, № 5, с. 682.
- Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. И. Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973.
- Штейншлейгер В. Б., Мисежников Г. С., Лифанов П. С. Квантовые усилители СВЧ. — М.: Сов. радио, 1971.
- Еги I. I., Peskovatskiy S. A., Chernets A. N. — IEEE Trans., 1968, QE-4, № 4, p. 723.
- Еру И. И., Мышенко В. В., Песковацкий С. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1983, 26, № 12, с. 1603.

Институт радиофизики и электроники
АН УССР

Поступила в редакцию
15 мая 1984 г.

FLUCTUATION SENSITIVITY OF THE RECEIVER AND THE SHAPE OF FREQUENCY CHARACTERISTIC OF FRONT-END UNIT

I. I. Èru, A. S. Peskovatskij

The sensitivity of the receiver with front-end low-noise amplifier is analyzed taking into account the shape of gain-frequency characteristic of the front-end amplifier and the mismatch of the front-end amplifier bandwidth and the other part of receiver bandwidth.