

УДК 638.235.231

КВАНТОВАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИДЕАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА

Зинченко Сергей; Мачусский Евгений; Степаненко Владимир; Свижевский Вячеслав
 НТУУ «КПИ» Физико-технический институт

THE QUANTUM SENSITIVITY OF IDEAL RECEIVER

Zynchenko Sergey; Machusskiy Yevgeniy; Stepanenko Vladimir; Svizhevskiy Viacheslav
 NTUU «KPI», Institute of Physics and Technologies

Аннотация: Выполнен теоретический расчет квантовой чувствительности идеального приемника.

Ключевые слова: Чувствительность, бит информации, квантовая чувствительность.

Summary: We present a theoretical calculation of the quantum sensitivity of the ideal receiver.

Keywords: Sensitivity, bit of information, quantum sensitivity.

Реальная чувствительность приемника ограничена следующими факторами:

- уровнем собственного и внешнего шумов,

- допустимым для заданной скорости передачи информации соотношением сигнал/шум в канале связи,

- возможным распадом потока мощности сигнала в месте приема на отдельные кванты, сложностями поквантового приема и выделения информации.

Пропускная способность канала связи (бит/сек) [1]:

$$C = F_m \log_2 \left(1 + \frac{P_c}{P_u} \right) \quad (1)$$

F_m – полоса пропускания канала,

P_c – мощность сигнала,

P_u – мощность шума.

Если соотношение сигнал/шум в канале $\beta = 4$ (6дБ), скорость передачи данных (бит/сек) может составлять:

$$B_m = 2F_m$$

а за период модуляции

$$T_m = \frac{1}{F_m}$$

можно передать $I = 2$ бит данных.

Уровень шума при приеме определяется шумом, принятым антенной из пространства при температуре T_0 и собственным шумом приемника с температурой $T_{прм}$.

Общая шумовая температура:

$$T_{ш} = T_0 + T_{прм}.$$

Для оценки уровня теплового шума используем квантовую формулу Найквиста [2].

Мощность принятого шума:

$$P_{ш} = \frac{hf_0}{2} \operatorname{cth} \left(\frac{hf_0}{2kT_{ш}} \right) F_{ш} \quad (2)$$

f_0 – частота сигнала,

$F_{ш}$ – шумовая полоса приемника,

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная

Больцмана,

$h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж сек – постоянная Планка.

На “низких” частотах, при:

$$\frac{2kT_{ш}}{hf_0} \geq 1$$

Выражение (2) превращается в классическую формулу шумов Найквиста:

$$P_{ш} \approx kT_{ш} F_{ш}$$

Для обеспечения максимальной чувствительности приемника целесообразно использовать когерентный прием из одной боковой полосы. При этом $F_{ш} = F_m$

Обозначим:

$$f_{кр} = \frac{2kT_{ш}}{h}$$

$f_{кр}$ – “критическая” частота (при $T_{ш} = 3\text{К}$

$$f_{кр} \approx 125 \text{ ГГц}$$

Учитывая, что энергия кванта $E_0 = hf_0$, количество квантов шума $n_{ш}$, полученных за период модуляции:

$$n_{ш} = \frac{1}{2} \text{cth}\left(\frac{f_0}{f_{кр}}\right) \quad (3)$$

На “низких” частотах $f_0 \leq f_{кр}$ среднее за период модуляции количество принятых шумовых квантов и их энергия определяется шумовой температурой, при $f_0 \leq f_{кр}$

$$n_{ш}^{нч} \approx \frac{f_{кр}}{2f_0}$$

$$E_{ш}^{нч} \approx kT_{ш}$$

На “высоких” частотах $f_0 \geq f_{кр}$ среднее за период модуляции количество принятых шумовых квантов связано с “нулевыми” колебаниями вакуума и от температуры не зависит: при $f_0 \geq f_{кр}$ $n_{ш}^{вч} \approx 1/2$,

$$E_{ш}^{вч} \approx \frac{hf_0}{2}$$

При соотношении сигнал/шум $\beta = 4$ (6дБ) для сигнала за период модуляции:

$$n_c = 2 \text{cth}\left(\frac{f_0}{f_{кр}}\right)$$

при $f_0 \leq f_{кр}$

$$n_c^{нч} \approx \frac{2f_{кр}}{f_0}$$

$$E_c^{нч} \approx 4kT_{ш}$$

при $f_0 \geq f_{кр}$, $n_c^{вч} \approx 2$, $E_c^{вч} \approx 2hf_0$

На “высоких” частотах прием информации обеспечивается двумя квантами за период, что соответствует теоретическому пределу Котельникова для частоты выборки.

При $\beta = 6$ дБ скорость передачи данных в канале составляет 2 бит/период, поэтому для сигнала в пересчете на 1 бит:

$$n_1 = \text{cth}\left(\frac{f_0}{f_{кр}}\right) \quad (4)$$

при $f_0 \leq f_{кр}$

$$n_1^{нч} \approx \frac{f_{кр}}{f_0}$$

$$E_1^{нч} \approx 2kT_{ш}, \text{ при } f_0 \geq f_{кр}, n_1^{вч} \approx 1,$$

$$E_1^{вч} = E_1^{нч} \frac{f_0}{f_{кр}} \approx hf_0$$

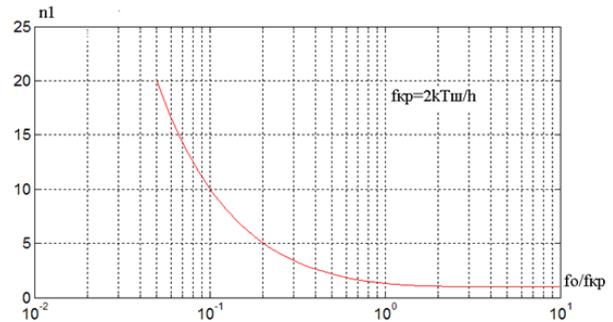


Рис.1. Зависимость от рабочей частоты количества квантов сигнала, обеспечивающего прием 1 бита данных при соотношении сигнал/шум $\beta = 6$ дБ.

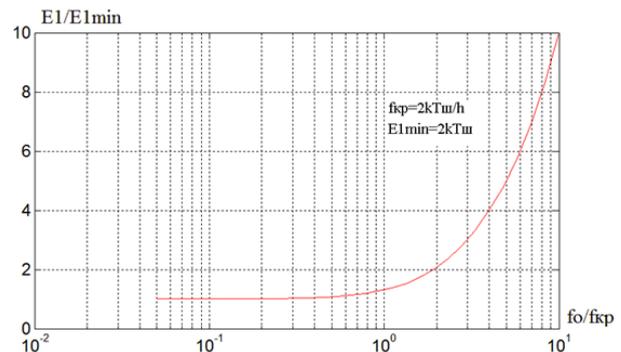


Рис.2. Зависимость от рабочей частоты энергии сигнала, обеспечивающей прием 1 бита данных при соотношении сигнал/шум $\beta = 6$ дБ.

Частоты $f_0 \leq f_{кр}$ принадлежат к области классической радиотехники – количество квантов, передающее в приемник 1 бит данных, значительно, и зависит от шумовой температуры и рабочей частоты. При этом энергия на 1бит от частоты не зависит и определяется только шумовой температурой. На “низких” частотах чувствительность приемника максимальна. Прием 1 бита данных обеспечивается энергией:

$$E_1^{нч} = E_1^{\min} \approx 2kT_{ш}$$

при $T_{ш} = 3\text{К}$

$$E_1^{\min} \approx 8.28 * 10^{-23}$$

Частоты $f_0 \geq f_{кр}$ принадлежат к области квантового радиоприема – 1 бит данных передается приемнику 1 квантом энергии. Такой режим приема требует применения современных достижений нано электроники, в частности [3]. Энергия на 1 бит линейно возрастает при увеличении рабочей частоты в соответствии с увеличением энергии кванта. Чувствительность приемника при этом ухудшается:

$$E_1^{6ч} = E_1^{\min} \frac{f_0}{f_{кр}} \approx hf_0$$

Максимальная чувствительность приемника при соотношении сигнал/шум $\beta = 6дБ$, выраженная через мощность сигнала, составляет:

$$P_{прм}^{\min} = E_1^{\min} B_m = 2kT_{ш} B_m$$

$B_m = 2F_m$ – скорость передачи данных (бит/сек).

При $T_{ш}=3 К$, $F_m=0.5 ГГц$, $B_m=1 Гбит/сек$:

$$P_{прм}^{\min} \approx 8.28 \cdot 10^{-14} Вт$$

Выводы

Получены расчетные соотношения для квантовой чувствительности идеального приемника.

Перечень ссылок

- [1] И. А. Липкин *Основы статистической радиотехники, теории информации и кодирования*. М., Сов.радио, 1978.
- [2] В. Л. Гинзбург, Л. П. Питаевский *О квантовой формуле Найквиста. Успехи физических наук*, т.151 вып.2, 1987.
- [3] Noise-free high-efficiency photon-number-resolving detectors. <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0506175v1.pdf>

References

- [1] I. A. Lypkin. *Osnovy statistycheskoy radiotekhnky, teoryu informatcyu i kodyrovanya*. M., Sov.radio, 1978
- [2] V. L. Gyzyngburg, L. P. Pytaevskiy. *O kvantovoy formule Naykvista. Uspely fizicheskyyh nauk*, t.151 vyp.2, 1987
- [3] Noise-free high-efficiency photon-number-resolving detectors. <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0506175v1.pdf>

Реферат

Зінченко Сергій, Мачуський Євгеній, Степаненко Володимир, Свіжевський В'ячеслав

Квантова чутливість ідеального приймача

У роботі представлені розрахункові співвідношення для квантової чутливості ідеального приймача.

Zynchenko Sergey, Machusskiy Yevgeniy, Stepanenko Vladimir, Svizhevskiy Vyacheslav

Квантовая чувствительность идеального приемника

В работе представлены расчетные соотношения для квантовой чувствительности идеального приемника.

Zynchenko Sergey, Machusskiy Yevgeniy, Stepanenko Vladimir, Svizhevskiy Vyacheslav

The quantum sensitivity of the ideal receiver

The paper presents the calculated ratios for the ideal quantum sensitivity of the receiver.

Відомості про авторів

Мачуський Євгеній Андрійович

Освіта: Київський політехнічний інститут. Радіотехніка (1974).

Місце роботи: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Фізико-технічний інститут, професор (1989), д.т.н. (1989).

Наукові інтереси: системи захисту інформації.

Зінченко Сергій Анатолійович

Освіта: Київський політехнічний інститут. Радіотехніка (1974).

Місце роботи: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Фізико-технічний інститут, доцент (1993), к.т.н. (1987).

Наукові інтереси: системи захисту інформації.

Степаненко Володимир Михайлович

Освіта: Київський політехнічний інститут. Радіотехніка (1975).

Місце роботи: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Фізико-технічний інститут.

Наукові інтереси: системи захисту інформації.

Свіжевський В'ячеслав Феліксівич

Освіта: НТУУ «КПІ», Фізико-технічний інститут, магістр зі спеціальності: «Системи технічного захисту інформації, автоматизація її обробки».

Наукові інтереси: системи захисту інформації.

Email: grefendor@ukr.net