

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЛАЗЕРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Н. В. Карлов

Известно, что чувствительность лазерных усилителей ограничена спонтанными шумами. Вместе с тем, при супергетеродинном детектировании принимается только одна мода детектируемого излучения. Поэтому при супергетеродинировании усиленного излучения в отличие от случая прямого детектирования спектральная плотность входных шумов может достигать $h\nu$. Сравнение чувствительности лазерных усилителей для случаев прямого и супергетеродинного детектирования проведено в этой работе.

Рассмотрим сначала приемник прямого усиления, в котором за квантовым усилителем включен видеодетектор. Уравнение переноса для плотности потока спектральной плотности энергии S имеет вид

$$\frac{dS}{dz} = (n_2 - n_1) \frac{h\nu B_{21}}{c} S + n_2 h\nu \frac{8\pi}{\lambda^2} \frac{h\nu B_{21}}{c}, \quad (1)$$

где n_2 и n_1 — плотности частиц на верхнем и нижнем уровнях энергии, B_{21} — коэффициент Эйнштейна, λ — длина волны и c — скорость света.

Для полного потока энергии P через апертуру усилителя площадью A в силу соотношения $P = AS$ имеем

$$\frac{dP}{dz} = (n_2 - n_1) \frac{h\nu B_{21}}{c} P + 2n_2 h\nu \frac{A}{\lambda^2} \Omega(z) \frac{h\nu B_{21}}{c}, \quad (2)$$

где учтено, что спонтанное излучение идет, усиливаясь в сторону детектора в телесном угле $\Omega(z)$.

Интегрирование уравнения (2) провести не удается, и для оценки можно считать, что в длинном усилителе с хорошим усилением G угол Ω - это угол, под которым от выхода виден вход усилителя. Тогда

$$\Omega = A/4\pi L^2, \quad (3)$$

где L - длина усилителя. Предполагается, что угол Ω превышает дифракционный угол λ/\sqrt{A} . В этом случае спектральная плотность пересчитанных ко входу шумов составляет

$$P_{\text{вх}} = 2h\nu \frac{n_2}{n_2 - n_1} \frac{G - 1}{G} \frac{A}{\lambda^2} \frac{A}{4\pi L^2}, \quad (4)$$

что при больших инверсии и усилении дает $(2h\nu A/\lambda^2) \times (A/4\pi L^2)$. При этом всегда $(A/\lambda^2)(A/4\pi L^2) \gg 1$. Коэффициент 2 обусловлен приемом двух поляризаций. В случае CO_2 -лазеров это приводит по крайней мере к $20 + 30$ кратному превышению минимально возможного уровня $h\nu$.

При супергетеродинном режиме оптический приемник приобретает антенные свойства [1], при которых произведение площади приема A на телесный угол приема Ω для главного лепестка

$$A\Omega \approx \lambda^2. \quad (5)$$

При этом выполняется своеобразная теорема взаимности. Распределение излучения гетеродина, отраженного приемной площадкой приемного элемента, дает в дальней зоне диаграмму направленности супергетеродинного приемника, что недавно было подтверждено экспериментально на волне 10,6 мк [2].

Эта теорема поддается дальнейшему обобщению. При одномодовом гетеродине приемная диаграмма направленности соответствует излучению одного типа колебаний. Следовательно, на приемник воздействует только одна мода усиленных спонтанных шумов и супергетеродинный приемник с лазерным усилителем обладает спектральной плотностью входного шума $h\nu$.

Действительно, интегрирование уравнения (1) дает на выходе усиливающей среды

$$S_{\text{вых}} = \frac{8\pi}{\lambda^2} \frac{n_2}{n_2 - n_1} (G - 1)h\nu. \quad (6)$$

Антенна с эффективной поверхностью приема $A(\varphi, \theta)$, определяемой дифракционной диаграммой направленности в одной поляризации, принимает мощность

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{8\pi} \int_{\Omega} SA d\Omega, \quad (7)$$

что в изотропном случае в соответствии с (5) дает $h\nu n^2(G - 1)/(n_2 - n_1)$. При пересчете ко входу усилителя получаем

$$P_{\text{вх}} = h\nu \frac{n_2}{n_2 - n_1} \frac{G - 1}{G}. \quad (8)$$

При больших инверсии и усилении предельное значение составляет $h\nu$. Таким образом, супергетеродинирование позволяет при квантовом усилении получать минимально возможные шумы.

Аналогично, супергетеродинный приемник с лазерным усилителем принимает тепловое излучение фона только в одной моде. При температуре фона T суммарная спектральная плотность входных шумов составляет

$$I_{\text{вх}} = \frac{h\nu \exp(h\nu/kT)}{\exp(h\nu/kT) - 1}, \quad (9)$$

чему при полосе пропускания линейной части приемника $\Delta\nu$ и постоянной времени τ соответствует температурная чувствительность приемника в целом

$$\delta T = \frac{\exp(h\nu/kT) - 1}{h\nu/kT} \frac{T}{\sqrt{\Delta\nu\tau}}, \quad (10)$$

что в оптической области переходит в

$$\delta T = \frac{\exp(h\nu/kT)}{h\nu/kT} \frac{T}{\sqrt{\Delta\nu\tau}}, \quad (11)$$

а в радиодиапазоне соответствует хорошо известному соотношению

$$\delta T = T/\sqrt{\Delta\nu\tau}. \quad (12)$$

Для CO_2 -лазеров при температуре фона 300°K $\delta T \approx \approx 10^4 \text{ }^\circ\text{K}/\sqrt{\Delta\nu\tau}$. Формула (11) существенно отличается от полученной ранее для приемника с видеодетектором на входе /3/.

Автор благодарен Ю. Б. Коневу и Б. Б. Крынецкому за полезные обсуждения.

Поступила в редакцию
21 декабря 1970 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. Е. Siegman. Proc. IEE, 54, 1350 (1966).
2. И. И. Душков, Н. В. Карлов, Б. Б. Крынецкий, В. А. Мишин, Р. П. Петров. Краткие сообщения по физике, № 1, 40 (1971).
3. Н. В. Карлов, А. М. Прохоров. РИЭ 9, вып. 12, 2088 (1964).