

СРАВНЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ СУПЕРГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМА И ПРЯМОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С НЕПРЕРЫВНЫМ СПЕКТРОМ

О. И. Гуськова, Д. В. Корольков

Проведено сравнение методов прямого детектирования оптических сигналов с помощью фотодиода или ФЭУ и гетеродинамирования с помощью лазера и того же фотодиода или ФЭУ. Показано, что наибольшая чувствительность получается при прямом детектировании с помощью ФЭУ.

A comparison is made of the technique of direct detection of optical signals by the use of a photodiode or photomultiplier with that of heterodyning by means of a laser and the same photodiode or photomultiplier. The highest sensitivity is shown to be obtained on the direct detection by a photomultiplier.

Сравнение двух методов преобразования оптических сигналов — прямого детектирования и гетеродинамирования с помощью лазера — обычно производится для узкополосных сигналов, превышающих по величине собственные шумы приемника (см., например, [1]). Рассмотрим случай, когда сигнал мал и имеет непрерывный спектр, и найдем выражения для минимальной обнаружимой спектральной плотности потока в этом случае.

1. *Прямое детектирование с помощью фотодиода или ФЭУ.* Пусть E_c — напряженность падающего на фотокатод электромагнитного поля светового сигнала, причем

$$E_c = F_{c0}(t) e^{-j[\omega_0 t + \varphi(t)]},$$

где ω_0 , φ — частота и фаза сигнала, F_{c0} — амплитуда сигнала. Мощность этого сигнала равна

$$P_c = \overline{E_c^2} \cdot S/R_0,$$

здесь $R_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ — волновое сопротивление свободного пространства, S — площадь зеркала телескопа. Ток сигнала на выходе фотодетектора, усредненный выходным накопителем, пропорционален мощности сигнала

$$\overline{i_c} = \beta P_c = \beta \overline{E_c^2} \cdot S/R_0, \quad (1)$$

$$\beta = \eta e/hf_c; \quad (2)$$

в этих формулах η — квантовая эффективность катода, e — заряд электрона, h — постоянная Планка, f_c — частота.

Собственные шумы приемника (см. рис. 1) определяются дробовыми шумами темнового тока i_{τ} , мощность которых, согласно формуле Найквиста, равна

$$\overline{i_{\tau}^2} R = 2ei_{\tau} \Delta FR, \quad (3)$$

и тепловыми шумами входного сопротивления усилителя (фильтра) Φ . Мощность последних равна

$$kT\Delta F.$$

Здесь и выше ΔF — полоса частот выходного фильтра (накопителя), T — окружающая температура, K — постоянная Больцмана, R — входное сопротивление усилителя. Чувствительность (пороговый сигнал) определим из условия равенства выходной мощности сигнала и шума

$$(\bar{i}_c)^2 R / (kT\Delta F + 2e i_{\tau} \Delta F R) = \beta^2 P_c^2 R / (kT\Delta F + 2e i_{\tau} \Delta F R) = 1.$$

Разделив P_c на площадь зеркала S и полосу принимаемых частот Δf , получим минимальную обнаружимую спектральную плотность потока

$$\Delta P_f = (S\Delta f\beta)^{-1} \sqrt{kT\Delta F/R + 2e i_{\tau} \Delta F}. \quad (4)$$

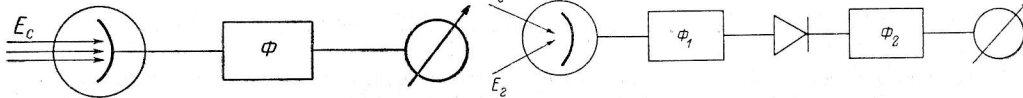


Рис. 1. Прямое детектирование оптического сигнала.

Рис. 2. Преобразование оптического сигнала в радиосигнал с помощью лазера в качестве гетеродина.

Нетрудно убедиться, что при использовании фотодиода составляющая тепловых шумов в выражении (4) значительно больше составляющей дробовых шумов, т. е.

$$\Delta P_f \approx (S\Delta f\beta)^{-1} \sqrt{kT\Delta F/R}. \quad (5)$$

При применении ФЭУ в качестве детектора мощность дробовых шумов и сигнала на выходе возрастают в M^2 раз, где $M \approx 10^6$ — коэффициент усиления ФЭУ по току. Формула для чувствительности (4) с учетом этого коэффициента примет вид

$$\Delta P_f = (S\Delta f\beta)^{-1} \sqrt{kT\Delta F/RM^2 + 2e i_{\tau} \Delta F} \approx (S\Delta f\beta)^{-1} \sqrt{2e i_{\tau} \Delta F}, \quad (6)$$

т. е. чувствительность определяется дробовыми шумами темнового тока.

2. *Гетеродинирование с помощью лазера.* Пусть опять напряженность поля светового сигнала

$$E_c = E_{c0}(t) e^{-j(\omega_c t + \varphi(t))},$$

напряженность электромагнитного поля, создаваемого лазерным гетеродином,

$$E_r = E_{r0} e^{-j\omega_r t}$$

и напряженность суммарного излучения

$$E = E_c + E_r.$$

Мы предполагаем, что волновые фронты сигнала и гетеродина сопряжены на фотокатоде. Ток на выходе фотоэлектрического преобразователя

$$i \propto \beta E^2 = \beta (E_c + E_r)^2,$$

причем на разностной частоте сигнала и гетеродина (промежуточной частоте) $\omega_c = \omega_r$ мы получим ток сигнала

$$i_c \propto \beta E_{c0} E_{r0} \cos(\omega_c - \omega_r) t.$$

Как и в обычном супергетеродинном приемнике, ток промежуточной частоты может быть усилен усилителем промежуточной частоты с полосой Δf_n (фильтр Φ_1 на рис. 2), затем продетектирован и усреднен выходным фильтром нижних частот Φ_2 с полосой ΔF . В результате получим постоянный ток сигнала

$$I_c = \bar{i}_c^2 \approx 1/2 \cdot \beta^2 \bar{E}_{co}^2 \cdot E_{го}^2 G_{уПЧ}^2$$

или

$$I_c = 2\beta P_c i_r G_{уПЧ}^2; \quad (7)$$

здесь $G_{уПЧ}$ — коэффициент усиления усилителя промежуточной частоты.

При определении выходных шумов в случае гетеродинирования следует учитывать лишь дробовые шумы фототока, создаваемого сравнительно мощным сигналом лазера (i_r), так как этот ток значительно больше темнового. Тепловыми шумами выходной части схемы можно пренебречь при достаточно большом усилении по промежуточной частоте. Если на выходе фотопреобразователя существуют шумы фототока i_r в полосе частот прямоугольной формы шириной Δf_n , дисперсия которых аналогично (3) равна

$$\bar{i}_ш^2 = 2e i_r \Delta f_n G_{уПЧ}^2,$$

то на выходе второго (квадратичного) детектора спектральная плотность шума будет описываться выражением [2]:

$$S(f) = 0,5 (\bar{i}_ш^2)^2 (\Delta f_n - |f|) / \Delta f_n^2 \text{ при } |f| \leq \Delta f_n.$$

Проинтегрировав по полосе пропускания выходного фильтра Φ_2 , получим дисперсию шумов на выходе

$$\bar{I}_ш^2 = 4 \int_0^{\Delta F} S(f) df \approx 4S(0) \Delta F = 2 (\bar{i}_ш^2)^2 \Delta F / \Delta f_n,$$

$$\sqrt{\bar{I}_ш^2} = 2 \sqrt{2} e i_r G_{уПЧ}^2 \sqrt{\Delta f_n \Delta F}. \quad (8)$$

Приравняв токи сигнала (7) и шума (8) и учтя (2), получим минимальный обнаруживаемый сигнал

$$P_{c \min} = \sqrt{2} h f_c / \eta \cdot \sqrt{\Delta f_n \Delta F} \quad (9)$$

или минимальную обнаруживаемую спектральную плотность потока (разделив на S и Δf_n)

$$\Delta P_f = \sqrt{2} h f_c / \eta S \cdot \sqrt{\Delta F / \Delta f_n}. \quad (10)$$

Заметим, что формулы (9) и (10) справедливы при применении как к ФЭУ, так и к фотодиоду в качестве преобразователя.

Из приведенных формул видно, что наибольшей чувствительностью по спектральной плотности потока обладает метод прямого детектирования с помощью ФЭУ. Отношение чувствительности по спектральной плотности потока для прямого детектирования с помощью фотодиода и гетеродинирования равно

$$\Delta P_{f \text{ фотодиод}} / \Delta P_{f \text{ гетер}} = \sqrt{2} / 2 e \Delta f \cdot \sqrt{k T \Delta f_n / R} \approx 3 \cdot 10^{-6} \quad (11)$$

при значениях полос по промежуточной частоте и по частоте сигнала при детектировании $\Delta f_n = 10^9$ гц, $\Delta f = 10^{14}$ гц, $R = 10^9$ ом. То же самое при применении ФЭУ:

$$\Delta P_{f \text{ ФЭУ}} / \Delta P_{f \text{ гетер}} = (\Delta f)^{-1} \sqrt{\Delta f_n i_T / e} \approx 2 \cdot 10^{-9} \quad (12)$$

при тех же значениях полос и $i_T = 10^{-15}$ а.

Только при приеме узкополосных сигналов, когда следует положить $\Delta f = \Delta f_n$, чувствительность методов прямого детектирования и гетеродинирования может стать сравнимой или даже гетеродинирование может дать выигрыш:

$$\Delta P_{f \text{ пр. дет}} / \Delta P_{f \text{ гетер}} = 1 / \sqrt{\Delta f} \cdot \sqrt{2 i_T / e + kT / e^2 R M^2}. \quad (13)$$

Это произойдет при полосах сигнала $\Delta f \leq 10^4 \div 10^8$ гц.

Литература

1. S. J. Lee, A. Van der Ziel, Physica, 45, 379, 1969.
2. Б. Р. Левин. Теоретические основы статистической радиотехники. Изд-во «Советское радио», М., 1969.

Январь 1972 г.