

УДК 621.383+534.322.3+621.035

ВЛИЯНИЕ ШУМОВ ОПТИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ НА ЗАКОН РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧИСЛА ФОТОЭЛЕКТРОНОВ НА ВЫХОДЕ ФОТОДЕТЕКТОРА

© И.Г. Карпов, М.В. Игнатенко, А.А. Макаренков

Karpov I.G., Ignatenko M.V., Makarenkov A.A. Noises of optical amplifier influence on the photoelectrons distribution law at the photodetector output. Kolmogorov equation general solution for discrete Markov processes of reproduction and destruction improved the probability model of the photoelectrons distribution law at the photodetector (PD) output with an optical amplifier (OA) at an input. The model allowed describing the process more precisely at the PD output at the expense of a fuller account of OA noises.

При использовании ОУ, устанавливаемого перед фотодетектором, уровень полезного сигнала повышается. Одновременно с этим в приемном устройстве возрастают внутренние шумы за счет спонтанной эмиссии ОУ. Повышение уровня полезного сигнала на входе фотодетектора и появление дополнительных шумов ОУ необходимо учитывать при разработке ВМ закона распределения числа фотоэлектронов на выходе фотодетектора.

Такая модель характеризуется рождением и поглощением фотонов из независимого источника. Для описания подобных процессов широко используются дискретные марковские процессы рождения и гибели. Для них справедливы уравнения Колмогорова:

$$\frac{dH_n(l,t)}{dt} = -[(a+b)l+c]H_n(l,t) + [a(l-1)+c]H_n(l-1,t) + b(l+1)H_n(l+1,t), l=0,1,2,\dots \quad (1)$$

где $H_n(l,t)$ – условная вероятность появления на выходе системы l фотонов при поступлении на вход n фотонов, зависящая от времени; a – скорость стимулированной эмиссии; b – скорость поглощения; c – скорость спонтанной эмиссии; $n \in [0; \infty]$.

Из-за сложности решения этой системы уравнений в общем виде ранее ее решали с введением различных ограничений. Основные способы решения на основе такого подхода в разное время предлагались в [1–3]. В работах [1, 3] рассматривается квантовая двухуровневая схема усиления, в которой нижний энергетический уровень не заселен, т. е. в усилителе отсутствует поглощение (оно полностью приписывается фотодетектору), но имеются внутренние шумы – спонтанное излучение. Введя такие ограничения, систему уравнений (1) решали отдельно для усилителя ($b=0$), а затем для фотодетектора ($a=c=0$). Очевидно, что такой подход не позволяет получить реальную ВМ закона распределения числа фотоэлектронов на выходе фотодетектора с ОУ на входе.

В работе [4] предложена методика решения подобных (1) систем уравнений без вводимых ранее ограни-

чений. На основе этой методики полученное общее решение системы уравнений (1) имеет вид

$$H_n(l,t) = p_0(l) \left[\frac{b-br(a,b,t)}{b-ar(a,b,t)} \right]^{l+n} \cdot \left[\frac{b}{b-ar(a,b,t)} \right]^c \times {}_2F_1 \left(-l, -n; \frac{c}{a}; \frac{r(a,b,t)(b-a)^2}{a(b-ar(a,b,t))^2} \right), \quad (2)$$

где $r(a,b,t) = \exp[(a-b)t]$; $p_0(l) = [(c/a)/l!] \cdot (a/b)^l \cdot (1-a/b)^{c/a}$; ${}_2F_1(\cdot)$ – гипергеометрическая функция Гаусса; $p_0(l)$ – вероятность стационарного состояния при $t \rightarrow \infty$; $(c/a)_l$ – символ Похгаммера.

Общее решение (2) позволяет описать реальный процесс на выходе фотодетектора с учетом влияния шумов ОУ. При пуассоновском распределении числа фотонов на входе ОУ, распределение числа фотонов $\mathcal{P}(l)$ на его выходе

$$\mathcal{P}(l) = \frac{\exp\left[-\frac{I}{q_1}\right] \left(\frac{q_1-1}{q_1}\right)^l L_l^{\alpha-1}\left[-\frac{I}{q_1(q_1-1)}\right]}{q_1^\alpha}, \quad (3)$$

где $I = r(a,b)(l_c + l_0)$; $q_1 = 1 + \frac{a}{b-a}(1-r(a,b))$;

$r(a,b) = \exp[(a-b)T]$; $\alpha = c/a$; l_c и l_0 – среднее число поступающих сигнальных и шумовых фотонов за время наблюдения T ; $L_l^{\alpha-1}(\cdot)$ – полином Лагерра степени l и порядка $\alpha-1$.

На основании метода характеристических функций, ВМ закона распределения числа фотоэлектронов на выходе фотодетектора с ОУ на входе $v(l)$ примет вид:

$$v(l) = \frac{\exp\left[-\frac{\eta l}{1+\eta(q_1-1)}\right] \left(\frac{\eta(q_1-1)}{1+\eta(q_1-1)}\right)^l L_l^{\alpha-1}\left[-\frac{I}{(q_1-1)(1+\eta(q_1-1))}\right]}{[1+\eta(q_1-1)]^\alpha}, \quad (4)$$

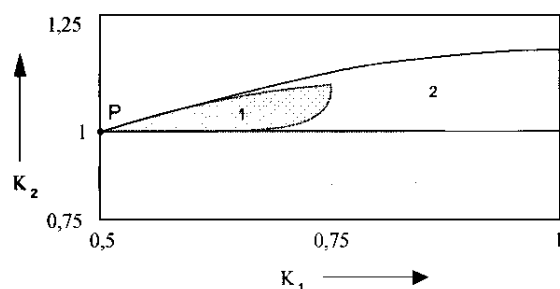


Рис. 1. Топографическая классификация областей существования известной и полученной ВМ закона распределения числа фотоэлектронов на выходе фотодетектора с ОУ на входе в системе координат K_1 и K_2

Разработанная ВМ (4) отличается от известной формулой, определяющей коэффициент q_1 (из-за различных областей допустимых значений). Ранее применяемое выражение для нахождения коэффициент q имеет вид:

$$q = 1 + \exp(-b)(\exp a - 1). \quad (5)$$

На рис. 1 приведена топографическая классификация областей существования известной и полученной ВМ закона распределения числа фотоэлектронов на выходе фотодетектора с ОУ на входе в системе координат K_1 и K_2 , определяемых выражениями:

$$K_1 = \frac{\mu_2}{m_1 + \mu_2}; \quad K_2 = 1 - \frac{\mu_3/\mu_2 + 1 - 2\mu_2/m_1}{2(m_1 - 1 + \mu_2/m_1)}, \quad (6)$$

где m_1, μ_2, μ_3 – математическое ожидание, второй и третий центральные моменты для данного закона распределения.

ВМ закона распределения числа фотоэлектронов на выходе фотодетектора с ОУ на входе (4) соответствует области 2, существующей ВМ – область 1. Точка Р соответствует области существования закона Пуассона, отрезок прямой с координатами $(0,5 < K_1 < 1; K_2 = 1)$ – отрицательному биномиальному распределению.

Сравнительный анализ областей существования ВМ законов распределения числа фотоэлектронов на выходе ФД на рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что ОУ, устанавливаемый перед ФД, вносит больше шумов, чем считалось ранее. ВМ (4) имеет более широкую область существования по сравнению с известной и включает ее как частный случай. В результате установлено, что применение разработанной ВМ (4) позволяет точнее описывать процесс на выходе фотодетектора с ОУ на входе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Штейнберг М. Собственный шум квантовых усилителей. пер. с англ. В.Б. Штейншлейнгера. М.: Иностранная литература, 1961.
2. Курикина А.А. Квантовая оптика и оптическая локация. М.: Сов. радио, 1973. 184 с.
3. Шереметьев А.Г. Статистическая теория лазерной связи. М.: Связь, 1971. 264 с.
4. Карпов И.И. Вероятностное описание дискретных марковских процессов размножения и гибели. // Радиотехника. 2003. № 5. С. 48-55.

Поступила в редакцию 27 июня 2006 г.