

УДК 621.396.32.029.7

ФИЗИКА

А. В. Оганесян

# Сравнительный анализ и синтез оптимальных систем гетеродинного приема оптических импульсов при наличии ошибок синхронизации

(Представлено чл.-корр. АН Армянской ССР Р. А. Казарян 18/IV 1988)

К числу ключевых задач приема оптических импульсов относится задача синтеза оптимальных приемных систем с учетом ошибок синхронизации в синхроканале приемной системы. Некоторые вопросы, связанные с ошибками синхронизации в оптических системах, рассмотрены в (1), где, в отличие от системы радиодиапазона с аддитивными гауссовыми шумами, учтены также квантовые шумы сигнала фотоприемника. Однако в (1) не затронуты вопросы синтеза и анализа оптимальных приемных систем с учетом мультипликативных помех, неизбежно влияющих, наряду с ошибками синхронизации, на эффективность приемной системы. На необходимость совместного учета упомянутых выше факторов при синтезе оптимальных приемных систем указывают результаты, полученные в (2) для оптических импульсов, прошедших турбулентный канал.

Ниже рассмотрены гетеродинные приемные системы импульсов колоколообразного вида:

$$\langle I_c(r, t) \rangle = \frac{2I_c(r)\tau}{\sqrt{2\pi}W} \exp\left(-\frac{2t^2}{W^2}\right), \quad -\frac{\tau}{2} \leq t \leq \frac{\tau}{2} \quad (1)$$

где  $r$  — радиус-вектор, задающий координаты точки в плоскости приема,  $W$  и  $\tau$  — ширина и длительность импульса,  $\langle I_c(r, t) \rangle$  — значение оптической интенсивности, статистически усредненное по ансамблю случайных реализаций ее мгновенной интенсивности  $I_c(r, t)$ , а  $I_c(r)$  — среднее значение интенсивности  $\langle I_c(r, t) \rangle$  на временных интервалах  $(-\tau/2, \tau/2)$ , определяемое как

$$I_c(r) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \langle I_c(r, t) \rangle dt. \quad (2)$$

При гетеродинном приеме относительно легко реализуются условия  $I_s(r) \gg I_c(r, t)$ ,  $I_s(r) \gg I_\phi(r, t)$ , где  $I_s(r)$ ,  $I_\phi(r, t)$  — интенсивности гетеродинного и фонового излучений в плоскости приема. Для реальных приемных систем оптических импульсов, прошедших турбулентный канал, можно считать, что время когерентности отфильтрованного фонового излучения много меньше  $\tau$  (2), поэтому интермодуляцией ге-

гетеродинного и фонового излучений можно пренебречь. Принимается также, что радиус когерентности сигнального излучения в плоскости приема много больше диаметра приемной апертуры системы, и, следовательно, фазовые искажения оптического сигнала по сравнению с амплитудными слишком малы, и ими также можно пренебречь<sup>(3,4)</sup>.

В дальнейшем анализируются системы обработки сигнала фотоприемника со стробированием, пиковым детектированием и накоплением энергии импульса. Полученные в работе результаты показывают, что структура оптимального приемника наиболее проста в случае пикового детектирования и наиболее сложна для систем с накоплением. Отсюда возникает вопрос правильного выбора того или иного метода обработки сигнала в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к системе в целом, с учетом сложности структуры и эффективности приема каждой системы. В рассматриваемом случае сравнительный анализ эффективности систем может быть проведен на основе отношения сигнал/шум (с/ш). Для систем со стробированием отношение с/ш для достаточно узких импульсов, удовлетворяющих условию  $\tau/2W \gg 1$ , задается в виде<sup>(2)</sup>

$$(с/ш)_{ст} = \frac{8\bar{i}_c \bar{i}_r \gamma_r \cos^2(\theta_{cr})}{\sqrt{2\pi} W (\gamma_r + 2)(2e\Delta F_{ст} G \bar{i}_r + \sigma_{ст}^2)}, \quad (3)$$

где  $\bar{i}_c$ ,  $\bar{i}_r$  — средние значения токов, обусловленных оптическим сигналом и гетеродинным излучением,  $\theta_{cr}$  — разность фаз гетеродинного и сигнального полей в плоскости приема,  $G$  — коэффициент внутреннего усиления фотоприемника,  $\Delta F_{ст} > \frac{1}{\tau}$  и  $\sigma_{ст}^2$  — полоса пропускания и дисперсия тепловых шумов электронных цепей стробирования,  $e$  — заряд электрона,  $\gamma_r$  определяется как

$$\gamma_r = \frac{4\bar{i}_{cs} \bar{i}_r \cos^2(\theta_{cr})}{2e\Delta F_L G \bar{i}_r + \sigma_{rL}^2}, \quad (4)$$

где  $\bar{i}_{cs}$  — средний ток, обусловленный синхроимпульсом,  $\Delta F_L$  и  $\sigma_{rL}^2$  — полоса пропускания и дисперсия тепловых шумов электронных цепей контура обратной связи синхронизирующего устройства. Приведенные выражения для  $(с/ш)_{ст}$  применимы в случае малости ошибок синхронизации  $\tau_0$ , когда плотность вероятности  $\tau_0$  является гауссовой (см. (1)). При малых  $\tau_0$ , когда заведомо выполняется условие  $\tau/2 \gg \tau_0$ , наличие ошибок синхронизации не влияет на эффективность работы систем с пиковым детектированием. Для отношения с/ш в этом случае с учетом (1) можно получить

$$(с/ш)_{пк} = \frac{8\bar{i}_c \bar{i}_r \cos^2(\theta_{cr})}{\sqrt{2\pi} W (2e\Delta F_{пк} G \bar{i}_r + \sigma_{пк}^2)}, \quad (5)$$

где  $\Delta F_{пк} < 1/\tau$  и  $\sigma_{пк}^2$  — полоса пропускания и дисперсия тепловых шумов электронных цепей пикового детектирования.

Последовательное рассмотрение процессов накопления заряда на интервалах длительности импульса, его считывания за время  $\tau_{сч}$  с учетом усреднения анализируемого сигнала по ансамблю реализаций оши-

бок синхронизации приводит к следующему выражению для отношения  $c/\omega$  в системе с накоплением энергии импульса:

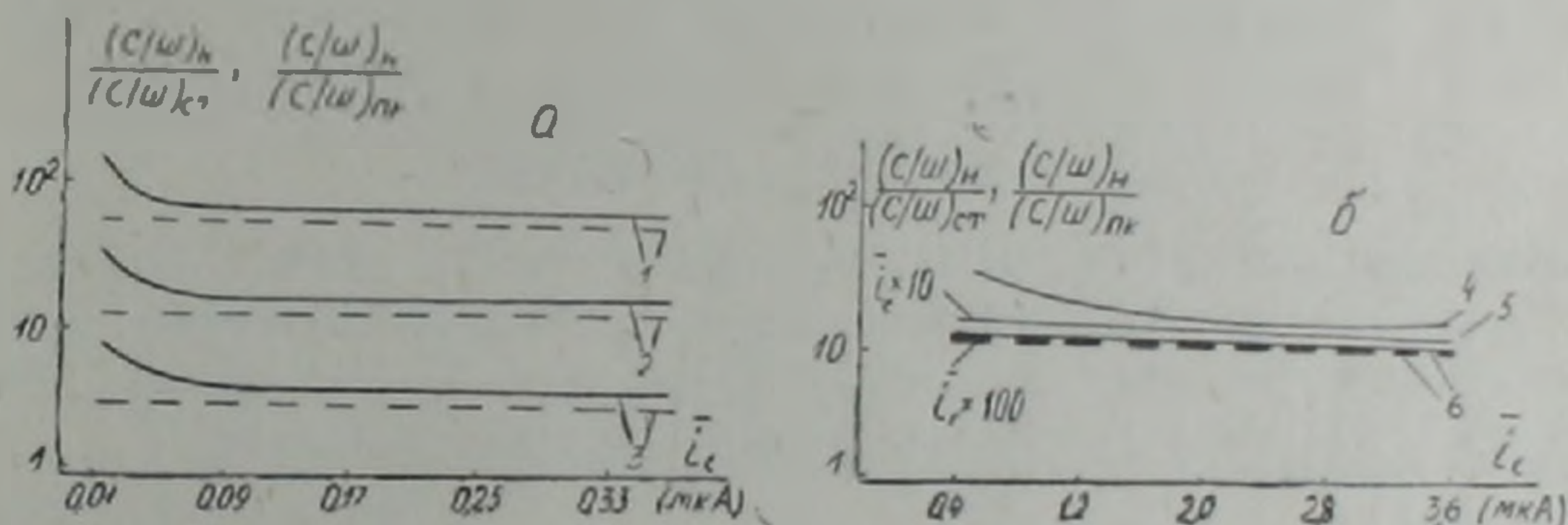
$$(c/\omega)_{II} = \frac{\langle i_{сч} \rangle^2}{2e\Delta F G (i_r K \tau \Delta F_H / \tau_{сч} \Delta F + \sigma_{сч}^2)} \quad (6)$$

где  $\Delta F_H$  и  $\Delta F = 1/2\tau$  — частотные полосы накопителя и сигнала до накопления,  $\sigma_{сч}^2$  — дисперсия тепловых шумов в полосе считывания накопленного заряда,  $\Delta F_{сч} = 1/2\tau_{сч}$ , а среднее значение тока считанного заряда при  $\tau/2 W \gg 1$  определяется как

$$\begin{aligned} \langle i_{сч} \rangle &= \frac{K \sqrt{\gamma_r \Delta F \Delta F_{сч}}}{W \Delta F} \left( \frac{8 \tau \bar{i}_c \bar{i}_r}{\sqrt{2\pi} W} \right)^{1/2} \cos(\theta_{сч}) \times \\ &\times \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \exp\left(-\frac{(t - \tau_0)^2 + \gamma_r \tau_0^2}{W^2}\right) dt d\tau_0 = \sqrt{\pi} A_{нр} W \\ A_{нр} &= \frac{K \Delta F_H \Delta F_{сч}}{\Delta F} \left( \frac{8 \tau \bar{i}_c \bar{i}_r}{\sqrt{2\pi} W} \right)^{1/2} \cos(\theta_{сч}), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $K$  — коэффициент усиления усилителя в устройстве накопления.

На рисунке изображены кривые зависимости отношения



$(c/\omega)_{II}/(c/\omega)_{ст}$  и  $(c/\omega)_{II}/(c/\omega)_{пк}$  (пунктир) от значения среднего тока, обусловленного оптическим импульсом при  $i_{сч} = \bar{i}_c$ ,  $\theta_{сч} = 0$ ,  $\Delta F_{пк} = \Delta F_{ст} = \Delta F_{сч}$ ,  $\sigma_{пк}^2 = \sigma_{ст}^2 = \sigma_{сч}^2 = \sigma_r^2$ ,  $\sigma_f^2 = \sigma_r^2 \Delta F_{TL} / \Delta F$ . Из рисунка видно, что наибольшую эффективность системы с накоплением, по сравнению с системами со стробированием, обеспечивают при слабых оптических сигналах. Кроме того, несмотря на то, что при  $\tau_0 \leq \tau/2$  ошибки синхронизации не влияют на эффективность приема систем с пиковым детектированием, эффективность систем с накоплением при наличии ошибок синхронизации остается более высокой. Сходимость кривых к пунктирам указывает на примерно одинаковую эффективность работы систем с пиковым детектированием и стробированием при больших  $\bar{i}_c$ , что наиболее ярко выражается для фотоприемников, работающих в режиме ограничения дробовыми шумами (рисунок, б).

Для приемной системы с накоплением стационарную плотность вероятности тока  $i$  для импульсов, прошедших турбулентный канал, можно представить в виде

$$p_0(i) = \frac{2\sqrt{\gamma_r} \exp(y_0)}{\sqrt{2\pi} B \sigma_{\text{сч}} W'(1 - \exp(y_0))^2} \times \exp \left| - \frac{(i - \bar{i}_r - \bar{i}_{\text{ш}} - A_{\text{нр}} \psi(y_0) \exp(y_0))^2}{2\sigma_{\text{сч}}^2} - \frac{\gamma_r \exp(2y_0)}{2W'^2(1 + \exp(y_0))^2} - \frac{(x_0 + \sigma_{\gamma}^2)^2}{2\sigma_{\gamma}^2} \right|, \quad (8)$$

где

$$B = b_1^2 b_2^2 - b_{12}^2$$

$$b_1 = - \frac{A_{\text{нр}}^2 \psi^2(y_0)}{\sigma_{\text{сч}}^2} \exp(2x_0) + \frac{x_0 + \sigma_{\gamma}^2 - 1}{\sigma_{\gamma}^2},$$

$$b_2 = - \frac{A_{\text{нр}}^2 (\psi'(y_0))^2}{\sigma_{\text{сч}}^2} \exp(2x_0) + \frac{(x_0 + \sigma_{\gamma}^2) \psi''(y_0)}{\sigma_{\gamma}^2 \psi(y_0)} - \frac{2 \exp(y_0)}{(1 + \exp(y_0))^4} -$$

$$- \frac{\gamma_r \exp(2y_0) (2 - 3 \exp(y_0))}{W'^2(1 + \exp(y_0))^4},$$

$$b_{12} = \frac{A_{\text{нр}}}{\sigma_{\text{сч}}^2} \exp(x_0) \psi'(y_0) (i - \bar{i}_r - \bar{i}_{\text{ш}} - A_{\text{нр}} \exp(x_0) \psi(y_0)) -$$

$$- \frac{A_{\text{нр}}^2}{\sigma_{\text{сч}}^2} \exp(2y_0) \psi(y_0) \psi'(y_0).$$

$$\psi(y_0) = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \exp \left( - \frac{1}{W'^2} \left( t - \frac{\tau \exp(y_0)}{1 + \exp(y_0)} \right)^2 \right) dt. \quad (9)$$

Для  $\psi'(y_0) = d\psi(y_0)/dy_0$  и  $\psi''(y_0) = d^2\psi(y_0)/dy_0^2$  в (9), при использовании известных правил дифференцирования под знаком интеграла, легко получить выражения, не содержащие операции интегрирования. Значения  $x_0$ ,  $y_0$  в (8), (9) определяются из системы уравнений

$$\frac{A_{\text{нр}}}{\sigma_{\text{сч}}^2} (i - \bar{i}_r - \bar{i}_{\text{ш}} - A_{\text{нр}} \exp(x_0) \psi(y_0)) \psi(y_0) \exp(x_0) - \frac{x_0 + \sigma_{\gamma}^2}{\sigma_{\gamma}^2} = 0;$$

$$\frac{A_{\text{нр}}}{\sigma_{\text{сч}}^2} (i - \bar{i}_r - \bar{i}_{\text{ш}} - A_{\text{нр}} \exp(x_0) \psi(y_0)) \exp(x_0) \psi'(y_0) + \frac{1 - \exp(y_0)}{1 + \exp(y_0)} -$$

$$- \frac{\gamma_r \exp(2y_0)}{W'^2(1 + \exp(y_0))^2} = 0. \quad (10)$$

Полученные выражения (8) — (10) позволяют синтезировать оптимальный приемник для гетеродинной присмной системы с накоплением.

Таким образом, структура приемника с накоплением сложна по сравнению с оптимальным приемником пикового детектирования, где при условии  $\tau_0 \leq \tau/2$  ошибки синхронизации не меняют статистики сигнала. Однако проведенный в работе анализ показывает, что при предельно низких уровнях сигнала использование системы с накоплением может обеспечить значительно более высокую эффективность приема, чем система с пиковым детектированием, и, следовательно, в этих случаях применение систем с накоплением целесообразно. В случае обеспечения достаточно высокого уровня сигнала наиболее целесообраз-

ным является применение систем с пиковым детектированием ввиду их относительной простоты по сравнению с системами со стробированием и накоплением. При этом синтез соответствующего оптимального приемника может быть легко осуществлен при применении ранее полученных выражений для плотности вероятности выходного тока фотоприемника, принимающего импульсы амплитудно-стабилизированного излучения, прошедшего турбулентный канал (<sup>5</sup>).

Институт физических исследований  
Академии наук Армянской ССР

#### Ա. Վ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

Օպտիկական իմպուլսների հետերոդինային ընդունման համակարգերի  
համեմատական անալիզ և սինթեզ համաժամանակացման սխալների  
առկայության դեպքում

Աղղանշան/աղմուկ հարաբերության հիման վրա համեմատվում են ստրո-  
բալորման, պիկային դիտեկտման և աղղանշանի կուտակման հետերոդինա-  
յին ընդունման օպտիմալ համակարգեր: Ցույց է տրվում աղղանշանի կու-  
տակման համակարգի վերադասելիությունը թույլ աղղանշանների ընդունման  
դեպքում: Աղղանշանի կուտակման համակարգի համար ստացված են հոսան-  
քի վիճակագրական բաշխումը նկարագրող բանաձևեր, որոնք թույլ են տալիս  
սինթեզել համապատասխան օպտիմալ ընդունման համակարգ:

#### ЛИТЕРАТУРА—ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- <sup>1</sup> Р. М. Гельярдн, Ш. Карп, Оптическая связь, Связь, М., 1972. <sup>2</sup> А. В. Оганесян, Изв. АН АрмССР, Физика, т. 23, № 1 (1988). <sup>3</sup> J. H. Churnside, Ch. M. McIntyre, Applied Optics, v. 17, № 14, p. 2141 (1978). <sup>4</sup> J. H. Churnside, Ch. M. McIntyre, Applied Optics, v. 17, № 14 p. 2148 (1978). <sup>5</sup> Р. А. Казарян, А. В. Оганесян, К. П. Погосян и др. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу, Радио и связь, М., 1985.