

А.В. Оганесян

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ ПРЯМОГО И ГЕТЕРОДИННОГО ПРИЕМА ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ, ПРОШЕДШИХ ТУРБУЛЕНТНЫЙ КАНАЛ

Для систем гетеродинного и прямого приема рассмотрено влияние помех атмосферного канала на плотность вероятности тока на выходе фотоприемника. Учтены как тепловые, так и дробовые шумы. Исследована эффективность соответствующих оптимальных приемников в зависимости от усиления фотоприемника и отношения сигнал — шум.

В работе рассмотрен прием бинарных оптических импульсов, прошедших чисто турбулентный атмосферный канал, характерный для открытых оптических систем передачи информации. Простота анализа бинарных систем является причиной их довольно широкого исследования [1–8]. Вместе с тем получение явных выражений, описывающих статистику сигнала на выходе фотоприемника, делает возможным, при достаточно общих и приемлемых для реальных систем допущениях, рассмотрение вопросов синтеза и анализа систем передачи и приема матричных сигналов, представляющих непосредственный практический интерес, а также более эффективных систем разнесенного приема [3]. Таким образом, в задачах синтеза оптимальных систем приема оптических импульсов первостепенное значение имеет вопрос определения явного вида плотности вероятности флуктуации тока на выходе фотоприемника или же статистики фотоотсчетов.

При приеме относительно сильных оптических импульсов на практике могут возникнуть условия, когда за реально возможное время разрешения приемной системы вероятность попадания на фотоприемник более чем одного фотона достаточно велика. В этом случае прием импульсов целесообразно вести в токовом режиме. Для систем прямого приема, работающих в режиме ограничения тепловыми шумами, вопросы оптимизации и эффективности для указанного случая рассмотрены в [3, 7, 8]. Однако задача синтеза и анализа оптимального приемника в случае применения фотоприемников с высоким коэффициентом внутреннего усиления  $G$ , когда дробовые шумы, обусловленные информативным сигналом, одного порядка с тепловыми или превосходят их, не была решена. Между тем при ограниченных возможностях увеличения мощности оптического передатчика на оптических трассах средней и большей протяженности использование фотоприемников с большим  $G$  является необходимым условием обеспечения работоспособности системы. При рассмотрении систем гетеродинного приема оптимальная обработка сигнала исследовалась для режима ограничения дробовыми шумами гетеродина [4–6]. При этом исключались из рассмотрения дробовые шумы, обусловленные интерференционным сигналом, а также тепловые шумы, которые при сильных флуктуациях интенсивности оптического сигнала и малых  $G$  могут оказать существенное влияние на статистику сигнала на выходе фотоприемника, и на эффективность системы.

Ниже рассмотрены системы прямого и гетеродинного приема, основанные на отношении правдоподобия, которые при известных априорных вероятностях  $p$  и  $1-p$  передачи оптического импульса и паузы обеспечивают минимально возможную вероятность ошибочного приема. Решение о наличии (гипотеза  $H_1$ ) и отсутствии (гипотеза  $H_0$ ) оптического импульса на входе системы принимается на основе соотношения [3]

$$\frac{p_{c+ш}(i)}{p_{ш}(i)} \underset{H_0}{\overset{H_1}{\gtrless}} \frac{1-p}{p}, \quad (1)$$

где  $p_{c+ш}(i)$  и  $p_{ш}(i)$  — плотности вероятности флуктуаций тока  $i$  на выходе фотоприемника при наличии и отсутствии импульса на его входе.

Для наиболее интересных, с практической точки зрения, высокоинформативных систем, в которых длительность импульса  $\tau$  много меньше времени когерентности  $\tau_c$  флуктуаций интенсивности оптического сигнала, прошедшего турбулентный канал, выражение для  $P_{c+ш}(i)$  можно записать в виде

$$p_{c+ш}(i) = \int_0^{\infty} \frac{\exp \left[ -\frac{(i - zA_c - i_{AD})^2}{2(\alpha(zA_c + \bar{i}_{AD}) + \sigma_i^2)} - \frac{(\ln z + D \cdot C)^2}{2D} \right]}{2\pi z (D(\alpha(zA_c + \bar{i}_{AD}) + \sigma_i^2))^{1/2}} dz, \quad (2)$$

где  $\sigma_z^2$  — дисперсия тепловых шумов;  $z$  — нормированное к среднему значению оптической мощности принимаемого импульса на входе фотоприемника,  $\alpha = e\Delta FG$  ( $e$  — заряд электрона,  $\Delta F$  — полоса пропускания последетекторных электронных цепей). Постоянные  $A_c$ ,  $\bar{i}_{AD}$ ,  $D$  и  $C$  в (2) определяются следующим образом: прямой прием —  $A_c = \bar{i}_c$ ;  $\bar{i}_{AD} = \bar{i}_{ш}$ ;  $D = \sigma_c^2$ ;  $C = 0,5$ ; гетеродинный прием —  $A_c = 2\sqrt{\bar{i}_c \bar{i}_t} \cos(\theta_{с.г.})$ ;  $\bar{i}_{AD} = \bar{i}_{ш} + \bar{i}_t$ ;  $D = \sigma_c^2/4$ ;  $C = 1$ , где  $\sigma_c^2$  — дисперсия  $\ln z$ ;  $\bar{i}_c$ ,  $\bar{i}_t$  и  $\bar{i}_{ш}$  — средние значения токов, обусловленных сигнальным импульсом, гетеродином и аддитивными шумами (фоновым излучением, темновым током фотоприемника);  $\theta_{с.г.}$  — разность фаз гетеродинного и сигнального полей в плоскости приема. В случае гетеродинного приема предполагается, что оптические частоты гетеродина и информативного сигнала совпадают, и мощность гетеродина много больше мощности информативного сигнала, следовательно, величиной  $\bar{i}_c$  по сравнению с  $\bar{i}_t$ , можно пренебречь. Предполагается также, что время когерентности  $\tau_\phi$  отфильтрованного фонового излучения много меньше  $\tau$ . Для реальных фильтров  $\tau_\phi \sim 10^{-12}$  с, и условие  $\tau \gg \tau_\phi$  практически всегда выполняется [3]. Кроме того, для гетеродинного приема (2) справедливо в случае пренебрежения фазовыми флуктуациями сигнального поля в плоскости приема по сравнению с амплитудными. Согласно [4] для следящей (адаптивной) системы при малых приемных апертурах  $d$ , когда  $d/\rho_c \leq 0,5$  ( $\rho_c$  — радиус когерентности принимаемого оптического поля), при формировании статистики сигнального тока фотоприемника амплитудные флуктуации оптического сигнала являются доминирующими по сравнению с фазовыми и последними можно пренебречь. Наряду с этим при уменьшении приемной апертуры стремление кривых плотности вероятности флуктуаций сигнального тока фотоприемника для следящей системы, устранимой в линейном приближении фазовые флуктуации оптического поля, к аналогичным кривым для неследящей (статической) системы, учитывающей эти флуктуации, приводит к выводу об идентичности обеих систем при  $d/\rho_c \rightarrow 0$  [4]. Что делает правомерным пренебрежение фазовыми флуктуациями при  $d \ll \rho_c$  в практических приложениях. Следует также отметить, что хорошее соответствие теоретических результатов [4] экспериментальным [5] свидетельствует о правильности исходных позиций [4] и сделанных там выводов. Таким образом, при исследовании статистики флуктуаций сигнального тока фотоприемника для адаптивных систем, устранимых в линейном приближении фазовые флуктуации принимаемого оптического сигнала, при  $d/\rho_c \ll 0,5$  и статических систем при  $d \ll \rho_c$  в практических приложениях пространственно-временными фазовыми флуктуациями оптического сигнала по сравнению с амплитудными можно с достаточно хорошим приближением пренебречь.

В [9–11] приводятся выражения для  $\rho_c$ , нашедшие экспериментальное подтверждение, исходя из которых можно оценить диаметр приемной апертуры приемных систем. В частности, для вертикальных трасс спутник–Земля значение  $\rho_c$ , при близких к реальным уровням турбулентности, для оптических длин волн  $\tau = 0,69$  и  $10,6$  мкм составляет  $\sim 3,2$  и  $86$  см [12]. Таким образом, для приемных систем с  $\lambda \gtrsim 10$  мкм вполне реально обеспечение условия  $d \ll \rho_c$  в статических системах. При этом уменьшение общей принимаемой энергии, обусловленное соблюдением требования  $d \ll \rho_c$ , можно компенсировать применением разнесенного приема с использованием матричного приемника, каждый элемент которого обрабатывает оптическое поле на площадке радиусом  $d \ll \rho_c$ . Для коротковолнового оптического диапазона применение полученных в настоящей работе результатов реально для систем с адаптацией. Ввиду исключительной важности адаптивных систем им уделяется большое внимание [11–14]. И если даже в реальных системах полного устранения фазовых искажений достичь не удается, тем не менее имеющиеся результаты по экспериментальным адаптивным системам, в которых удалось достичь эквивалентного повышения уровня сигнала до 8 дБ или же подавления помех до 35 дБ, свидетельствуют о достаточно высокой эффективности и перспективности таких систем [13, 14], что позволяет надеяться на возможность создания реальных систем, в которых роль фазовых флуктуаций сигнала в формировании статистики сигнального тока фотоприемника будет незначительна по сравнению с амплитудными флуктуациями.

При прямом приеме все ограничения, указанные для гетеродинного приема, кроме условия  $\tau \gg \tau_\phi$ , снимаются. Применение метода наискорейшего спуска в (2) приводит к следующему окончательному выражению для  $p_{с+ш}(i)$ :

$$p_{с+ш}(i) = \frac{\exp[-\gamma^2/2\beta - (\ln z_0 + D \cdot C)^2/2D]}{\sqrt{2\pi} \left[ \left( \frac{\gamma z_0 A_c}{\beta} \right)^2 D + \frac{\alpha D z_0 A_c (4\gamma z_0 A_c - \gamma^2 - \alpha z_0 A_c)}{2\beta} - D z_0 A_c (\gamma - z_0 A_c - \alpha/2) + \beta \right]^{1/2}} \quad (3)$$

где  $\gamma = i - z_0 A_c - \bar{i}_{AD}$ ,  $\beta = \alpha(z_0 A_c + \bar{i}_{AD}) + \sigma_z^2$ , а  $z_0$  для  $i$  определяется из уравнения

$$\frac{\gamma z_0 A_c}{\beta} + \frac{\alpha z_0 A_c (\gamma^2 - \beta)}{2\beta^2} - \frac{\ln z_0 + D \cdot C}{D} = 0. \quad (4)$$

Выражение для  $p_{\text{ш}}(i)$  в рассматриваемом случае можно представить в виде [3]

$$p_{\text{ш}}(i) = \frac{1}{[2\pi(\alpha\bar{i}_{AD} + \sigma_{\tau}^2)]^{1/2}} \exp\left[-\frac{(i - \bar{i}_{AD})^2}{2(\alpha\bar{i}_{AD} + \sigma_{\tau}^2)}\right]. \quad (5)$$

Таким образом (1), (3)–(5) определяют логику обработки сигнала в оптимальных приемниках при прямом и гетеродинном методе приема.

Согласно (1) оптимальный пороговый уровень тока  $i_0$  определяется из уравнения

$$\frac{p_{\text{с+ш}}(i_0)}{p_{\text{ш}}(i_0)} = \frac{1-p}{p}. \quad (6)$$

Подстановка в (6) выражений для  $p_{\text{с+ш}}(i)$  и  $p_{\text{ш}}(i)$  при  $i = i_0$  приводит к следующей системе уравнений для определения  $i_0$ :

$$\begin{aligned} & -\gamma_0^2/2\beta - (\ln z_0 + D \cdot C)^2/2D + \frac{(i_0 - \bar{i}_{AD})^2}{2(\alpha\bar{i}_{AD} + \sigma_{\tau}^2)} + \\ & + \frac{1}{2} \ln(\alpha\bar{i}_{AD} + \sigma_{\tau}^2) - \frac{1}{2} \ln\left[\left(\frac{\gamma_0 \alpha z_0 A_c}{\beta}\right)^2 D + \right. \\ & \left. + \frac{\alpha D z_0 A_c (4\gamma_0 z_0 A_c - \gamma_0^2 - \alpha z_0 A_c)}{2\beta} - D z_0 A_c (\gamma_0 - z_0 A_c - \alpha/2) + \beta\right] - \ln \frac{1-p}{p} = 0; \quad (7) \\ & \frac{\gamma_0 z_0 A_c}{\beta} + \frac{\alpha z_0 A_c (\gamma_0^2 - \beta)}{2\beta^2} - \frac{\ln z_0 + D \cdot C}{D} = 0, \end{aligned}$$

где  $\gamma = i_0 - z_0 A_c - \bar{i}_{AD}$ . Поскольку при стремлении к своим граничным значениям  $(-\infty, \infty)$  для  $i_0$  и  $(0, \infty)$  для  $z_0$  левые части уравнений в (7) меняют знак, то решения  $i_0, z_0$  всегда существуют. Реализация решения системы уравнений на ЭВМ может быть осуществлена методом секущих [15]. При известном  $i_0$  выбор гипотез  $H_1, H_0$  осуществляется по правилу

$$i \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} i_0. \quad (8)$$

Для систем без разнесения, когда оптический сигнал принимается одним фотоприемником, предварительное определение  $i_0$  и использование (8) в целом могут повысить пропускную способность приемной системы. При разнесенном приеме это преимущество теряется [3]. Более того, решение системы уравнений в общем случае требует больше времени, чем решение одного уравнения (4). Что, в свою очередь, требует сопоставления необходимого времени определения  $i_0$  с характерным временем стационарности оптического канала и процессов, приводящих к медленным изменениям параметров  $\bar{i}_c, \bar{i}_r, \bar{i}_{\text{ш}}, \sigma_{\tau}^2$ . (В частности, для персональной ЭВМ «Электроника Д 3–28» время определения одного значения  $i_0$ , при обеспечении отличия левых частей уравнений (6) от нуля на величину заданной ошибки  $|\varepsilon| \leq 10^{-9}$ , составляло примерно 40–50 мин). Таким образом, вопрос выбора структуры обработки сигнала на основе (1) или (8) зависит от конкретных условий работы системы и предъявляемых к ней требований.

Вероятность ошибочного приема  $P_{0\text{ш}}$ , определяющая эффективность приемной системы, задается в виде

$$P_{0\text{ш}} = p \int_{-\infty}^{i_0} P_{\text{с+ш}}(i) di + (1-p) \int_{i_0}^{\infty} p_{\text{ш}}(i) di. \quad (9)$$

На рис. 1 представлены кривые зависимости вероятности ошибочного приема от коэффициента внутреннего усиления фотоприемника. На рисунке можно проследить характер изменения эффективности приема при переходе от режима ограничения тепловыми шумами ( $G < 10^3$ ) к режиму ограничения дробовыми шумами ( $G > 10^5$ ). Сравнение кривой 1 ( $\sigma_c^2 = 2,25$ ) с кривой 2 ( $\sigma_c^2 = 0,5$ ) показывает, что с ростом  $G$  влияние турбулентности атмосферы (задающей величину  $\sigma_c^2$ ) на эффективность приема возрастает. Из рисунка также видно, что начиная с некоторого граничного значения  $G$  (в

данном случае  $G \approx 10^6$ ) дальнейшее увеличение  $G$  практически не приводит к улучшению эффективности приема, и, следовательно, нецелесообразно.

На рис. 2 представлены кривые зависимости вероятностей ошибочного приема от параметра  $(с-ш)_0 = \bar{i}_c^2 / (\alpha(\bar{i}_c + \bar{i}_ш) + \sigma_T^2)$ , соответствующего отношению сигнал-шум при отсутствии флуктуации интенсивности оптического сигнала. По оси ординат отложены значения  $P_{ош}$  (сплошные кривые), а также вероятностей пропуска  $P_{пр}$  (штрихпунктирные кривые) и ложного приема  $P_{лп}$  (штриховые кривые). Из рисунка видно, что в случае сильной ( $\sigma_c^2 = 2,25$ ) и умеренной ( $\sigma_c^2 = 0,5$ ) турбулентности соотношение между  $P_{пр}$  и  $P_{лп}$  меняется. При этом при умеренных уровнях турбулентности с ростом отношения  $(с-ш)_0$  происходит перераспределение вклада, вносимого  $P_{пр}$  и  $P_{лп}$  в  $P_{ош}$ . Выявленная зависимость  $P_{ош}$  и  $P_{пр}$  от  $\sigma_c^2$  и  $(с-ш)_0$  должна быть учтена при выборе величины  $\rho$ . Сравнение кривых 2 и 3 для  $P_{ош}$  показывает, что в отличие от приемных систем, в которых дробовыми шумами полностью пренебрегается, и  $\rho_{ош}$  зависит лишь от отношения  $(с-ш)_0$  [8], в синтезированной системе при умеренных уровнях оптического сигнала  $P_{ош}$  зависит как от отношения  $(с-ш)_0$ , так и абсолютных значений параметров  $\bar{i}_c$ ,  $\bar{i}_ш$ ,  $\sigma_T^2$ . Вместе с тем с увеличением  $(с-ш)_0$  наблюдается тенденция к насыщению роста эффективности приема, т.е. уменьшению  $P_{ош}$ . При этом кривая 3 стремится к кривой 2, так при  $(с-ш)_0 = 10^3$  относительное различие в  $P_{ош}$  для кривой 2 ( $P_{ош,2}$ ) и кривой 3 ( $P_{ош,3}$ ), определяемое как  $(P_{ош,3} - P_{ош,2}) / P_{ош,2}$  составляет  $\sim 0,36$ , в то время как при  $(с-ш)_0 = 535$  оно в 5 раз больше.

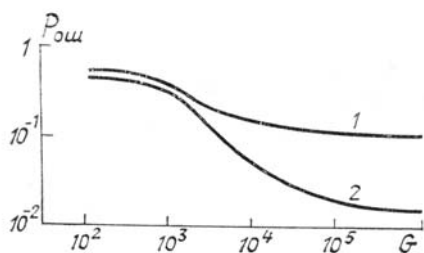


Рис. 1. Кривые зависимости вероятности ошибочного приема  $P_{ош}$  от коэффициента внутреннего усиления фотоприемника  $G$ , при  $\rho = 0,5$ ,  $\Delta F = 10^8$  Гц,  $\sigma_T^2 = 0,8$  мкА<sup>2</sup>,  $\bar{i}_c / G = 10^{-3}$  мкА,  $\bar{i}_ш / G = 10^{-4}$  мкА

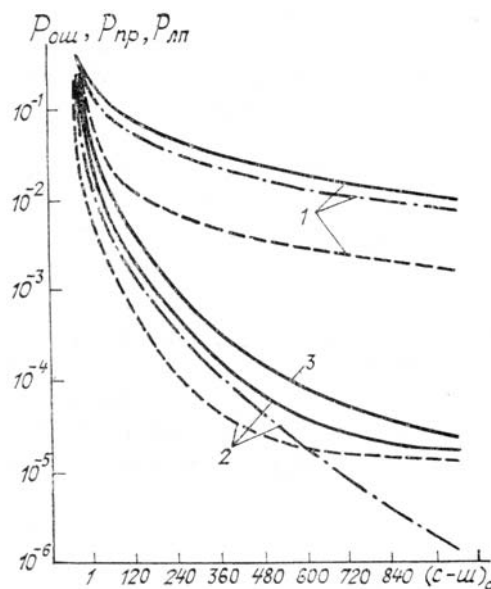


Рис. 2. Кривые зависимости вероятности ошибочного приема  $P_{ош}$  от отношения сигнал-шум. Для кривых 1 —  $\sigma_c^2 = 2,25$ ,  $\bar{i}_ш = 10$  мкА; 2 —  $\sigma_c^2 = 0,5$ ,  $\bar{i}_ш = 10$  мкА; 3 —  $\sigma_c^2 = 0,5$ ,  $\bar{i}_ш = 20$  мкА;  $G = 10^4$

Ввиду схожести выражений (1), (3)–(5) для прямого и гетеродинного приема все сделанные выше качественные выводы для систем прямого приема справедливы и для гетеродинных систем. Однако следует отметить, что в гетеродинных системах будут количественные различия по сравнению с системами прямого приема из-за присущих гетеродинным системам характерных особенностей, отражающихся на величину параметров  $A_c$ ,  $\bar{i}_{AD}$ ,  $D$ .

Итак, полученные в работе результаты позволяют синтезировать унифицированные приемники оптимальной обработки сигнала для систем прямого и гетеродинного приема и провести их анализ. При этом для систем прямого приема, по сравнению с ранее известными, снимаются ограничения на выбор фотоприемника и режим его работы. А для гетеродинных систем, при исключении флуктуации волнового фронта, дополнительный учет дробовых шумов сигнала и аддитивных тепловых шумов позволяет более точно описать статистику сигнала на выходе фотоприемника, а следовательно, повысить эффективность приема.

Следует отметить, что привлечение результатов [4] позволило бы рассмотреть гетеродинные системы (как статистические при  $d \sim \rho_c$ , так и адаптивные при  $d > 0,5\rho_c$ ) в случае, когда фазовые флуктуации существенны. Однако структуры систем оптимальной обработки сигнала фотоприемника намного усложнились бы. Вместе с тем с практической точки зрения предпочтительными являются относительно простые в реализации и обладающие достаточно высоким быстродействием системы, что

делает целесообразным принятый в настоящей работе подход по синтезу оптимальных систем обработки сигнала фотоприемника при гетеродинном приеме, приближающихся по своей структуре к аналогичным системам при прямом приеме.

Полученные в работе выражения для плотности вероятности флуктуаций тока на выходе фотоприемника позволяют в принципе решать более сложные задачи анализа и синтеза оптимальных систем разнесенного и матричного приема оптических сигналов с кодово-импульсной, позиционной и поляризационной модуляциями.

1. Шереметьев А. Г., Толпарев Р. Г. Лазерная связь М.: Связь. 1974.
2. Гальярди Р. М., Карп Ш. Оптическая связь. М.: Связь, 1978.
3. Казарян Р. А., Оганесян А. В., Погосян К. П. и др. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу. М.: Радио и связь. 1985.
4. Churnside J. H., Mc Intyre Ch. M. //Appl. Optics. 1978. V. 17. № 14. P. 2141.
5. Churnside J. H., Mc Intyre Ch. M. //Appl. Optics. 1978. V. 17. № 14. P. 2148
6. Churnside J. H., Mc Intyre Ch. M. //Appl. Optics. 1980. V. 19. № 4. P. 582.
7. Казарян Р. А., Оганесян А. В. //Изв. АН АрмССР. Физика. 1978. Т. 13. № 6. С. 491.
8. Казарян Р. А., Оганесян А. В. //Квантовая электроника. 1983. Т. 10 № 2. С. 272.
9. Распространение лазерного пучка в атмосфере /Под ред. Д. Стробена. М: Мир. 1981.
10. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере /А.С. Гурвич, А.И. Кон, В.Л. Миронов, С.С. Хмелевцов. М.: Наука. 1976.
11. Зуев В. Е. Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь. 1981.
12. Устинов Н. Д., Матвеев И. Н., Протопопов В. В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. М.: Наука. 1983.
13. Фэнтэ Р. //ТИИЭР. 1980. Т. 68. № 11. С. 75.
14. Комптон Р. Т. мл. //ТИИЭР. 1978. Т. 66. № 3. С. 23.
15. Островский А. М. Решение уравнений и систем уравнений. М.: ИЛ. 1963.

Институт физических исследований  
АН АрмССР, г. Аштарак

Поступила в редакцию  
21 марта 1988 г.

**A. V. Novhannisyán. The Efficiency of Heterodyne and Direct Detection Systems for Turbulent Atmosphere Propagating Optical Pulses.**

The influence of the noise of atmospheric channel on the probability distribution of the current on the output of the photoreceiver is considered. The efficiency corresponding to optimal receiver in depend on coefficient of amplification of photoreceiver and signal to noise ratio is investigated.