

## СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЕЙ ЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР ДВУХ ПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Р. А. КАЗАРЯН, А. В. ОГАНЕСЯН

При помощи моделирования оптической линии связи на ЭВМ подсчитываются вероятности ошибочного приема для оптимального и неоптимального приемников оптического сигнала. Показано, что несмотря на приближенный метод, используемый при получении структуры оптимального приемника, последний обеспечивает значительно меньшую вероятность ошибочного приема, чем неоптимальный приемник.

В работе сравниваются логические структуры оптимального и неоптимального приемников оптического сигнала для атмосферной оптической линии связи с кодово-импульсной модуляцией интенсивности луча, работающей в режиме счета фотонов. Предполагается, что оптический атмосферный канал не содержит рассеивающих областей и следовательно флуктуации сигнальной интенсивности обусловлены турбулентностью атмосферы. Как известно, в этом случае флуктуации принимаемой сигнальной интенсивности описываются логарифмически-нормальным распределением [1]. В предположении, что интервал счета фотонов ( $\tau$ ) много больше времени когерентности флуктуирующего фонового излучения ( $\tau_B$ ), прошедшего оптический фильтр, и много меньше времени когерентности флуктуирующей сигнальной интенсивности ( $\tau_s$ ), в [2] получено соотношение правдоподобия для оптимального приемника, обрабатывающего выходные сигналы мозаичного фотоприемника, состоящего из отдельных фотодетекторов.

Полученное в [2] соотношение правдоподобия для случая одного фотодетектора можно записать следующим образом:

$$L = n \ln \left( \frac{z_0 N_s}{N_B} + 1 \right) - z_0 N_s - \frac{(\ln z_0 + \sigma^2/2)^2}{2\sigma^2} - \\ - \frac{1}{2} \ln \left[ \sigma^2 \left( z_0 N_s - \frac{n z_0 N_s N_B}{(z_0 N_s + N_B)^2} + z_0 N_s \right) + 1 \right], \quad (1)$$

где  $z_0$  для каждого интервала счета ( $t, t + \tau$ ) определяется из уравнения

$$\frac{n z_0 N_s}{z_0 N_s + N_B} - z_0 N_s - \frac{\ln z_0 + \sigma^2/2}{\sigma^2} = 0. \quad (2)$$

Величины  $N_s$ ,  $N_B$ ,  $n$  и  $\sigma^2$  определяют соответственно среднее число сигнальных фотоэлектронов, среднее число шумовых фотоэлектронов (обусловленных как фоновым излучением, так и темновым током фотодетектора), число фотоэлектронов в заданном интервале и дисперсию флуктуаций логарифма принимаемой нормированной сигнальной интенсивности.

При выводе соотношения правдоподобия, соответствующего (1), в [2] было использовано выражение для плотности вероятности распределения числа фотоэлектронов, полученное приближенным вычислением интеграла в формуле Мандела [3, 4], что с точки зрения дальнейших приложений требует рассмотрения вопроса о степени соответствия выражения (1) реальным отсчетам фотоэлектронов в рассматриваемом канале. Вместе с тем, как видно из (1) и (2), структура оптимального приемника относительно сложна и интересным является сравнение данного приемника с приемником, не учитывающим некоторый параметр канала, но имеющим более простую структуру. В качестве последнего можно взять приемник, основанный на следующем соотношении правдоподобия:

$$l = n \ln \left( \frac{N_s}{N_B} + 1 \right) - N_s. \quad (3)$$

Выражение (3) соответствует оптимальному приемнику в предположении отсутствия флуктуаций сигнальной интенсивности [5, 6]. Очевидно, что при наличии флуктуаций приемник не будет оптимальным. Поскольку в (3) не учитываются флуктуации сигнальной интенсивности, то сравнение эффективностей приемников, основанных на выражениях (1) и (3), можно осуществить только экспериментально. Что касается проверки соответствия выражения (1) реальному каналу, то ее можно осуществить сопоставлением теоретических вероятностей ошибок, приведенных в [6], с экспериментальными.

Решение поставленных задач было осуществлено в модельном эксперименте на ЭВМ. На рис. 1 приводится блок-схема модели.

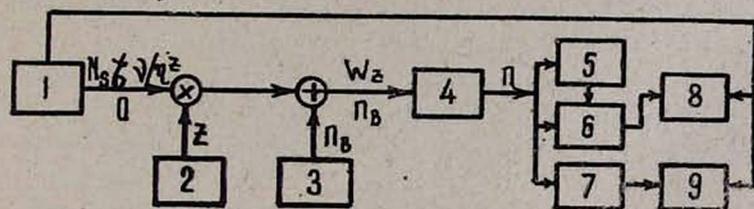


Рис. 1.

Блок 1 соответствует передатчику бинарных сигналов, который в случае передачи непрерывной интенсивности приводит в среднем к появлению  $N_s$  сигнальных фотоэлектронов за интервал счета  $\tau$ . Блок 2 моделирует флуктуации сигнальной интенсивности, описываемые логарифмически-нормальным процессом, с временем корреляции, равным 0,1 относительных единиц времени\*. График корреляционной функции логарифмически-нормального процесса приводится на рис. 2. По оси абсцисс

\* При составлении алгоритмов программ получения логарифмически-нормального процесса были использованы методы, описанные в [7].

отложено время, по оси ординат — значения корреляционной функции. Блок 3 моделирует фоновое излучение, прошедшее оптический фильтр. Поскольку при  $\tau \gg \tau_B$  шумовые фотоэлектроны, обусловленные фо-

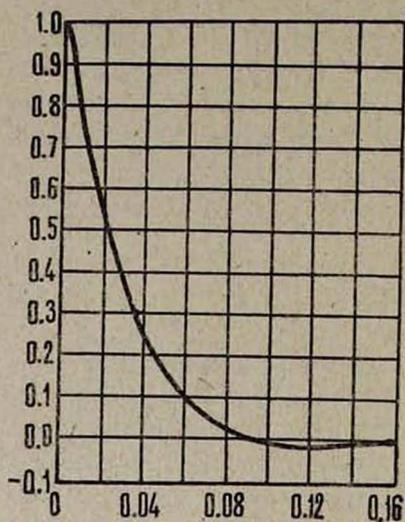


Рис. 2.

вым излучением, подчиняются распределению Пуассона с постоянным средним [2, 5] и известно, что к такому же распределению приводит постоянное по интенсивности излучение [5], то воздействие на фотодетектор флуктуирующего широкополосного фонового излучения, преобразуемого оптическим фильтром в узкополосное, можно свести к воздействию эквивалентного источника шумовых фотонов с постоянной интенсивностью.

Таким образом, для каждого интервала счета  $(t, t + \tau)$  при  $\tau_s \gg \tau$  для интенсивности  $I$  на входе фотодетектора можно записать следующее выражение:

$$I = \frac{h\nu}{\eta\tau} (N_s z + n_B), \quad (4)$$

где  $h\nu$  — энергия кванта сигнального излучения,  $\eta$  — квантовая эффективность фотодетектора,  $z$  — случайные нормализованные величины логарифмически-нормального процесса, а  $n_B$  — среднее число шумовых фотоэлектронов, обусловленных фоновым излучением. Блок 4 соответствует модели фотодетектора, который для каждого интервала счета  $(t, t + \tau)$  преобразует принимаемое излучение в фотоэлектроны\*, количество которых подчиняется пуассоновскому распределению со средним

$$W_z = I\eta\tau/h\nu. \quad (5)$$

Кроме того, в блоке 4 учитываются шумовые фотоэлектроны фотодетектора, обусловленные его темновым током. Распределение шумовых фотоэлектронов фотодетектора считается пуассоновским с постоянным средним  $n_D$  [5]. При этом из свойства аддитивности случайных величин, подчиняющихся различным пуассоновским распределениям [5], следует, что общее число фотоэлектронов за интервал счета  $(t, t + \tau)$  будет подчиняться пуассоновскому распределению со средним

$$W = W_z + n_D. \quad (6)$$

Для рассматриваемого случая  $N_B$  равно сумме  $n_B$  и  $n_D$ .

\* Предполагается, что каждому выходному импульсу фотодетектора соответствует один фотопоток.

Блок 5 для каждого  $n$  из уравнения (2) определяет  $z_0$ . Для решения (2) применяется метод секущих [8]. Блоки 6 и 7 вычисляют соответственно значения  $L$  и  $l$ . Блоки 8 и 9 считают вероятности ошибок для оптимального и неоптимального приемников. Решение о наличии ошибочного приема для каждого приемника принимается в том случае, если принятый соответствующим приемником символ не соответствует символу, передаваемому передатчиком. Передаваемой интенсивности соответствует символ 1, пассивной паузе — 0. При этом считается, что при  $L \geq 0$  или  $l \geq 0$  соответствующим приемником принят символ 1, в противном случае — 0. Моделирование для каждой комбинации величин  $N_s$ ,  $N_B$  и  $\sigma^2$  продолжается до достижения заданного доверительного интервала подсчитываемой вероятности. Интервал счета фотонов  $\tau$  для рассматриваемого случая совпадает с шагом моделирования и равен 0,01 относительных единиц времени.

На рис. 3а, б приводятся теоретические кривые (сплошные линии) вероятностей ошибок для оптимального приемника, взятые из [6],

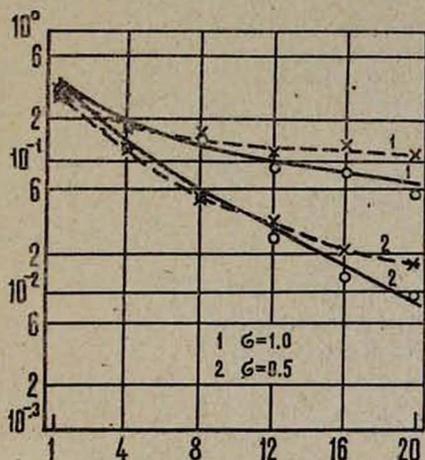


Рис. 3а.

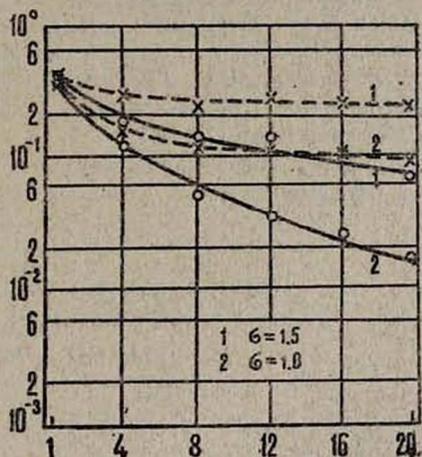


Рис. 3б.

и значения, посчитанные в модели, как для оптимального приемника (кружочки), так и для неоптимального приемника (крестики, соединенные пунктирной линией). Доверительный интервал для каждой вероятности ошибки, в котором с вероятностью 0,95 заключено истинное значение оцениваемой величины, по абсолютной величине не превосходит 20% от вероятности ошибки, посчитанной в модели.

На рис. 3а по оси абсцисс отложены значения отношения  $N_s/N_B$  при  $N_B=1$ , а на рис. 3б — при  $N_B=4$ . По оси ординат на рис. 3а, б отложены значения вероятностей ошибочного приема (сплошные линии соответствуют оптимальному приемнику, пунктирные — неоптимальному). Как следует из рис. 3, посчитанные в модели значения вероятностей ошибок хорошо ложатся на теоретические кривые и можно утверждать о хорошем соответствии выражений (1) и (2) описанному каналу. Вме-

сте с тем из сопоставления посчитанных в модели вероятностей ошибок для оптимального и неоптимального приемников следует, что при больших отношениях  $N_s/N_B$  и при больших значениях  $N_s$  оптимальный приемник может обеспечить значительно меньшую вероятность ошибочного приема, чем неоптимальный. При этом, как видно из рис. 3б, при достаточно больших значениях  $N_s$  кривые вероятностей ошибок для неоптимального приемника переходят в область насыщения, в то время как для кривых оптимального приемника явно видна тенденция к дальнейшему спаду с ростом  $N_s$ .

Институт физических исследований  
АН АрмССР

Поступила 22.IV.1977

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В. И. Татарский. Распространение волн в турбулентной атмосфере, Изд. Наука, М., 1967.
2. М. С. Teich, S. Rosenberg. Appl. Opt., 12, 2616 (1973).
3. P. Diamant, M. C. Teich. J. Opt. Society of America, 60, 1489 (1970).
4. М. С. Teich, S. Rosenberg. J. Opto-Electronics, 3, 63 (1971).
5. Вильям К. Прамм. Лазерные системы связи, Изд. Связь, М., 1972.
6. S. Rosenberg, M. C. Teich. Appl. Opt., 12, 2625 (1973).
7. В. В. Быков. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике, Изд. Советское радио, М., 1971.
8. Г. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров, Изд. Наука, М., 1970.

#### ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆԻ ԵՐԿՈՒ ԸՆԴՈՒՆԻՉՆԵՐԻ ՏՐԱՄԱՐԱՆԱԿԱՆ ԿԱԶՄՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԷՖԵԿՏԻՎՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԵՄԱՏՈՒՄԸ

Ռ. Ա. ԿԱԶԱՐՅԱՆ, Ա. Վ. ՀՈՎՀԱՆՆԻՍՅԱՆ

Էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի վրա մոդելման միջոցով ստացված արդյունքների և տեսական կորերի համեմատումից հետևում է, որ օպտիմալ ընդունիչի կազմությունը, չնայած այն ստանալու համար կիրառվող մեթոդի մոտավորությանը, լավ է համապատասխանում դիտարկվող օպտիկական կանալին և կոհերենտ ազդանշանի մեծ հզորությունների դեպքում է վիճակի է ապահովել զգալիորեն ավելի փոքր սխալի հավանականություն, քան ոչ օպտիմալ ընդունիչը:

#### THE COMPARISON OF LOGICAL STRUCTURE EFFICIENCIES OF TWO OPTICAL SIGNAL RECEIVERS

R. A. KAZARYAN, S. V. OGANESYAN

Logical structures of the optimal and non-optimal signal receivers were compared by means of computer simulation. The results indicate, that despite the approximate method of the obtaining of optimal receiver structure, the latter well matches the optical channel used and at higher levels provides considerably lower probability of error in comparison with the non-optimal one.