

## АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

**Введение.** Современные оптико-электронные системы (ОЭС) телевизионного типа нашли широкое применение для наблюдения разного рода космических объектов (КО). Это обусловлено целым рядом преимуществ ОЭС по сравнению с другими средствами наблюдения, например, радиолокационными, фотографическими и другими. К преимуществам ОЭС можно отнести высокую точность определения угловых координат, высокую чувствительность, оперативность, позволяющую вести наблюдения в реальном масштабе времени, высокую пропускную способность, возможность получения информации в удобном для последующей обработки виде.

Пассивные ОЭС регистрируют оптическое излучение самосветящихся космических объектов (при наблюдении звезд) или излучение Солнца, отраженное от поверхности КО (при наблюдении объектов искусственного происхождения, астероидов, планет и других).

Оптические сигналы, регистрируемые ОЭС, проходя через атмосферу Земли, частично поглощаются и рассеиваются, что приводит к мультипликативному искажению сигнала [1]. На качество функционирования ОЭС также оказывает влияние аддитивная помеховая составляющая. Источниками аддитивной помехи являются рассеянное в атмосфере излучение Солнца и звезд, собственное излучение атмосферы, а также внутренние шумы фотоприемника.

В существующих ОЭС, как правило, реализованы алгоритмы обнаружения сигналов, основанные на пороговой обработке выходного сигнала. Решение о наличии сигнальной компоненты в принятой реализации (телевизионный кадр) принимается при превышении амплитудой отклика элемента разрешения фотокатода определенного порогового значения. При этом пространственное распределение интенсивности сигнальной компоненты в плоскости фотокатода считается известным и описывается непрерывной функцией [2]. Среднее значение фоновой компоненты считается постоянным по плоскости фотокатода.

Однако световой поток представляет собой результат множества квантовых переходов в веществе и является дискретным потоком частиц – фотонов, обладающим определенными статистическими свойствами. Реализованные в ОЭС алгоритмы обнаружения сигналов строятся на положениях волновой теории света и не учитывают корпускулярной структуры и статистических свойств принимаемого сигнала, которые, несомненно, должны быть учтены при оптимизации алгоритмов обнаружения сигналов.

**Цель работы.** Целью данной работы является разработка алгоритмов обнаружения сигналов в выходной плоскости ОЭС с учетом корпускулярных и статистических свойств принимаемых сигналов и получение аналитических выражений для оценки их эффективности.

**Постановка задачи.** Основой для разработки алгоритмов обнаружения может служить математическая модель, составленная на основе положений волновой теории света, корпускулярной теории света, статистической теории случайных потоков и устанавливающая связь между параметрами входных оптических сигналов с характеристиками сигналов в выходной плоскости ОЭС. Рассмотрим структуру сигналов в выходной плоскости ОЭС.

На вход ОЭС поступает аддитивная смесь сигнала от КО и фонового излучения. Сигнальную составляющую в силу удаленности наблюдаемого объекта (звезды) можно считать плоской электромагнитной волной. В силу дифракции света на входном отверстии изображение звезды в фокальной плоскости телескопа будет иметь вид яркого диска, окруженного системой концентрических колец, яркость которых быстро убывает от центра изображения к краям. Распределение интенсивности  $I$  световой волны с длиной  $\lambda$  в плоскости изображения телескопа, имеющего диаметр объектива  $D$  и фокусное расстояние  $f$  [2], представляет собой:

$$I(q) = a_0^2 \frac{\pi^2 D^4}{\lambda^2 4f^2} \left( \frac{J_1(q)}{q} \right)^2, \quad (1)$$

где  $a_0$  – амплитуда светового колебания на входном зрачке;  $J_1$  – функция Бесселя 1-го порядка первого рода;  $q \approx \frac{\pi D}{\lambda f} \rho$ ;  $\rho$  – расстояние от центра изображения.

Распределение имеет круговую симметрию, достигая максимума в центральном пятне. Центральное пятно называют пятном Эри, в нем концентрируется около 84 % всей энергии светового излучения, пришедшего от объекта.

Фотоприемники, используемые в реальных ОЭС телевизионного типа, имеют, как правило, прямоугольную форму и представляют собой матрицы прямоугольных светочувствительных элементов (элементов разрешения). Круглая форма дифракционного пятна не оптимально согласуется с прямоугольной формой элементов разрешения. Поэтому при построении ОЭС целесообразно использовать прямоугольную входную апертуру.

В этом случае распределение амплитуды светового возмущения в фокальной плоскости является дифракционной картиной Фраунгофера при дифракции на прямоугольном отверстии с размерами  $a$  и  $b$ . Это распределение также известно [3] и имеет вид:

$$E_{фк} \approx E_0 \frac{\sin \left[ c(u - u_0) \frac{a}{2} \right]}{c(u - u_0) \frac{a}{2}} \frac{\sin \left[ d(v - v_0) \frac{b}{2} \right]}{d(v - v_0) \frac{b}{2}}, \quad (2)$$

где  $u, v$  – координаты в плоскости фотоприемника;  $c, d$  – коэффициенты, отражающие параметры оптической системы.

Графическое представление выражения (2) приведено на рис. 1. Пространственное распределение интенсивности света в плоскости фотокатода получено с помощью волновой теории света.

Второй составляющей входного оптического воздействия на ОЭС является фоновое излучение. Оно формируется как результат рассеяния в атмосфере Земли, излучения Солнца, звезд и других космических объектов. Поэтому амплитуда фоновой составляющей является случайной величиной по времени и по пространству со средним значением, постоянным по входной апертуре, и, как следствие, по плоскости фотоприемника. При обнаружении сигнала от КО используются известные алгоритмы выделения

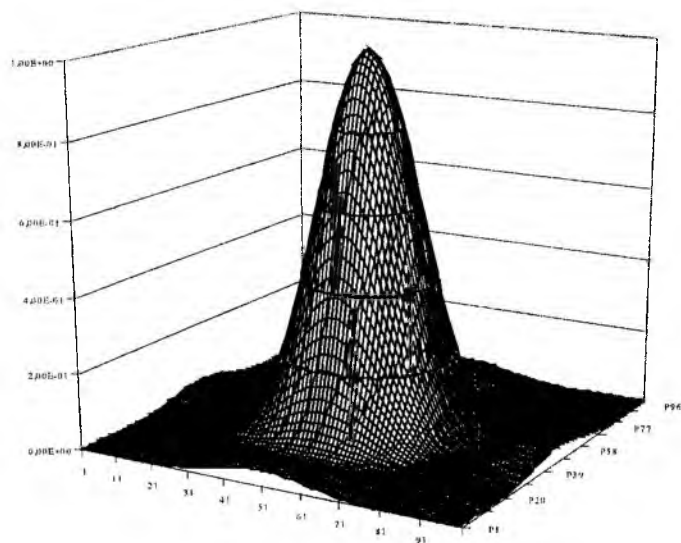


Рис. 1

сигнала известной формы из его аддитивной смеси со случайной помехой, имеющей известные статистические характеристики [4].

С точки зрения корпускулярной теории свет является случайным дискретным потоком частиц – фотонов. Каждый фотон характеризуется энергией  $E = h\nu$  ( $h$  – постоянная Планка,  $\nu$  – частота оптического излучения). Мощность светового излучения, регистрируемого светочувствительным элементом площадью  $S = \Delta u \Delta v$ , может быть выражена через число квантов в потоке:

$$P(\Delta u \Delta v) = N h \nu, \quad (3)$$

откуда  $N$  может быть выражено с учетом, что мощность пропорциональна квадрату модуля амплитуды волны как  $N \sim |E|^2$ , где  $N$  – скорость счета фотонов в единицу времени на единичной площади. Исходя из корпускулярных свойств световых потоков, очевидно, что про-

пространственные распределения интенсивностей сигнальной и фоновой составляющих в плоскости фотоприемника в конкретный момент времени  $t_0$  будут случайны. Реализации, полученные в каждом телевизионном кадре, имеют вид, отличный от рис. 1. Так, на рис. 2

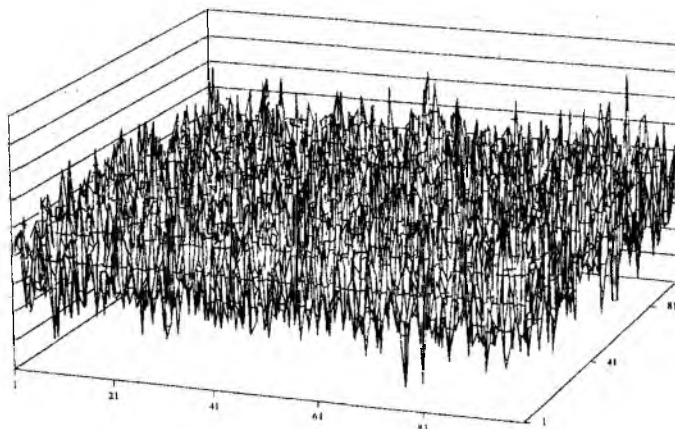


Рис. 2

приведен пример реализации фоновой составляющей, а на рис. 3 – пример реализации сигнальной компоненты, полученные путем численного моделирования фрагмента телевизионного кадра. Видно, что форма распределения интенсивности сигнальной составляющей далека от вида, приведенного на рис. 1. Это объясняется корпускулярной структурой оптического сигнала и наличием квантовых шумов сигнала, описанных, например, в [5].

Очевидно, что выражение (2), полученное с помощью волновой теории, описывает пространственное распределение среднего значения амплитуды сигнальной компоненты в плоскости фотокатода, достижимое лишь при бесконечно большом времени наблюдения. В реальных телевизионных системах время наблюдения ограничено и равно, как правило, стандартному времени накопления (длительности телевизионного кадра).

Известно, что закон распределения числа квантов от слабого некогерентного источника является пуассоновским [6]. Если при обнаружении использовать априорную информацию о форме сигнала, вытекающую из волновых представлений о структуре оптического излучения, то очевидно, что отличия формы сигнала от идеальной, вызванные корпускулярной структурой сигнала и описываемые статистическими законами, станут причиной ошибок обнаружения и отразятся на характеристиках обнаружения.

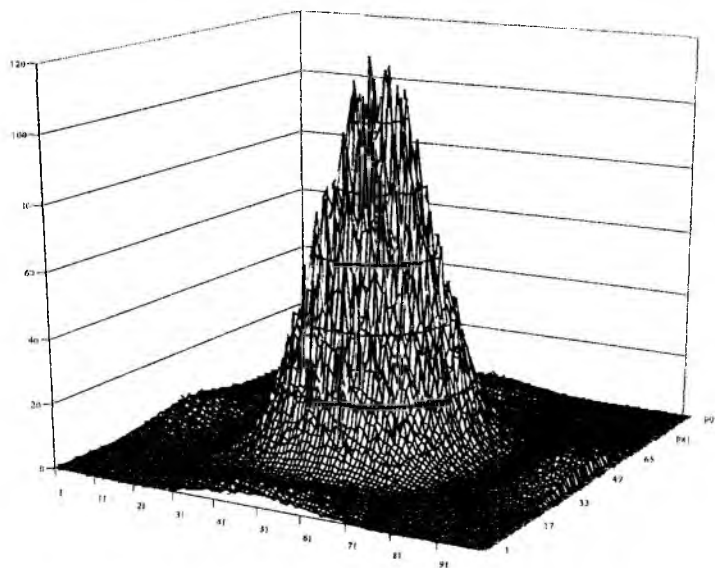


Рис. 3

С целью учета корпускулярных свойств светового потока требуется изменить алгоритмы обнаружения сигналов в выходной плоскости ОЭС. Таким образом возникает задача обнаружения случайного сигнала с известными статистическими характеристиками на фоне случайных помех. При этом статистические характеристики помехи также считаются известными.

**Разработка алгоритмов обнаружения и получение выражений для оценки их эффективности.** При разработке алгоритмов обнаружения будем использовать совместно положения волновой и корпускулярной теорий света. При этом будем считать, что волновое приближение позволяет получить среднее значение интенсивности светового потока в точке плоскости фотоприемника. Корпускулярные представления будем использовать для описания статистических свойств оптических сигналов. Воспользуемся методикой синтеза алгоритма обнаружения, описанной в [7].

Количество фотонов в световом потоке пропорционально квадрату модуля электрической составляющей электромагнитной волны. Фотокатод осуществляет преобразование потока фотонов в поток носителей зарядов  $N_C$ , число которых пропорционально количеству фотонов в световом потоке.

Кроме сигнального потока зарядов  $N_C$ , возникающих вследствие взаимодействия квантов оптического излучения от наблюдаемого объекта с веществом фотокатода, образуется помеховый поток носителей  $N_{II}$ , обусловленный воздействием квантов оптического излучения фона

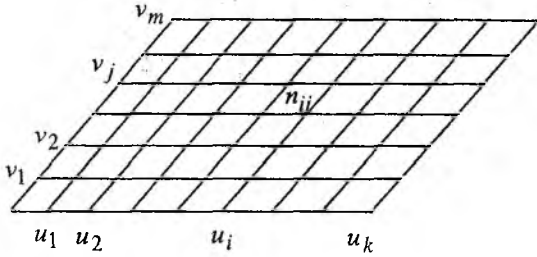


Рис. 4

и внутренними шумами фотоприемника. Элементы разрешения фотоприемника производят накопление потоков  $N_C$  и  $N_{II}$  за время накопления  $T_H$ .

Разобьем плоскость фотоприемника на элементарные области размером  $\Delta S_{ij} = (u_i - u_{i-1})(v_j - v_{j-1})$ , где  $i = 1, \dots, k$ ;  $j = 1, \dots, m$  (рис. 4). На каждую элементарную область  $\Delta S_{ij}$  за время накопления  $T_H$  приходится  $n_{ij}$  зарядов. Среднее значение числа зарядов в

случаях, когда в реализации присутствует только помеховая или только сигнальная составляющие, запишем как

$$\begin{aligned} \bar{n}_{ij} &= N_{II}(u, v) = N_{II} T_H \Delta S_{ij}, \\ \bar{n}_{ij} &= N_C(u, v) = N_C T_H \Delta S_{ij}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N_C$  и  $N_{II}$  – средние скорости счета соответственно сигнальных и помеховых зарядов в единицу времени на единичной площади.

Используя (2), можно записать выражение для пространственного распределения числа зарядов  $N_C$  по фотокатоду:

$$N_C(u, v) \approx N_{C_0} \left[ \frac{\sin\left(c(u - u_0) \frac{a}{2}\right)}{c(u - u_0) \frac{a}{2}} \right]^2 \left[ \frac{\sin\left(d(v - v_0) \frac{b}{2}\right)}{d(v - v_0) \frac{b}{2}} \right]^2, \quad (5)$$

где  $N_{C_0}$  – число зарядов, сформировавшееся под действием светового излучения интенсивностью  $|E_0|^2$ .

Так как потоки носителей заряда  $N_C$  и  $N_{II}$  имеют пуассоновскую статистику, то вероятность появления  $n_{ij}$  зарядов на площадке  $\Delta S_{ij}$  за время накопления  $T_H$

$$P(n_{ij}) = \frac{(\bar{n}_{ij})^{n_{ij}}}{n_{ij}!} \exp[-\bar{n}_{ij}]. \quad (6)$$

В случае, когда число зарядов  $n_{ij}$  обусловлено воздействием только помеховой составляющей, выражение (6) с учетом (4) примет вид:

$$P_{II}(n_{ij}) = \frac{(N_{II} T_H \Delta S_{ij})^{n_{ij}}}{n_{ij}!} \exp[-N_{II} T_H \Delta S_{ij}]. \quad (7)$$

Запишем многомерную плотность вероятности величин  $n_{ij}$  для помеховой составляющей:

$$P_{II}(\hat{n}) = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^m \frac{(N_{II} T_H \Delta S_{ij})^{n_{ij}}}{n_{ij}!} \exp[-N_{II} T_H \Delta S_{ij}]. \quad (8)$$

Многомерная плотность вероятности величин  $n_{ij}$  для аддитивной смеси помеховой и сигнальной составляющих определяется выражением:

$$P_{C+П}(\hat{n}) = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^m \frac{(T_n \Delta S_{ij} (N_C + N_{П}))^{n_{ij}}}{n_{ij}!} \exp[-N_{П} T_n \Delta S_{ij}]. \quad (9)$$

Используя выражения (8) и (9) запишем логарифм отношения правдоподобия для случая, когда

$$\frac{N_C}{N_{П}} \ll 1. \quad (10)$$

Это соответствует, например, сумеречным и дневным условиям наблюдения [8]. При условии (10) можно считать, что  $\ln\left(1 + \frac{N_C}{N_{П}}\right) \sim \frac{N_C}{N_{П}}$ . Тогда

$$\ln L = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \left[ n_{ij} \frac{N_C}{N_{П}} - N_C T_n \Delta S_{ij} \right]. \quad (11)$$

Подставляя в (11) значение  $N_C$  из (5), получим:

$$\ln L = \frac{N_{C0}}{N_{П}} Y(\hat{n}) - W_C. \quad (12)$$

В выражении (12) для краткости использованы следующие обозначения:

$$Y(\hat{n}) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m n_{ij} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0) \frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0) \frac{a}{2}} \right]^2 \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0) \frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0) \frac{b}{2}} \right]^2, \quad (13)$$

где  $\hat{n} = n_{1j}, n_{2j}, \dots, n_{kj}, n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{km}$  – принятая реализация;

$$W_C = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m N_{C0} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0) \frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0) \frac{a}{2}} \right]^2 \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0) \frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0) \frac{b}{2}} \right]^2 T_n \Delta S_{ij}. \quad (14)$$

Очевидно, что величина  $W_C$  пропорциональна энергии принимаемого сигнала.

Из выражения (12) следует, что логарифм отношения правдоподобия с точностью до констант определяется значением функции  $Y(\hat{n})$ . Следовательно, алгоритм обнаружения сигнала малой интенсивности в выходной плоскости телевизионной ОЭС можно представить в виде, приведенном на рис. 5.

Значения функции  $Y(\hat{n})$  являются случайной величиной и зависят от принятой реализации  $\hat{n}$ . Закон распределения, которому подчиняется величина  $Y(\hat{n})$ , из выражения (13) не очевиден. Хотя величины  $n_{ij}$ , входящие в (13), имеют пуассоновскую статистику,

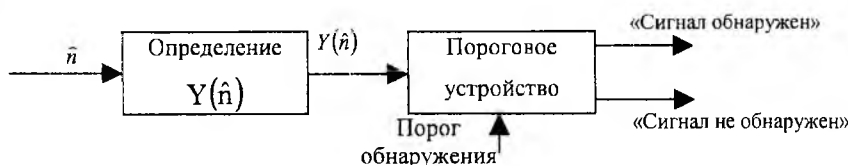


Рис. 5

сумма из  $k \cdot m$  слагаемых, каждое из которых является произведением независимых пуассоновских величин на различные коэффициенты, определенным образом зависящие от пространственных координат, очевидно не будет подчиняться закону Пуассона.

Однако, если  $k$  и  $m$  достаточно велики для выполнения условия  $\Delta S_{ij} \rightarrow 0$  (см. рис. 4), при больших значениях  $n_{ij}$ , в силу закона больших чисел, закон распределения величины  $Y(\hat{n})$  будет стремиться к нормальному закону.

В силу вышесказанного будем в первом приближении считать величину  $Y(\hat{n})$  распределенной по нормальному закону.

Для получения оценки эффективности предложенного алгоритма возможно воспользоваться критерием величины отношения сигнал/шум. Как известно из [4], этот критерий является универсальным при оценке эффективности обнаружения известного сигнала на фоне гауссовых помех. Запишем выражение для отношения сигнал/шум  $\varphi$  в виде, аналогичном приведенному в [2, 5, 6]:

$$\varphi = \frac{\bar{\alpha}}{\sqrt{D(\alpha)}}, \quad (15)$$

где  $\bar{\alpha}$  – среднее значение измеряемой величины  $\alpha$ ;  $D(\alpha)$  – дисперсия  $\alpha$ .

В нашем случае измеряемой величиной является значение функции  $Y(\hat{n})$ , определяемое выражением (13). Для вычисления величины отношения сигнал/шум (15) необходимо определить среднее значение  $\overline{Y(\hat{n})}$  и дисперсию  $D(Y(\hat{n}))$ . Поскольку информация о сигнальной компоненте содержится в ее аддитивной смеси с помехой, перед процедурой обнаружения необходимо центрировать помеховую составляющую. Тогда выражение (15) можно записать в виде:

$$\varphi = \frac{\overline{Y_{C+П}(\hat{n})} - \overline{Y_{П}(\hat{n})}}{\sqrt{D(Y_{C+П}(\hat{n})) + D(Y_{П}(\hat{n}))}}. \quad (16)$$

Вычислим величины, входящие в (16). Запишем выражение для среднего значения  $\overline{Y_{П}(\hat{n})}$ :

$$\overline{Y_{П}(\hat{n})} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m \overline{n_{ij}} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0)\frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0)\frac{a}{2}} \right]^2 \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0)\frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0)\frac{b}{2}} \right]^2. \quad (17)$$

Подставляя в (17) выражение (4) и учитывая, что линейный размер главного лепестка распределения интенсивности (5) значительно меньше линейного размера фотоприемника, и заменяя сумму интегралом в бесконечных пределах, получим выражение для среднего значения помехи:

$$\overline{Y_{П}(\hat{n})} = N_{П} T_{н} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0)\frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0)\frac{a}{2}} \right]^2 du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0)\frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0)\frac{b}{2}} \right]^2 dv \quad (18)$$

или после интегрирования:

$$\overline{Y_{П}(\hat{n})} = \frac{4\pi^2}{cadb} N_{П} T_{н}. \quad (19)$$

Выражение для дисперсии помеховой составляющей:

$$D(Y_{П}(\hat{n})) = N_{П} T_{н} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0)\frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0)\frac{a}{2}} \right]^2 du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0)\frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0)\frac{b}{2}} \right]^2 dv \quad (20)$$

или после интегрирования:

$$D(Y_{П}(\hat{n})) = \frac{16\pi^2}{9cadb} N_{П} T_{н}. \quad (21)$$

Аналогичные рассуждения проведем для определения среднего значения и дисперсии аддитивной смеси сигнала и помехи:

$$\begin{aligned} \overline{Y_{C+\Pi}(\hat{n})} &= N_{\Pi} T_H \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0)\frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0)\frac{a}{2}} \right]^2 du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0)\frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0)\frac{b}{2}} \right]^2 dv + \\ &+ N_{C_0} T_H \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0)\frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0)\frac{a}{2}} \right]^4 du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0)\frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0)\frac{b}{2}} \right]^4 dv = \frac{4\pi^2}{cdab} N_{\Pi} T_H + \frac{16\pi^2 T_H}{9cdab} N_{C_0} T_H, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} D(Y_{C+\Pi}(\hat{n})) &= N_{\Pi} T_H \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0)\frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0)\frac{a}{2}} \right]^2 du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0)\frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0)\frac{b}{2}} \right]^2 dv + \\ &+ N_{C_0} T_H \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c(u_i - u_0)\frac{a}{2}\right)}{c(u_i - u_0)\frac{a}{2}} \right]^6 du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d(v_j - v_0)\frac{b}{2}\right)}{d(v_j - v_0)\frac{b}{2}} \right]^6 dv = \frac{16\pi^2}{9cdab} N_{\Pi} T_H + \frac{121\pi^2 T_H}{100cdab} N_{C_0} T_H. \end{aligned} \quad (23)$$

Подставляя (19) и (21)-(23) в (16), получим:

$$\varphi = \frac{16\pi^2 T_H N_{C_0}}{9cdab \sqrt{\frac{121\pi^2}{100cdab} T_H N_{C_0} + 2 \frac{16\pi^2}{9cdab} T_H N_{\Pi}}} \quad (24)$$

**Выводы.** Разработанный алгоритм обнаружения сигналов в выходной плоскости ОЭС телевизионного типа составлен с учетом корпускулярной структуры оптического излучения и статистических характеристик светового потока.

Полученные аналитические выражения для среднего значения и дисперсии сигнальной и помеховой компонент позволяют оценить вероятностные характеристики обнаружения (условные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги) и величину отношения сигнал/шум. Однако решение задачи определения характеристик обнаружения, потенциальных точностей измерения параметров измеряемых сигналов и сравнения предложенного алгоритма с известными алгоритмами требует отдельного рассмотрения и является предметом дальнейших исследований.

**Список литературы:** 1. Стрелков А.И., Лытюга А.П. Влияние радиуса корреляции атмосферных неоднородностей на обнаружительную способность оптико-электронных станций телевизионного типа при наблюдении космических объектов // Системы обработки информации: Зб. наук. праць. Харків: ХВУ. 2002. Вип. 5(21). С. 270 – 276. 2. Москвитин С.В., Стрелков А.И. Теоретические основы оптической локации: МО Украины. Харьков. 1992. 208 с. 3. Прикладная оптика / Под ред. Заказова Н.П. М.: Машиностроение. 1988. 312 с. 4. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1968. Т. 2 503 с. 5. Стрелкова Т.А. Потенциальные возможности наблюдения биологических объектов оптико-электронными средствами // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 1999. Вып. 112. С. 87 – 90. 6. Гальярди Р., Карп Ш. Оптическая связь. М.: Связь. 1978. 424 с. 7. Стрелков А.И., Стрелкова Т.А., Лытюга А.П., Коротков В.В. Алгоритмы обнаружения сигналов в акустооптических анализаторах спектра // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.- техн. сб. 2003. Вып. 131. С. 37 – 43. 8. Стрелкова Т.А., Лытюга А.П. Оценка возможностей наблюдения низкоорбитальных космических объектов оптико-электронными средствами в дневное время // Тр. 7-й межд. конф. «Теория и техника передачи, приема и обработки информации». ХНУРЭ. Харьков. 2001. С. 82 – 83.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Харьковский военный университет

Поступила в редколлегию 23.04.2003