

УДК 535.22

## Алгоритмы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах мониторинга околоземного пространства

А. Б. Бельский, В. А. Сауткин

ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Россия

*Разработаны алгоритмы обнаружения сигналов в выходной плоскости оптико-электронной системы (ОЭС) с учетом корпускулярных и статистических свойств принимаемых сигналов. Получены аналитические выражения для оценки эффективности таких систем.*

PACS: 06.30.-k; 85.60.+q

### Введение

Современные ОЭС телевизионного типа нашли широкое применение для наблюдения разного рода космических объектов (КО). Это обусловлено 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 виде, удобном для последующей обработки.

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 др.).

Оптические сигналы, регистрируемые ОЭС, проходя через атмосферу Земли, частично поглощаются и рассеиваются, что приводит к мультипликативному искажению сигнала [1]. На качество функционирования ОЭС оказывает влияние также аддитивная помеховая составляющая, источниками которой 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

Разработка алгоритмов обнаружения сигналов в выходной плоскости ОЭС с учетом корпускулярных и статистических свойств принимаемых сигналов и получение аналитических выражений для оценки их эффективности являются целью данной работы.

### 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 звезд

ды 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 (1) 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 неоптимально 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

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

где  $u, v$  — координаты в плоскости фотоприемника;

$c, d$  — коэффициенты, отражающие параметры оптической системы.

Пространственное распределение интенсивности света в плоскости фотокатода получено с помощью волновой теории света.

Второй составляющей входного оптического воздействия на ОЭС является фоновое излучение, которое формируется как результат рассеяния в атмосфере Земли, излучения Солнца, звезд и других космических объектов. Поэтому амплитуда фоновой составляющей — это случайная величина

по времени и пространству со средним значением, постоянным по входной апертуре, и, как следствие, по плоскости фотоприемника. При обнаружении сигнала от КО используются известные алгоритмы выделения 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

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

Из выражения (3)  $N$  может быть вычислено с учетом того, 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 пространственные распределения интенсивностей сигнальной и фоновой составляющих в плоскости фотоприемника в конкретный момент времени  $t_0$  будут случайны. Это объясняется корпускулярной структурой оптического сигнала и наличием квантовых шумов сигнала. 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. 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.

Для учета корпускулярных свойств светового потока требуется изменить алгоритмы обнаружения сигналов в выходной плоскости ОЭС. Таким образом возникает задача обнаружения случайно-

го 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. 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  $N_F$ , обусловленный воздействием квантов оптического излучения фона и внутренними шумами фотоприемника. Элементы разрешения фотоприемника производят накопление потоков  $N_C$  и  $N_F$  за время накопления  $T_{AC}$ .

Разобьем плоскость фотоприемника на элементарные области размером  $\Delta S_{ij} = u_i - u_{i-1} \cdot v_j - v_{j-1}$ , где  $i = 1, K, k; j = 1, K, m$  (рис. 1). На каждую элементарную область  $\Delta S_{ij}$  за время накопления  $T_{AC}$  приходится  $n_{ij}$  зарядов. Среднее значение числа зарядов в случаях, когда в реализации присутствует только помеховая или только сигнальная составляющая, запишем как

$$\begin{aligned} \bar{n}_{ij} &= N_F \cdot u, v = N_F T_{AC} \Delta S_{ij}, \\ \bar{n}_{ij} &= N_C \cdot u, v = N_C T_{AC} \Delta S_{ij}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N_C$  и  $N_F$  — 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

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

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

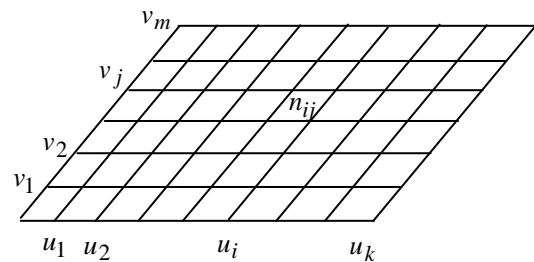


Рис. 1. Элементарные области плоскости фотоприемника

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

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

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

$$P_F \cdot n_{ij} = \frac{N_F T_{AC} \Delta S_{ij}^{n_{ij}}}{n_{ij}!} \exp[-N_F T_{AC} \Delta S_{ij}]. \quad (7)$$

С учетом (7) запишем многомерную плотность вероятности величин  $n_{ij}$  для помеховой составляющей

$$P_F \cdot \hat{n} = \prod_{i=1}^k \prod_{j=1}^m \frac{N_F T_{AC} \Delta S_{ij}^{n_{ij}}}{n_{ij}!} \exp[-N_F T_{AC} \Delta S_{ij}]. \quad (8)$$

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

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

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

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

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

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

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

$$\ln L = \frac{N_{C_0}}{N_F} Y \hat{n} - W_C. \quad (12)$$

В выражении (12) для краткости использованы следующие обозначения:

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

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

$$W_C = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m N_{C_0} \left[ \frac{\sin\left(c u_i - u_0 \frac{a}{2}\right)}{c u_i - u_0 \frac{a}{2}} \right]^2 \times \left[ \frac{\sin\left(d v_j - v_0 \frac{b}{2}\right)}{d v_j - v_0 \frac{b}{2}} \right]^2 T_{AC} \Delta S_{ij}. \quad (14)$$

Очевидно, что величина  $W_C$  (14) 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. 2.

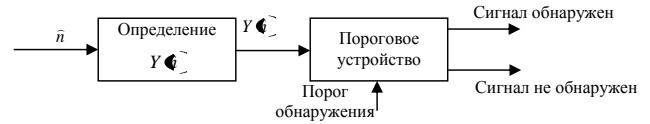


Рис. 2. Алгоритм обнаружения сигнала

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, 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  $\Delta S_{ij} \rightarrow 0$ , при больших значениях  $n_{ij}$  согласно закону 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  $\phi$  в виде, аналогичном приведенному в [2, 5]

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

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  $Y \hat{n}$  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

$$\varphi = \frac{\bar{Y}_{C+F} \hat{n} - \bar{Y}_F \hat{n}}{\sqrt{\text{Д } Y_{C+F} \hat{n} + \text{Д } Y_F \hat{n}}}. \quad (16)$$

Вычислим величины, входящие в (16). Запишем выражение для среднего значения  $\bar{Y}_F \hat{n}$ :

$$\begin{aligned} \bar{Y}_F \hat{n} = & \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m n_{ij} \left[ \frac{\sin\left(c u_i - u_0 \frac{a}{2}\right)}{c u_i - u_0 \frac{a}{2}} \right]^2 \times \\ & \times \left[ \frac{\sin\left(d v_j - v_0 \frac{b}{2}\right)}{d v_j - v_0 \frac{b}{2}} \right]^2. \end{aligned} \quad (17)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{Y}_F \hat{n} = & N_F T_{AC} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c u_i - u_0 \frac{a}{2}\right)}{c u_i - u_0 \frac{a}{2}} \right]^2 \times \\ & \times du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d v_j - v_0 \frac{b}{2}\right)}{d v_j - v_0 \frac{b}{2}} \right]^2 dv \end{aligned} \quad (18)$$

или после интегрирования (18):

$$\bar{Y}_F \hat{n} = \frac{4\pi^2}{cadb} N_F T_{AC}. \quad (19)$$

Выражение для дисперсии помеховой составляющей будет

$$\begin{aligned} \text{Д } Y_F \hat{n} = & N_F T_{AC} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c u_i - u_0 \frac{a}{2}\right)}{c u_i - u_0 \frac{a}{2}} \right]^2 \times \\ & \times du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d v_j - v_0 \frac{b}{2}\right)}{d v_j - v_0 \frac{b}{2}} \right]^2 dv \end{aligned} \quad (20)$$

или после интегрирования (20):

$$\text{Д } Y_F \hat{n} = \frac{16\pi^2}{9cadb} N_F T_{AC}. \quad (21)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{C+F} \hat{n} = & N_F T_{AC} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c u_i - u_0 \frac{a}{2}\right)}{c u_i - u_0 \frac{a}{2}} \right]^2 \times \\ & \times du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d v_j - v_0 \frac{b}{2}\right)}{d v_j - v_0 \frac{b}{2}} \right]^2 dv + N_{C_0} T_{AC} \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(c u_i - u_0 \frac{a}{2}\right)}{c u_i - u_0 \frac{a}{2}} \right]^4 du \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\sin\left(d v_j - v_0 \frac{b}{2}\right)}{d v_j - v_0 \frac{b}{2}} \right]^4 \times \\ & \times dv = \frac{4\pi^2}{cadb} N_F T_{AC} + \frac{16\pi^2 T_{AC}}{9cadb} N_{C_0} T_{AC}; \end{aligned} \quad (22)$$

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

Подставляя (19) и (21)—(23) в (16), получим

$$\varphi = \frac{16\pi^2 T_{AC} N_{C_0}}{9cadb \sqrt{\frac{121\pi^2}{100cadb} T_{AC} N_{C_0} + 2 \frac{16\pi^2}{9cadb} T_{AC} N_F}}. \quad (24)$$

### Заключение

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.

*Авторы признательны д-ру техн. наук*

*А. И. Стрелкову (г. Харьков, Украина) за полезные*

*обсуждения подходов к данной проблеме и способов их практической реализации, в ходе которых определены практические направления изложенных теоретических исследований.*

#### Литература

1. Москвитин С. В., Стрелков А. И. Теоретические основы оптической локации. — МО Украины, г. Харьков, 1992.
2. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. — М.: Сов. радио, 1968. Т. 2.
3. Гальярди Р., Карп Ш. Оптическая связь. — М.: Связь, 1978.
4. 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.
5. Прикладная оптика/Под ред. Н. П. Закашова. — М.: Машиностроение, 1988.

*Статья поступила в редакцию 19 июня 2008 г.*

## Algorithms of detection of signals in optical-electronic systems for monitoring the circumterrestrial space

*A. B. Belsky, V. A. Sautkin*

*Zverev's Krasnogorsk Factory, Krasnogorsk, Russia*

*Developed are algorithms of detection of signals in a target plane of optical-electronic system in view of corpuscular and statistical properties of accepted signals. Analytical expressions for estimation of efficiency for such systems are received.*

PACS: 06.30.-k; 85.60.+q

УДК 537.533.35;535.37;535.08

## Проблема идентификации параметров прямозонных полупроводников по зависимости интенсивности монохроматической катодолюминесценции от энергии электронов пучка

*А. Н. Поляков, М. А. Степович, Е. Н. Лапишинова*

*Калужский государственный педагогический университет им. К. Э. Циолковского, г. Калуга, Россия*

*Ю. Е. Гагарин*

*Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, г. Калуга, Россия*

*Н. Н. Михеев*

*Научно-исследовательский центр "Космическое материаловедение" Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, г. Калуга, Россия*

*Рассмотрена проблема идентификации параметров прямозонных полупроводников при использовании зависимости интенсивности монохроматической катодолюминесценции от энергии электронов пучка и реализации низкого уровня возбуждения сигнала. Показано, что реализация метода наименьших квадратов приводит к системе нелинейных алгебраических уравнений, решение которой существенно зависит от выбора начального приближения. С учетом этого определены некоторые условия корректной обработки экспериментальных данных для идентификации искомых параметров полупроводников.*

PACS: 85.60.-q