

УДК 621.379.7

Потенциальная дальность обнаружения «точечного» сигнала оптико-электронной системой с матричным фотоприемником

Potential detection range of a “point” signal by an optical-electronic system with a matrix photodetector

Рогачев / Rogachev V.

Виктор Алексеевич

(rogachevv50@gmail.com)

кандидат технических наук.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

имени А. Ф. Можайского» МО РФ,

старший научный сотрудник Военного института

(научно-исследовательского).

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: обнаружение – detection; обобщенное отношение сигнал/шум – generalized signal-to-noise ratio; идеальный фотоприемник – ideal photodetector; потенциальная дальность обнаружения – potential detection range.

Рассмотрено понятие дальности обнаружения для пассивных оптико-электронных систем. Получено выражение потенциальной дальности обнаружения для идеального фотоприемника. Показано, что для приближения к потенциальной дальности необходимо основываться на обобщенном отношении сигнал/шум, которое учитывает как сигнал, так и связанные с ним сигнальные шумы.

The concept of detection range for passive optoelectronic systems is considered. An expression of the potential detection range for an ideal photodetector is obtained. It is shown that in order to approach the potential range, it is necessary to base on a generalized signal-to-noise ratio, which takes into account both the signal and the associated signal noises.

Постановка задачи

Введение основополагающего понятия «потенциальная помехоустойчивость» в существенной мере позволило определить и оценить предельные характеристики синтезируемых систем, а также в какой-то мере и области их применения [1].

Если понятие «потенциальная» – предельная – достаточно очевидно, то понятие «помехоустойчивость» – поддержание высокого качества характеристик системы в условиях помех – в силу своей общности требует конкретизации для оптико-электронных систем (ОЭС).

ОЭС можно разделить на два важнейших класса: активные [2, 3] и пассивные системы [4, 5].

Для пассивных ОЭС одним из основных параметров является потенциальная чувствительность или пороговый сигнал (энергия, эквивалентная шуму – Noise Equivalent Power) [3–12].

Однако данная характеристика лишь косвенно отражает принципиально важнейшую характеристику ОЭС – дальность обнаружения.

Необходимо отметить, что обнаружение является одной из основных задач наблюдения – различения ОЭС: обнаружение, распознавание и идентификация [4–6, 13–17].

Вторым, менее заметным, но не менее глобальным понятием, явилось понятие «идеальный приемник» [1]. Для ОЭС это понятие реализуется в виде «идеального фотоприемника», в котором отсутствуют внутренние помехи – темновой ток и темновые шумы, а также неравномерность чувствительности фотоприемника (ФП) [5, 6, 18, 19].

Глобальный параметр пассивных ОЭС – дальность обнаружения, осложняется следующими основными факторами: неизвестная амплитуда, форма и положение сигнала, а также неизвестный фон. Расстояние между объектом наблюдения и ОЭС с матричным ФП можно разбить на 3 зоны (дистанции) [5, 17]:

- дальняя зона, при этом сигнал объекта наблюдается в виде «точечного» сигнала (обнаружение);
- средняя зона, при этом сигнал объекта занимает некоторое количество соседних элементов ФП (распознавание);
- ближняя зона, при этом сигнал объекта занимает все элементы (взаимодействие).

Для решения задач обнаружения важнейшей зоной, естественно, является дальняя зона.

В данной работе рассмотрим и уточним понятие потенциальной дальности обнаружения пассивных ОЭС.

Математическая модель «идеального» фотоприемника

Основные свойства реальных ФП выражаются через различные характеристики и параметры [18, 19].

Математическая модель ФП может в различной мере отражать те или иные его свойства, например темновую помеху (фон и шумы), неравномерность чувствительности и т. д. [19–21].

Будем считать тот ФП «идеальным», в котором отсутствуют темновые помехи, а также неравномерность чувствительности.

Фотоны излучения, весьма сложным образом взаимодействуя с ФП, создают на его выходе поток фотоэлектронов. В зависимости от параметров излучения и характеристик ФП, а также их соотношений, возможны различные виды распределений случайного потока фотоэлектронов, например [22–24]:

- Бозе-Эйнштейна,
- гамма (Эрланга),
- отрицательно-биномиальное (Паскаля),
- Пуассона.

Для всех распределений дисперсию потока фотоэлектронов можно представить в виде суммы двух составляющих [23, 24]:

$$\sigma^2 = \sigma_p^2 + \sigma_c^2,$$

где σ_p^2 – дисперсия преобразования фотонов в фотоэлектроны (дисперсия потока Пуассона с постоянной интенсивностью), а σ_c^2 – дисперсия потока излучения (классическая).

Соотношение дисперсий характеризуется параметром вырождения, при этом, если этот параметр стремится к нулю, то распределение фотоэлектронов приближается к распределению Пуассона [23, 24].

Для пассивных ОЭС при длинах волн, соответствующих ультрафиолетовому, видимому и инфракрасному диапазонам и температуре наблюдаемого объекта не более температуры Солнца, параметр вырождения много меньше единицы (в диапазоне около 10^{-3} – 10^{-10}), следовательно, распределение потока фотоэлектронов с весьма большой точностью соответствует распределению Пуассона [23, 24].

При этом дисперсия шумов потока фотоэлектронов имеет минимальное значение, что соответственно позволяет достичь максимального отношения сигнал/шум.

Далее при увеличении количества фотоэлектронов (более 10–50) их распределение можно аппроксимировать распределением Гаусса [25, 26]. Соответственно, распределение Гаусса для рассматриваемой модели имеет математическое ожидание и дисперсию, равные по величине.

Выходной сигнал ФП содержит фоновую помеху, а появление полезного сигнала вызывает увеличение как математического ожидания исследуемого распределения, так и его дисперсии.

Распределение выходного сигнала будет описываться нормальным распределением следующего вида:

$$x_{out} \sim N(b, b), y_{out} \sim N(b + s, b + s),$$

где b – математическое ожидание фона и соответствующая ему дисперсия, s – сигнал и соответствующая ему дисперсия.

Для этой модели «идеального» ФП шумы предельно минимальны, поскольку определяются только внешним фоном.

Достаточные статистики для этой модели определяются на основе критерия факторизации следующим образом [27–29]:

$$w = \sum_{i=0}^M x_i^2, v = \sum_{j=0}^N y_j^2,$$

где w – достаточная статистика для фона, v – достаточная статистика для суммы фона и сигнала.

Статистика v , содержащая информацию о фоне и сигнале, имеет нецентральное гамма-распределение с плотностью [28, 29]

$$p(v) = [2(b+s)]^{-N/2} \exp\{-[N(b+s)^2 + v]\} / [2(b+s)] \} v^{N/2} \sum_{n=0}^{\infty} [(Nv)^n] / [n! \Gamma\{N/2 + n\}],$$

где $\Gamma\{*\}$ – гамма-функция.

На основе этой математической модели, обладающей достаточной простотой и адекватностью, определим потенциально наилучшие характеристики ОЭС.

Дальность обнаружения ОЭС

Появление полезного сигнала вызывает изменение параметров распределения. Для рассматриваемой модели изменяются оба параметра, как математическое ожидание, так и дисперсия.

При этом в данной задаче присутствует мешающий параметр – фон, что приводит к необходимости вычисления контраста между областью, содержащей сигнал и фон, и фоновой областью. Задачи такого типа называются «двухвыборочными» задачами проверки гипотез [12, 14, 28, 29].

С учетом двухвыборочной модели гипотезы обнаружения могут быть сформулированы следующим образом:

$$H_0 : x_b \sim N(b, b), y_s \sim N(b, b),$$

$$H_1 : x_b \sim N(b, b), y_s \sim N(b + s, b + s),$$

где H_0 – гипотеза об отсутствии сигнала, H_1 – гипотеза о наличии сигнала, x_b – сигнал фоновой области, y_s – сигнал сигнальной области.

Среди набора режимов в общей классификации режимов работы ОЭС рассматриваемая модель попадает в режим «ограничения фоновым шумом» или «инфракрасный фотоприёмник, ограниченный фоном» – (Background limited infrared photodetector, BLIP) [6, 15, 25]. Этот режим является одним из предельных состояний (режимов) ОЭС и соответствует идеальному ФП [28].

Решение задачи обнаружения сигнала на основе применения достаточных статистик и принципа инвариантности приводит к необходимости сравнения решающей статистики с пороговым уровнем [14, 27–29].

В данном режиме решающая статистика, вычисляющая контраст между сигнальной и фоновой областью, определяется как отношение квадратичных статистик (сигнальной к фоновой) [28]:

$$q = [v / N] / [w / M] = [\sum_{j=0}^N y_j^2 / N] / [\sum_{i=0}^M x_i^2 / M].$$

Эта статистика имеет дважды нецентральное распределение Фишера [27–29]:

$$p(q) = 2b^{-M/2} [2(b+s)]^{-N/2} \exp\{-[N(b+s) + Mb] / 2\} q^{N/2-1} \sum_{n=0}^{\infty} (N\varphi_q / 4)^n / n! \sum_{m=0}^{\infty} (M/4)^m / m! B\{N/2+n, M/2+m\},$$

где $\varphi_q = [(b+s)^2 + (b+s)] / [b^2 + b]$ – параметр распределения, $B\{\ast\}$ – бета-функция.

При этом пороговый уровень определяется из распределения статистики q при отсутствии сигнала [27–29].

Вероятность правильного обнаружения полностью определяется обобщенным отношением сигнал/шум [12]. Зависимость вероятности правильного обнаружения от обобщенного отношения сигнал/шум в данном случае является существенно нелинейной и не выражается в элементарных функциях. Поэтому рассматриваем обобщенное отношение сигнал/шум, монотонно связанное с вероятностью правильного обнаружения [12]:

$$\varphi_q = [(b+s)^2 + (b+s)] / [b^2 + b].$$

Используя это квадратичное уравнение, определим в явном виде пороговый сигнал, при этом положив амплитуду сигнала равной стандартному отклонению шума:

$$[(b+s)^2 + (b+s)] / [b^2 + b] = 2.$$

Отсюда в общем виде пороговый сигнал равен:

$$s = [-(2b+1) + (8b(b+1)+1)^{1/2}] / 2.$$

При относительно больших уровнях фона $b \gg 1$, пороговый сигнал для идеального ФП будет иметь достаточно простой вид:

$$s \approx 0,4b.$$

Выходной сигнал связан с дальностью обнаруживаемого объекта следующим уравнением дальности [5–7, 10–16]:

$$s = K / L^2.$$

где s – выходной сигнал, L – дальность до обнаруживаемого объекта, K – совокупный коэффициент, зависящий от мощности излучения, падающей на фотоприемник, характеристик оптической системы и многих других параметров.

Учитывая выражение порогового сигнала, получим потенциальную дальность обнаружения:

$$L_b^0 = [K / s_b]^{1/2} = [K / (0,4b)]^{1/2}.$$

Это выражение характеризует свойство ОЭС по обнаружению пороговых сигналов и служит ориентиром при синтезе систем, при этом дальность обратно пропорциональна уровню фона и уменьшается при его увеличении.

Анализ полученных результатов

Уравнение потенциальной дальности обнаружения ОЭС определяет предел дальности и, соответственно, уровень, к которому необходимо стремиться разработчикам ОЭС.

Этот предел определяется для идеального ФП при отсутствии внутренних помех.

Для приближения к потенциальной дальности необходимо использовать обобщенное отношение сигнал/шум, которое учитывает как сигнал, так и связанные с ним сигнальные шумы.

При потенциальной дальности сигнал с учетом всех его составляющих достигает своего порогового значения и равен среднеквадратическому отклонению фона.

Сравним дальности обнаружения сигналов для различных режимов работы ОЭС, используя при этом выражения пороговых сигналов [21]. Полученные данные сведем в общую таблицу 1. Здесь L_d^0 – дальность в режиме ограничения темновым шумом (РОТШ), L_s^0 – дальность в режиме ограничения сигнальным шумом (РОСШ), L_b^0 – дальность в режиме ограничения фоновым шумом (РОФШ – идеальный ФП), L_g^0 – дальность в режиме ограничения общим шумом (РООШ).

Выражения уравнений дальности для всех режимов имеют схожую структуру: в числителе – совокупный коэффициент, а в знаменателе – функция, зависящая только от фона/помехи. Однако для разных режимов зависимость от фона имеет различный вид.

Для оценки степени зависимости дальности обнаружения от фона выразим их в графическом виде (рис. 1).

Таблица 1

Дальность обнаружения в различных режимах работы ОЭС

№	Режим	Дальность обнаружения
1	РОТШ	$L_d^0 = [K / \sqrt{\sigma^2}]^{1/2}$
2	РОСШ	$L_s^0 = [K / b]^{1/2}$
3	РОФШ	$L_b^0 = [K / 0,4 b]^{1/2}$
4	РООШ	$L_g^0 = [K / \sqrt{(\sigma^2 + b)}]^{1/2}$

Дальность обнаружения для разных режимов: снизу вверх (b>1): Lg, Ls, Ld, Lb - A1

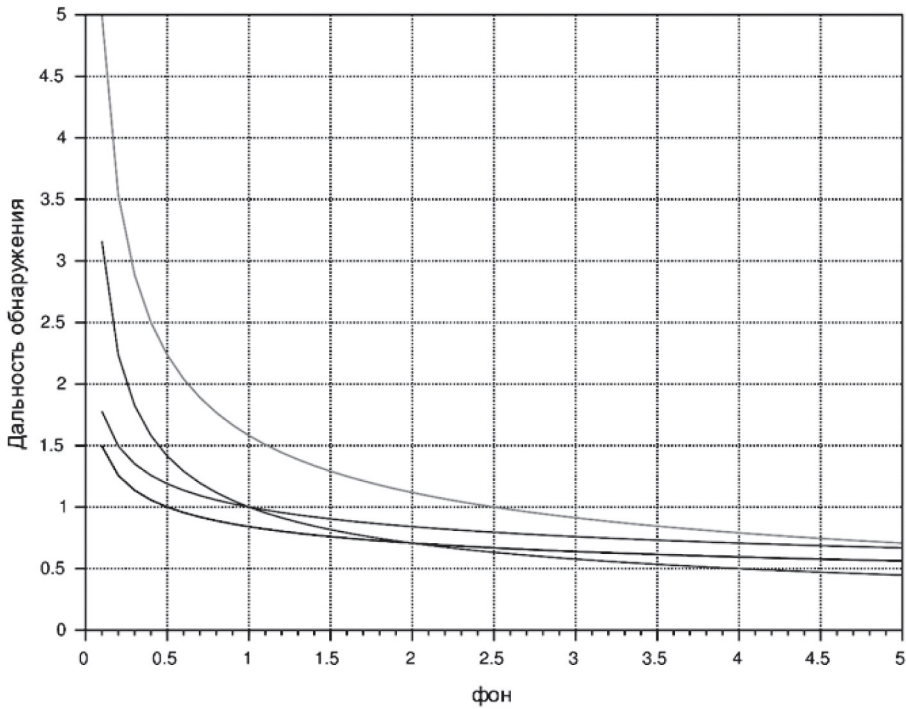


Рис. 1. Потенциальная дальность обнаружения для различных режимов (слева снизу вверх: L_g^0 , L_s^0 , L_d^0 , L_b^0 – в относительных единицах)

Графики показывают общее снижение дальностей обнаружения при увеличении уровня фона.

При этом потенциальная дальность, достигаемая при учете как сигнала, так и сигнальных шумов, примерно в 1,5 раза больше дальности при их раздельном учете. Увеличение уровня фона снижает дальность обнаружения, а также различие в дальности обнаружения между режимами.

Таким образом, при синтезе ОЭС обнаружения для достижения предельных характеристик необходимо основываться на обобщенном отношении сигнал/шум, которое учитывает как сигнал, так и связанные с ним сигнальные шумы.

Достижение предельных характеристик требует повышения вычислительных затрат, поскольку в отличие от режима ограничения темновым шумом, где статистика линейна, для вычисления решающей статистики необходимо вычислять квадратичные статистики.

Заключение

Получено выражение уравнения дальности, определяющее потенциальную дальность обнаружения для пассивных ОЭС. Это максимально возможная дальность обнаружения для ОЭС, имеющей идеальный фотоприемник, при полном отсутствии собственных помех. Уравнение дальности получено на основе обобщенного отношения сигнал/шум, учитывающего в качестве полезного эффекта как сигнал, так и связанные с ним сигнальные шумы. Достижение предельных характеристик требует повышения вычислительных затрат, поскольку для вычисления решающей статистики необходимо вычислять квадратичные статистики.

Потенциальная дальность обнаружения примерно в 1,5 раза больше дальности обнаружения для других режимов ОЭС (при раздельном учете или сигнала, или сигнальных шумов) в зависимости от уровня фона. При повышении уровня фона дальность обнаружения снижается, а различие в дальности обнаружения в различных режимах работы ОЭС уменьшается.

Интересным аспектом данной задачи остается определение времени и вычислительных затрат для квадратичной решающей статистики, а также условий, при которых возможны такие вычисления, что может послужить направлением для дальнейших исследований.

Литература

1. Котельников, В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости / В.А. Котельников. – Москва : Государственное энергетическое издательство, 1956. – 153 с.
2. Обнаружение и координатометрия оптико-электронных средств, оценка параметров их сигналов / Ю.Л. Козирацкий, А.И. Гревцев, А.А. Донцов [и др.]. – Москва : Радиотехника, 2015. – 456 с.

3. Мальцев, Г. Н. Потенциальные характеристики оптико-электронных систем сбора информации / Г.Н. Мальцев // Информационно-управляющие системы. – 2004. – № 3. – С. 17–21.

4. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации / А.К. Цыцулин, Д.Ю. Адамов, А.А. Манцевов, И.А. Зубакин. – Санкт-Петербург : Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 234 с.

5. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М.М. Мирошников. – Санкт-Петербург : Лань, 2010. – 704 с.

6. Хадсон, Р. Инфракрасные системы / Р. Хадсон. – Москва : Мир, 1972. – 536 с.

7. Фантиков, О. И. Потенциальная чувствительность телевизионных камер на матричных фоторезистивных приемниках / О.И. Фантиков // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. – 1980. – Вып. 4. – С. 3–13.

8. Пороговые характеристики обнаружения прецизионных оптико-электронных систем / А.К. Цыцулин, В.А. Рогачев, А.А. Каменев [и др.] // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2018. – № 4. – С. 49–58.

9. Формозов, Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства видимого и инфракрасного диапазонов / Б.Н. Формозов. – Санкт-Петербург : СПбГУАП, ВГТУ «Военмех», 2004. – 130 с.

10. Иванов, В. Г. Применение широкоформатных инфракрасных матричных фотоприемных устройств в оптико-электронных средствах наблюдения за космической обстановкой / В.Г. Иванов, А.А. Каменев. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – 227 с.

11. Специфика прецизионных телевизионных систем обнаружения / В.Н. Малышев, В.А. Рогачев, А.К. Цыцулин, А.И. Бобровский // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2018. – Т. 1. – С. 110–113.

12. Рогачев, В. А. Информационный контраст сигнала фотоприемника / В.А. Рогачев // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2022. – № 3. – С. 69–84.

13. Тымкул, В. М. Оптико-электронные приборы и системы / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул. – Новосибирск : СГТА, 2015. – 215 с.

14. Теория обнаружения сигналов / под ред. П.А. Бакута. – Москва : Радио и связь, 1984. – 440 с.

15. Белоусов, Ю. И. Инфракрасная фотоника : в 3 ч. / Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2019. – 3 ч.

16. Якушенков, Ю. Г. Основы оптико-электронного приборостроения / Ю.Г. Якушенков. – Москва : Логос, 2020. – 376 с.

17. Цыцулин, А. К. Синтез космической видеоинформационной системы при широком диапазоне изменения дальности до объекта / А.К. Цыцулин, А.И. Бобровский, А.В. Морозов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2020. – № 2. – С. 19–37.

18. Ишанин, Г. Г. Приемники оптического излучения / Г.Г. Ишанин, В.П. Челибанов. – Санкт-Петербург : Лань, 2014. – 303 с.



19. ГОСТ Р 59605–2021. Оптика и фотоника. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 42 с.
20. Введение в математическое моделирование / под ред. П.В. Трусова. – Москва : Логос, 2005. – 440 с.
21. Рогачев, В. А. Классификация режимов работы фотоприемников в системах локации / В.А. Рогачев // Инфокоммуникационные технологии. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 42–46.
22. Курикша, А. А. Квантовая оптика и оптическая локация / А.А. Курикша. – Москва : Советское радио, 1973. – 134 с.
23. Гудмен, Дж. Статистическая оптика / Дж. Гудмен. – Москва : Мир, 1988. – 528 с.
24. Мандель, Л. Оптическая когерентность и квантовая оптика / Л. Мандель, Э. Вольф. – Москва : Физматлит, 2000. – 896 с.
25. Хромов, Л. И. Теория информации и теория познания / Л.И. Хромов. – Санкт-Петербург : Издательство РФО, 2021. – 310 с.
26. Рогачев, В. А. Проверка нормальности распределения темного тока фотоприемника / В.А. Рогачев // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2022. – № 4. – С. 71–78.
27. Леман, Э. Проверка статистических гипотез / Леман Э. – Москва : Наука, 1979. – 406 с.
28. Рогачев, В. А. Выделение сигналов в ТВ системе на матричном фотоприемнике с чувствительностью, лимитированной флуктуациями фона / В.А. Рогачев // Техника средств связи. Серия: Техника телевидения. – 1989. – № 4. – С. 83–89.
29. Барра, Ж.-Р. Основные понятия математической статистики / Ж.-Р. Барра. – Москва : Мир, 1974. – 282 с.