

Влияние неравномерности чувствительности фотоприемника при оценивании характеристик обнаружения оптико-электронных систем

А. А. Закутаев, В. А. Рогачев

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

Аннотация: Показано, что существующие способы не обеспечивают компенсации влияния неравномерности чувствительности фотоприемника (НЧФ). Приведены результаты расчетов влияния НЧФ на вероятностные и пороговые характеристики обнаружения. Определена зависимость величины разброса значений максимальной дальности обнаружения от НЧФ.

Ключевые слова: оптико-электронная система, неравномерность чувствительности фотоприемника, дальность обнаружения.

Введение

Одной из важнейших характеристик бортовых исследовательских систем наблюдения является дальность обнаружения [1].

Фотоприемники различного класса [2] вносят дополнительные помехи в процесс обнаружения, как аддитивные, так и мультипликативные. В отличие от аддитивных шумов НЧФ является мультипликативной помехой [3]. Следовательно, оценивание степени ее влияния на характеристики оптико-электронных систем (ОЭС) и разработка способов ее компенсации по сравнению с аддитивными шумами является более сложной задачей.

В ОЭС визуализации неравномерность выходного сигнала достаточно хорошо корректируется (компенсируется) [4-7]. Для компенсации влияния НЧФ предложено большое количество методов, хотя на практике в основном применяется двухточечный метод [4].

Вместе с тем, в работах [8] и [9] было показано, что при обнаружении НЧФ ухудшает пороговую чувствительность фотоприемных устройств (ФПУ), а её компенсация не приводит к повышению характеристики ОЭС. Таким образом, оценивание влияния НЧФ на характеристики обнаружения ОЭС является актуальной задачей.

Оценка неравномерности чувствительности фотоприемника

Согласно стандарта (ГОСТ 28953-91. Приборы фоточувствительные с переносом заряда. Методы измерения параметров.) относительная неравномерность выходного сигнала ФПУ оценивается следующим образом:

$$\Delta = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min}),$$

где U_{\max} и U_{\min} – максимальное и минимальное значения сигналов отдельных элементов ФПУ, соответственно.

Причиной неравномерности, как правило, является разброс технологических параметров при изготовлении фотоприемника. Значение относительного коэффициент чувствительности i -того элемента ФПУ γ_i может быть рассчитано по формуле

$$\gamma_i = U_i / U_{\min}$$

Тогда выходной сигнал одного элемента ФПУ может быть описан следующим выражением:

$$i_k = \gamma_k s + d + \xi_d,$$

где i_k – выходной сигнал k элемента ФПУ; s – полезный сигнал; γ_k – коэффициент чувствительности k элемента ФПУ; d – темновой ток; ξ_d – темновые шумы.

При традиционной аппроксимации нормальным распределением, выходной сигнал ФПУ имеет вид:

$$i_k \in N(\gamma_k s + d, \sigma^2),$$

где $\gamma_k s + d$ – математическое ожидание; σ^2 – дисперсия.

Для оценки темнового тока перекрывают световой поток с помощью заглушки, а потом вычитают оцененное из входного сигнала, при этом дисперсия оценки должна быть много меньше дисперсии выходного сигнала.

Дисперсия выходного сигнала также может быть оценена с необходимой точностью, поэтому считаем ее значение известным.

После этого, преобразованный сигнал будет равен:

$$i_k^{-d} \in N(\gamma_k s, \sigma^2).$$

Вычисление оценки математического ожидания для преобразованного сигнала даст следующий результат [10]:

$$E\{i_k^{-d}\} = \gamma_k s,$$

где $E\{*\}$ – математическое ожидание.

В данном случае оценка является смещенной и смещение равно

$$\gamma_k s - s = (\gamma_k - 1)s.$$

Для того чтобы устранить смещение, необходимо провести следующий этап – оценить коэффициенты чувствительности для всех элементов ФПУ. Как правило, эта оценка производится при равномерной засветке ФПУ в середине светового диапазона, таким образом, чтобы ее дисперсия была много меньше дисперсии выходного сигнала ФПУ. Компенсация НЧФ производится умножением каждого элемента ФПУ на величину обратную его чувствительности. При этом, математическое ожидание оценки становится равным значению сигнала и, следовательно, оценка несмещенная:

$$E\{i_k^{-d,1/\gamma}\} = s.$$

Однако, при этом, эффективность оценки, т.е. минимально достижимая граница изменяется и для каждого элемента ФПУ она имеет свое значение [10]:

$$D\{i_k^{-d,1/\gamma}\} = \sigma^2 / \gamma_k^2.$$

Таким образом, влияние НЧФ переносится с математического ожидания на дисперсию.

Вычисление вероятности правильного обнаружения

Сначала определим вероятность обнаружения полезного сигнала (ВПО) без учета НЧФ, задав уровень вероятности ложной тревоги (ВЛТ) при $s=0$ [11]:

$$\alpha = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\lambda} \exp\{-t^2/(2\sigma^2)\} dt = \Phi\{\lambda^1/\sigma\},$$

где λ^1 – пороговый уровень.

С учетом этого вероятность правильного обнаружения равна [11]:

$$\beta = 1 - 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\lambda^1} \exp\{-(t-s)^2/(2\sigma^2)\} dt = 1 - \Phi\{(\lambda^1 - s)/\sigma\},$$

где $\Phi\{*\}$ – стандартный нормальный интеграл [12].

В этом случае пороговый уровень равен:

$$\lambda^1 = \sigma\Phi^{-1}\{\alpha\},$$

где $\Phi^{-1}\{*\}$ – функция, обратная нормальному интегралу [12].

При этом ВПО будет равна:

$$\beta = 1 - \Phi\{(\sigma\Phi^{-1}\{\alpha\} - s)/\sigma\} = 1 - \Phi\{\Phi^{-1}\{\alpha\} - s/\sigma\},$$

и полностью определяется отношением сигнал/шум.

Выражения для определения ВЛТ, порогового уровня и ВПО с учетом НЧФ приведены в таблице 1.

Таблица № 1

Выражения для определения ВЛТ, порогового уровня и ВПО с учетом НЧФ

Без компенсации НЧФ	
ВЛТ	$\alpha = 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\lambda^1} \exp\{-t^2/(2\sigma^2)\} dt = \Phi\{\lambda^1/\sigma\}$
Порог	$\lambda^1 = \sigma\Phi^{-1}\{\alpha\}$
ВПО	$\beta_k^1 = 1 - 1/(\sigma\sqrt{2\pi}) \int_{-\infty}^{\lambda^1} \exp\{-(t - \gamma_k s)^2/(2\sigma^2)\} dt = 1 - \Phi\{(\lambda^1 - \gamma_k s)/\sigma\}$
С компенсацией НЧФ	
ВЛТ	$\alpha = 1/[(\sigma/\gamma)\sqrt{2\pi}] \int_{-\infty}^{\lambda^{1/\gamma}} \exp\{-t^2/(2\sigma^2/\gamma^2)\} dt = \Phi\{\lambda^{1/\gamma}/(\sigma/\gamma_k)\}$
Порог	$\lambda^{1/\gamma} = (\sigma/\gamma_k)\Phi^{-1}\{\alpha\}$
ВПО	$\beta_k^{1/\gamma} = 1 - \Phi\{[(\sigma/\gamma_k)\Phi^{-1}\{\alpha\} - s]/(\sigma/\gamma_k)\} = 1 - \Phi\{\Phi^{-1}\{\alpha\} - \gamma_k s/\sigma\}$

Из таблицы 1 видно, что компенсация НЧФ не приводит к изменению ВПО.

Вычисление сигнала, соответствующего порогу обнаружения

Пороговый сигнал – это сигнал равный пороговому уровню (при этом для нормального распределения обеспечивается ВПО = 0.5) [13].

Поскольку без учета НЧФ, ВПО равна:

$$\beta = 1 - \Phi\{(\sigma\Phi^{-1}\{\alpha\} - s) / \sigma\} = 1 - \Phi\{\Phi^{-1}\{\alpha\} - s / \sigma\},$$

тогда при $\Phi^{-1}\{\alpha\} = s / \sigma$, ВПО будет определяться как:

$$\beta = 1 - \Phi\{0\} = 0,5.$$

В этом случае пороговый сигнал выражается:

$$s = \sigma\Phi^{-1}\{\alpha\}.$$

Выражения для определения ВПО и порогового сигнала с учетом НЧФ приведены в таблице 2.

Таблица № 2

Выражения для определения ВПО и порогового сигнала с учетом НЧФ

Без компенсации НЧФ	
ВПО	$\beta_k^\gamma = 1 - \Phi\{\Phi^{-1}\{\alpha\} - \gamma_k s / \sigma\}$
Пороговый сигнал	$s_k^\gamma = (\sigma / \gamma_k)\Phi^{-1}\{\alpha\}$
С компенсацией НЧФ	
ВПО	$\beta_k^{1/\gamma} = 1 - \Phi\{[(\sigma / \gamma_k)\Phi^{-1}\{\alpha\} - s] / (\sigma / \gamma_k)\} = 1 - \Phi\{\Phi^{-1}\{\alpha\} - \gamma_k s / \sigma\}$
Пороговый сигнал	$s_k^{1/\gamma} = (\sigma / \gamma_k)\Phi^{-1}\{\alpha\}$

Таким образом, проведение компенсации не изменяет пороговый сигнал.

Определение предельной дальности обнаружения

Выходной сигнал связан с дальностью обнаруживаемого объекта следующим образом [13]:

$$s = K_s / L_s^2,$$

где L_s – дальность до обнаруживаемого объекта; K_s – совокупный коэффициент, зависящий от мощности излучения, падающей на фотоприемник и многих других параметров [13].

При отсутствии НЧФ, выражение для определения дальности обнаружения порогового сигнала L будет иметь вид:

$$L = [K_s / s]^{1/2} = [K_s / (\sigma\Phi^{-1}\{\alpha\})]^{1/2}. \quad (1)$$

При учете НЧФ, выражение (1) примет вид:

$$L_k^y = [K_s / s_k^y]^{1/2} = [K_s / ((\sigma/\gamma_k)\Phi^{-1}\{\alpha\})]^{1/2} = [(K_s\gamma_k) / (\sigma\Phi^{-1}\{\alpha\})]^{1/2}. \quad (2)$$

При этом для каждого элемента ФПУ дальность обнаружения будет определяться его чувствительностью. Отношение максимальной дальности к минимальной будет связано с отношением максимальной чувствительности элемента фотоприемника к минимальной:

$$L_{\max}^y / L_{\min}^y = [(K_s\gamma_{\max}) / (\sigma\Phi^{-1}\{\alpha\})]^{1/2} / [(K_s\gamma_{\min}) / (\sigma\Phi^{-1}\{\alpha\})]^{1/2} = [\gamma_{\max} / \gamma_{\min}]^{1/2}$$

Поскольку неравномерность чувствительности фотоприемника равна:

$$\Delta = (U_{\max} - U_{\min}) / (U_{\max} + U_{\min}) = (\gamma_{\max} - 1) / (\gamma_{\max} + 1),$$

Отсюда:

$$\Delta = (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}) / (\gamma_{\max} + \gamma_{\min}) = (L_{\max}^2 - L_{\min}^2) / (L_{\max}^2 + L_{\min}^2)$$

При проведении компенсации НЧФ дальность обнаружения порогового сигнала будет равна:

$$L_k^y = [K_s / s_k^{1/\gamma}]^{1/2} = [K_s / ((\sigma/\gamma_k)\Phi^{-1}\{\alpha\})]^{1/2} = [(K_s\gamma_k) / (\sigma\Phi^{-1}\{\alpha\})]^{1/2}. \quad (3)$$

Поскольку выражения (2) и (3) равны, компенсация НЧФ не изменяет значения предельной дальности обнаружения. Следовательно, наличие НЧФ приводит к соответствующей неравномерности дальности обнаружения, а относительная неравномерность дальности обнаружения будет равна:

$$L_{\max} / L_{\min} = [(1 + \Delta) / (1 - \Delta)]^{1/2}.$$

График зависимости относительной неравномерности дальности обнаружения от НЧФ представлен на рисунке 1.

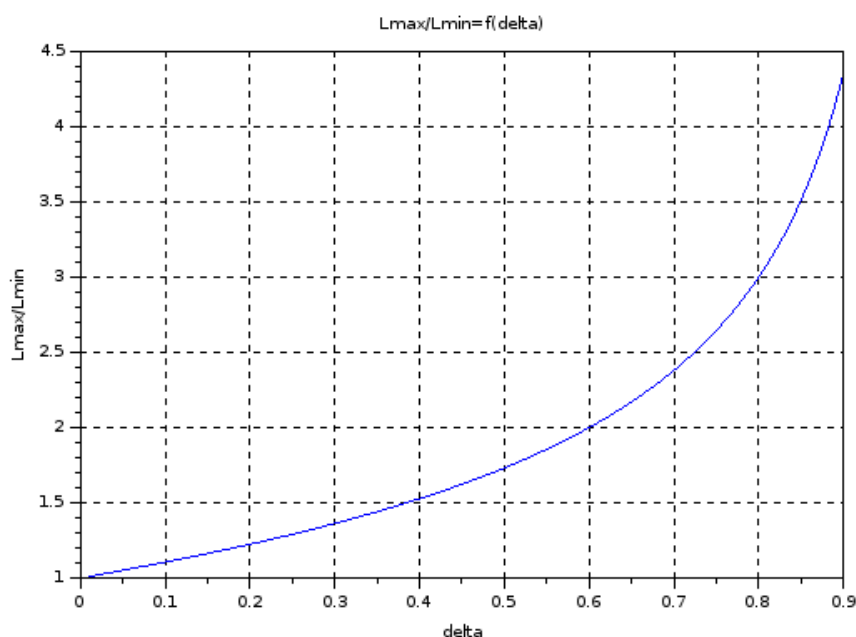


Рис. 1 – Зависимость относительной дальности обнаружения от НЧФ

Полученная зависимость позволяет связать одну из основных характеристик обнаружения ОЭС и параметры фотоприемника. Из рисунка видно, что при НЧФ равной 40 % минимальная дальность обнаружения будет в 1,5 раза меньше максимальной. Таким образом, при обосновании технического облика ОЭС и оценивании ее предельных характеристик обнаружения следует учитывать их снижение за счет наличия НЧФ ФПУ.

Заключение

Анализ результатов исследования влияния НЧФ на характеристики обнаружения ОЭС показывает, что:

1. Наличие НЧФ приводит к ухудшению таких характеристик как, вероятность правильного обнаружения и пороговый сигнал.
2. Существующие способы компенсации НЧФ не приводят к улучшению вероятности правильного обнаружения и порогового сигнала.
3. При 40% НЧФ минимальная дальность обнаружения будет в 1,5 раза меньше максимальной.

Литература

1. Хусаинов Н. Ш., Кравченко П. П., Салов В. В. Об исследовании бортовой интегрированной системы управления движением летательного аппарата с коррекцией координат. // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2038

2. Жилин Д. А., Лянгузов Н. В., Кайдашев Е. М. УФ фотоприемник на основе наностержней и пленок оксида цинка // Инженерный вестник Дона, 2013, № 4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1883

3. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения. Под ред. П. Йесперса, Ф. Ван де Виле, М. Уайта. – М. Мир. 1979. – 574 с.

4. Сергунов А.А. Методы коррекции неравномерности чувствительности инфракрасных матричных фотоприемников // Известия ВУЗов, Приборостроение. 2009, вып. 8 (52), С. 38 – 42.

5. D.A. Scribner, M.R. Krueger Physical limitations to nonuniformity correction in focal plane arrays, Proc. SPIE, vol. 865, pp. 185-201, 1987.

6. R. Wang, P. Chen and P.Tsien An improved nonuniformity correction algorithm for Infrared focal plane arrays which is easy to implement, “Infrared Physics and Technology”, vol.39, 1998, pp. 15-21.

7. G.P. Emerson, S.J. Little, Flat-Fielding for CCDs in AAVSO Observations, I.J. AAVSO, 1999, vol. 27, pp. 49-54.

8. Рогачев В.А., Фантиков О.И. Влияние неравномерности чувствительности фотоприемника на пороговую чувствительность ТВ систем. // Техника средств связи, сер. Техника телевидения. – 1987, № 2, – с. 48–55.

9. Рогачев В.А., Закутаев А.А., Колбанев М.О., Лиференко В.Д. Неравномерность чувствительности фотоприемника как мультипликативная помеха при межкадровой обработке в прецизионных телевизионных системах. Информационно-управляющие системы. 2017, № 2 (87), с. 13 – 18.



10. С.Р. Рао, Линейные статистические методы и их применения, М., Наука, 1968, 548 с.
11. Леман Э.Л. Проверка статистических гипотез. М., Наука, 1978, 406 с.
12. Большев Л.Н., Смирнов Н.В., Таблицы математической статистики. М.: Наука, 1983, 416 с.
13. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. – 536 с.

References

1. Husainov N. Sh., Kravchenko P. P., Salov V. V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2038
2. Zhilin D. A., Liazgunov N. V., Kaidashev E. M. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1883
3. Solid State Imaging, Springer Netherlands, 1976. 574 p.
4. Sergunov A. A. Izvestia VUZov (Rus), Priborostroenie [News of Russian Universities. Journal of Instrument Engineering] 2009, vol. 8 (52) , pp. 38-42.
5. D.A. Scribner, M.R. Kruer Proc. SPIE, vol. 865, pp. 185-201, 1987.
6. R. Wang, P. Chen and P.Tsien “Infrared Physics and Technology”, vol.39, 1998, pp. 15-21.
7. G.P. Emerson, S.J. Little, I.J. AAVSO, 1999, vol. 27, pp. 49-54.
8. Rogachev V. A., Fantikov O. I. Tehnika sredstv svyazi, ser. Tehnika televidenia (Rus). [Communications technology, vol. The Technique of Television] 1987, № 2, pp. 48-55.
9. Rogachev V. A., Zakutaev A. A., Kolbanev M.O., Liferenko V. D. Informatsionno-upravliautshie sistemy (Rus). [Information and Control Systems] 2017, № 2 (87), pp. 13-18.
10. Rao C. R. Linear Statistical Inference and its Applications. Wiley, 2ed, 1973, 648 p.
11. Lehman E., Romano J., Testing Statistical Hypotheses. Springer-Verlag NewYork, 2005, 768 p.



12. Bolshev L. N., Smirnov N. V., Tablitsy matematicheskoi statistiki (Rus) [Tables of mathematical statistics]. M.: Nauka, 1983, 416 p.
13. Hudson R. D., Infrared System Engineering, John Wiley and Sons, 1969, 642 p.