

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И. П. Торшина, Ю. Г. Якушенков

Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)
г. Москва

Для оценки пространственного разрешения оптико-электронной системы можно воспользоваться ее представлением в виде совокупности отдельных звеньев, описываемых функциями передачи модуляции (ФПМ). [1]. При этом может быть использован ряд критериев разрешения, например критерий О.Шаде, успешно применяемый в телевидении. Этот критерий, требует, чтобы ФПМ системы на пространственной частоте f , где еще не происходит наложения спектров - частоте Найквиста f_N , не превышала значения 0,15. Модифицированный критерий Шаде имеет следующий вид:

$$\Delta x = \frac{1}{2\Delta f} = \frac{1}{2 \int_0^{\infty} |K_{ОЭС}(f)|^2 df},$$

где Δf – эквивалентная полоса пропускания пространственных частот, $K_{ОЭС}(f)$ – пространственно-частотная характеристика (ФПМ) всей ОЭС.

Поскольку $K_{ОЭС}(f)$ учитывает снижение пространственного разрешения большинства звеньев, составляющих ОЭС, критерий Шаде позволяет определить предельные разрешаемые значения пространственных частот по известным параметрам этих звеньев.

Очень часто при проектировании и анализе работы различных ОЭС пользуются удобным представлением системы в виде совокупности линейных звеньев, т.е. считают, что все звенья ОЭС работают в линейном режиме. В этом случае общая ФПМ всей системы определяется как произведение ФПМ (пространственно-частотных характеристик, передаточных функций) этих звеньев, в первую очередь, оптической системы – $G(f)$, анализатора изображения – $A(f)$, электронного тракта – $K_3(f)$, системы отображения информации, например, дисплея – $K_{со}(f)$. При этом считают, что приемник излучения (или фотоприемное устройство – ФПУ) совмещен с анализатором изображения или входит в состав электронного тракта. Часто сюда же включают ФПМ, учитывающую имеющиеся место вибрации в системе или ФПМ системы

стабилизации изображения – $G_{cc}(f)$, а для систем визуализации и глаза человека-оператора, который воспринимает информацию с экрана системы отображения – $K_{гл}(f)$. Таким образом, ФПМ всей системы КОЭС(f) в достаточно общем случае имеет вид:

$$G_{ОЭС}(f) = G(f)A(f)K_3(f) * K_{со}(f)G_{cc}(f)K_{гл}(f)$$

Рассмотрим, как определяются отдельные составляющие $K_{ОЭС}(f)$. Примеры передаточных функций отдельных типовых звеньев ОЭС неоднократно приводились в литературе [1, 2 и др.]. На первых этапах расчета можно воспользоваться следующими выражениями.

Оптическая система

Оптическую передаточную функцию (ОПФ) иногда рассматривают как совокупность двух составляющих, одна из которых определяется дифракцией – $G_{диф}(f)$, а другая – $G_{аб}(f)$ аберрациями реальной системы, т.е. принимают

$$G(f) = G_{диф}(f)G_{аб}(f).$$

Часто на практике используют простейшее представление функции рассеяния точки $g(\rho)$ с аргументом – радиусом-вектором ρ , а именно, в виде гауссоиды с круговой симметрией

$$g(\rho) = \exp\left(-\rho^2 / 2 \sigma^2\right),$$

причем

$$\sigma = \frac{R}{\sqrt{2 \ln[1/(1-p)]}},$$

где R – радиус кружка рассеяния, в пределах которого содержится заданный процент p потока, образующего изображение кружка рассеяния. Задаваясь p , легко найти для заданного или рассчитанного R значение σ , например, для $p=0,85$ (85%) $\sigma=0,5R$. Для такой гауссоиды ОПФ имеет вид

$$G(f) = \exp\left(-2 \pi^2 \sigma^2 f^2\right).$$

Иногда параметр σ выражают через размер $\eta_{аб}$ абберационного кружка рассеяния (в радианах): $\sigma = 2,07\eta_{аб} + 0,009\eta_{аб}^2 - 0,42\eta_{аб}^3$.

Анализатор изображения – фотоприемное устройство

Передачная функция анализатора $A(f)$ является Фурье-преобразованием функции, описывающей закон распределения пропускания (для растровых анализаторов) или чувствительности для анализаторов – многоэлементных приемников излучения (МПИ).

Их ФПМ удобно представлять в виде произведения функции, учитывающей геометрию чувствительного слоя приемника $A_r(f)$, и функции $A_{выб}(f)$, описывающей процесс пространственной выборки, осуществляемой МПИ. Для прямоугольной формы отдельных пикселей МПИ с размерами фоточувствительного слоя $k_x X$ и $k_y Y$, где k_x и k_y – коэффициенты заполнения фоточувствительным слоем площади пиксела $X \times Y$ (X и Y – периоды расположения пикселей по осям x и y), двумерная ФПМ анализатора имеет вид:

$$A_{выб}(f_x, f_y) = \text{sinc}(f_x X) \cdot \text{sinc}[f_x (X - k_x X)] \cdot \text{sinc}(f_y Y) \cdot \text{sinc}[f_y (Y - k_y Y)]$$

где $\text{sinc}(z) = \sin(\pi z) / (\pi z)$.

Функция $A_{выб}(f)$ определяется периодом выборки, который по направлению $\square$ выражается обычно в единицах либо угла (рад или мрад), либо линейной координаты (м или мм).

Электронный тракт

Функция передачи модуляции электронного тракта определяется фазовыми сдвигами сигналов, а также ограничениями спектра сигнала (искажениями формы), имеющими место в отдельных его звеньях.

Иногда $K_s(f)$ представляют в виде произведения передаточных функций приемника излучения, усилителя, преобразователей типа «аналог-цифра» и «цифра-аналог» и других звеньев, рассматривая отдельно их влияние на спектр сигнала. Переход от пространственных частот f_x и f_y к временной частоте f , являющейся аргументом этих функций, и обратный переход для случая сканирования с постоянной скоростью достаточно прост. Например, при сканировании мало-размерного изображения вдоль оси x со скоростью v_x [рад/с]

$$f_x = f / v_x = \tau_d f / \alpha_x,$$

где τ_d – время пребывания изображения (по оси x) на элементе приемника с угловым размером α_x .

Учитывая большое разнообразие электронных трактов различных ОЭС, невозмож-

но привести сколько-нибудь общее выражение для $K_s(f)$.

Иногда на начальных стадиях расчета в качестве передаточной функции электронного тракта принимают следующее выражение:

$$K_s(f) = [1 - (f / f_N)^{2n}]^{-1/2},$$

где показатель степени n определяется типом электронного фильтра. Так, для простейшего отсекающего фильтра $n = 1$, для простого полосового фильтра $n = 2$, для низкочастотного фильтра, устраняющего явление наложения частот (фильтр Баттерворта) $n = 4$.

В тех случаях, когда граничная частота в спектре сигнала не превышает частоты Найквиста f_N , иногда принимают

$$K_s(f) = 1.$$

При использовании в составе ОЭС звена, реконструирующего (восстанавливающего) изображение, в качестве $K_s(f)$ используют выражение

$$K_s(f) = \text{sinc}(f/f_0) \text{sinc}\left(\frac{f \alpha_p}{\tau_d f_0}\right),$$

где f_0 – центральная частота полосы пропускания реконструирующего фильтра (частота восстановления).

Система отображения

Функцию передачи модуляции системы отображения, например, дисплея или другого видеоконтрольного устройства, часто описывают гауссовской функцией вида [1]

$$K_{co}(f) = \exp(-0,5 \sigma_m^2 f^2)$$

где $\sigma_m = 0,54 s_{стр}$, $s_{стр}$ – расстояние между строками видеоконтрольного устройства.

Глаз человека – наблюдателя

В случае включения в систему человека, т.е. при работе ОЭС в полуавтоматическом режиме, в число составляющих включают передаточную функцию глаза человека-наблюдателя $K_{гл}(f)$.

Иногда эту функцию представляют в следующем виде:

$$K_{гл}(f) = \exp\left(-\frac{\Gamma f}{2 \pi V}\right),$$

где $\Gamma = 1,4445 - 0,34407 \lg L_0 + 0,039457 (\lg L_0)^2 + 0,0019652 (\lg L_0)^3$, L_0 – средняя яркость экрана дисплея, V – увеличение системы, с которой работает глаз.

Для расчета $K_{гл}(f)$ используют и другие зависимости, например, следующее выражение:

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

$$K_{\text{гл}}(f) = \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} \sqrt[3]{f / f_{\text{max}}} \right),$$

где f_{max} – пространственная частота (мрад⁻¹), на которой $K_{\text{гл}}(f)$ имеет максимум. В пространстве объектов часто принимают $f_{\text{max}} = 0,3 \text{ мрад}^{-1}$.

Система стабилизации линии визирования

Передаточная функция системы стабилизации линии визирования (оптической оси ОЭС) учитывает размытие изображения, а следовательно, и ухудшение разрешающей способности ОЭС из-за вибраций основания, на котором стоит прибор, нестабильности параметров сканирующей системы и ряда аналогичных по своему действию факторов.

Закон движения оптической оси при анализе влияния нестабильности на качество изображения обычно принимают линейным, синусоидальным или случайным. На первом этапе расчета наиболее распространена гипотеза о случайном характере изменения амплитуды отклонения оптической оси или линии визирования от некоторого идеального, полностью стабилизированного положения.

При этом можно пользоваться гауссовской функцией вида

$$K_{\text{cc}}(f) = \exp \left[- (f / f_{\text{пред}})^2 \right],$$

где $f_{\text{пред}} = 0,255 / \sigma_p$, σ_p – среднее квадратическое значение амплитуды отклонения оптической оси или линии визирования, например амплитуды вибрации, от идеального положения.

Иногда, также считая дрожание изображения вследствие нестабильности оптической оси гауссовским со средним квадратическим отклонением амплитуды σ_s (мрад), принимают

$$G_{\text{cc}}(f) = \exp \left[- 2(\pi f \sigma_s)^2 \right],$$

где f – пространственная частота, мрад⁻¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 2011. – 568 с.
2. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. – М.: Логос. 2009. -248 с.