УДК 681.51

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРИМИНАТОРНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ

д.т.н. проф. Г.В. Алешин

Ввиду особенностей существующей теории измерений параметров сигнала в шумах [1] в статье рассматриваются с системных позиций показатели дискриминаторных измерителей, которые являются основой построения каналов измерительных систем.

Дискриминатор в радиотехнике - это вид функционального измерителя, построенного на принципах работы селектирующих устройств. Чаще применяют двухканальные дискриминаторы, имеющие симметричную, достаточно линейную на интервале $2\Delta\nu_д$ дискриминаторную характеристику (рис. 1) $U_д(\lambda)$, где U - напряжение или другой параметр индикации, $2\Delta\nu_д$ - апертура дискриминатора.

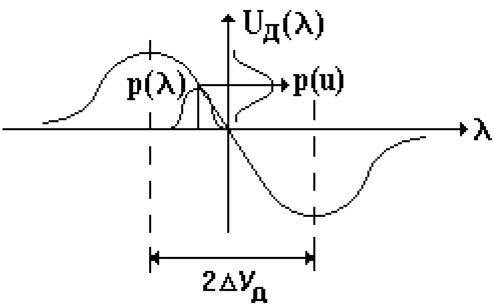

Рис. 1 - Дискриминаторная характеристика

Даже если характеристика U задана точно, но на выходе есть флуктуационный шум, либо нечувствительность по параметру индикации U, то оценка измеряемого параметра будет неточной. Распределение плотности вероятности измеряемого параметра в этом случае будет равна

$$p(\lambda) = p(U_Д(\lambda))\frac{dU_Д(\lambda)}{d\lambda}. \qquad (1)$$

Если $\mathbf{U}$ - смесь выходного напряжения с шумом, то для симметричных $\mathbf{p(\lambda)}$ и $\mathbf{p_д(\lambda)}$,

$$\mathbf{M[U(\lambda)] = U(M[\lambda])}, \tag{2}$$

где $\mathbf{M[X]}$ - математическое ожидание $\mathbf{X}$.

Дисперсия шума в соответствии с формулой (1) равна

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ш}}^{\mathbf{2}} = \int \left\{ \mathbf{U(\lambda) - M[U(\lambda)]} \right\}^{2} \mathbf{p(\lambda) d\lambda} \tag{3}$$

Разложим $\mathbf{U}$ в ряд Тейлора в окрестности $\mathbf{M[\lambda]}$

$$\mathbf{U(\lambda) = U(M[\lambda]) + U'_{\lambda}(M[\lambda])\Delta\lambda + U''_{\lambda}(M[\lambda])\frac{\Delta\lambda^2}{2} + \ldots},$$

где $\mathbf{\Delta\lambda = \lambda - M[\lambda]}$.

Подставив этот ряд в выражение (3), получим

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ш}}^{\mathbf{2}} = \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \mathbf{U(M[\lambda]) + U'_{\lambda}\Delta\lambda + U''_{\lambda}\frac{\Delta\lambda^2}{2} + \ldots - M\big[U(\lambda)\big]} \right\}^{2} \mathbf{p(\lambda) d\lambda}.$$

Учитывая соотношение (2), упростим (3)

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ш}}^{\mathbf{2}} = \int_{\infty}^{-\infty} \left\{ \mathbf{U'_{\lambda}(M[\lambda])\Delta\lambda + \ldots} \right\}^{2} \mathbf{p(\lambda) d\lambda} = \left\{ \mathbf{U'_{\lambda}(M[\lambda])} \right\}^{2} \cdot \boldsymbol{\sigma}_{\lambda}^{\mathbf{2}}.$$

Тогда

$$\boldsymbol{\sigma}_{\lambda}^{\mathbf{2}} = \frac{\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ш}}^{\mathbf{2}}}{\left(\dfrac{\mathbf{dU_Д(\lambda)}}{\mathbf{d\lambda}} \right)^{2}} \tag{4}$$

Отсюда следует вывод о том, что дисперсия оценки $\boldsymbol{\sigma}_{\lambda}^{\mathbf{2}}$ обратно пропорциональна крутизне дискриминаторной характеристики $\mathbf{U_д(\lambda)}$. В метрологии крутизну обычно называют чувствительностью измерительного прибора.

В соответствии с формулой (4) она зависит не только от крутизны дискриминатора, но и от выходных шумов дискриминатора, либо также от нечувствительности индикатора, от точности разметки шкалы, от точности знания уровня сигнала и так далее. Если кроме шумов имеются другие факторы, то они могут быть учтены в дисперсии $\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ш}}^{\mathbf{2}}$ композиции законов распределения случайных факторов, влияние которых пересчитано на параметр индикации $\mathbf{U_д}$. При этом размерности $\mathbf{U_д}$ и $\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{ш}}^{\mathbf{2}}$, естественно совпадают.

Формулу (4) можно преобразовать, подставив вместо значения $\mathbf{U_д(\lambda)}$ при минимальной характеристике $\mathbf{U_д(\lambda)}$ его приближенное значение $\mathbf{\Delta U_д/\Delta\lambda_д}$. Для радиотехнических дискриминаторов максимальное значение $U_д(\lambda)$ обычно, если не равно, так пропорционально амплитуде сигнала S_m. Поэтому

$$\frac{\Delta U_Д}{\Delta\lambda_Д} \approx \frac{S_m}{\Delta\lambda_{Дь}}.$$

С учетом этого, формула (1) предстает в виде

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{\Delta\lambda_Д^2}{q}.$$

где $q = \frac{S_m^2}{2\sigma_ш^2}$ - отношение мощности сигнала на входе дискриминатора к мощности шума. Параметр q можно считать также числом градаций яркости для оптических систем, отношением диапазона параметра индикации к интервалу нечувствительности и т. д.

Обычно, диапазон измерений определяется апертурой дискриминатора

$$2\beta_а\sigma_а=2\Delta\lambda_д,$$

где $\beta_а$ и $\sigma_а$ - соответственно квантиль и среднеквадратическое уклонение априорного закона распределения измеряемого параметра. Формула (6) - это условие оптимального сопряжения апертуры дискриминатора с априорным диапазоном измерений. Если $2\beta_а\sigma_а < \Delta\lambda_д$, то максимальной точности мы не достигаем, т. к. при этом крутизна $S_m / \Delta\lambda_д$ не максимальна. Если $2\beta_а\sigma_а > \Delta\lambda_д$, то невозможна однозначность измерений. Тогда формула (5) предстанет в виде

$$\sigma_\lambda^2 = \frac{(2\beta_а\sigma_а)^2}{q}.$$

Отсюда следует важный вывод, который не следует из существующей теории измерений, но все практики это чувствуют: точность измерений пропорциональна априорной точности. Вот почему метрологи при заданном энергетическом потенциале q стремятся повысить точность прецизионных измерений за счет сужения опорного диапазона $2\beta_а\sigma_а$, т. е. за счет сужения $\Delta\lambda_д$, или увеличения чувствительности измерителя (увеличения крутизны дискриминационной характеристики $S_m / \Delta\lambda_д$).

На погрешность измерений дискриминаторным методом оказывают влияние многие факторы, такие как незнание амплитуды сигнала, неточность настройки дискриминатора, влияние априорных сведений, неточность шкалы дискриминатора и т. д.

Неточность шкалы и настройки дискриминатора можно считать аддитивной составляющей погрешности измерений. Априорные сведения уточняют результирующую точечную оценку λ_p следующим образом при гауссовом распределении вероятности измеряемого параметра

$$\sigma_p^{-2} = \sigma_a^{-2} + \sigma_\lambda^{-2} = \sigma_a^{-2}\left[1 + (2\beta_a)^{-2} q\right],$$

где σ_p^{-2} и σ_a^{-2} - результирующая и априорная точность.

Такой точности можно достичь, если исчислять результирующую взвешанную точечную оценку λ_p по формуле

$$\lambda_p = \frac{\sigma_a^{-2}}{\sigma_p^{-2}} \lambda_a + \frac{\sigma_\lambda^{-2}}{\sigma_p^{-2}} \bar{\lambda},$$

где λ_a и $\bar{\lambda}$ - математические ожидания априорного распределения вероятности и оценки измерений дискриминатором. При этом в качестве $\bar{\lambda}$ следует брать результат измерений.

Очевидно, что вычислять взвешанную оценку есть смысл, если $(2\beta_a\sigma_a)^{-2}q \le 10$. Однако, такой измеритель высокоточным не назовешь.

Изменение уровня сигнала S_m прямым образом влияют на крутизну, а, значит, и на точность дискриминатора. Поэтому в реальных измерительных системах принимают меры по стабилизации амплитуды сигнала: система АРУ, двухсторонний ограничитель, детекторы отношений и т. п.

Можно показать, что максимальное значение относительной среднеквадратической погрешности измерителя за счет незнания амплитуды сигнала $\sigma_{\lambda(Sm)}$ не превышает среднеквадратическую погрешность измерений σ_λ, если

$$\sigma^2_{Sm} \le 1/q,$$

где $\max\sigma_{\lambda(Sm)} = \Delta\lambda_д \cdot \sigma^0_{S_m}$, $\sigma^0_{S_m} = \dfrac{\sigma_{S_m}}{S_m}$, σ_{Sm} - среднеквадратическая погрешность оценки амплитуды.

Менее чувствителен к незнанию амплитуды сигнала следящий дискриминатор. Достоинством его при той же точности измерений является также возможность измерений параметра сигнала в режиме сопровождения в широком диапазоне. Это достигается существенным усложнением аппаратуры. Кроме того, появляются динамические погрешности и нельзя обойтись без первоначального поиска параметра сигнала.

Не следует считать, что согласованная фильтрация является необходимой для всех видов дискриминаторных измерителей. Она целесообразна лишь для того, чтобы получить максимум отношения сигнал/шум. Дискриминатор в радиотехнике предназначен для работы с узкополосным сигналом, поскольку требуется высокая точность оценивания. Поэтому существенна лишь полоса пропускания. Она не может быть бесконечно малой по причине реализуемости и динамики измеряемого параметра.

В системах прицеливания по существу оценивается привязка изображения цели к настройке прибора. Роль дискриминаторной характеристики играет распределение яркости **I(X)** или соответствующего параметра изображения по углам, или по развертке (**X**). Тогда точность прибора и его привязки к какому - либо фронту изображения может быть оценена

$$\sigma_x^2 = \frac{\delta I^2}{\left(\Delta I / \Delta x_Д\right)^2},$$

где δI - нечувствительность по яркости, ΔI - перепад яркости на границах фронта изображения (контраст), $\Delta X_д$ - протяженность фронта.

Достоинством дискриминаторных измерителей является сравнительная простота реализации. Недостаток - нельзя обеспечить согласно (5) без поиска сигнала высокую точность в широком диапазоне, а так же малая пропускная способность.

Таким образом, рассмотренные основные особенности присущи практически всем наиболее распространенным дискриминаторным измерителям параметров любой природы, в том числе системам прицеливания и наведения. Зависимость точности измерителя от таких показателей, как априорная точность, квантиль, отношение сигнал/шум, привязка их к апертуре дискриминатора является основанием для оценки соответствующей эффективности. Изложенные результаты могут быть использованы также для оценки эффективности более сложных многоэтапных и многошкальных измерителей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Г.В. О корректности методов синтеза измерительных радиотехнических систем. В сб. научн. тр. Инф. сист. - Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, вып 1, 1998, С. 3 -7.

2. Алешин Г.В. Основы построения оптимальных информационно - измерительных радиотехнических систем. - Харьков: ХВУ, 1994. - 252 с.