
К ТЕОРИИ РАЗДЕЛЕНИЯ (СЕЛЕКЦИИ) РАДИОСИГНАЛОВ

А. Ф. Апорович

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Основы общей теории линейной селекции разработаны Д. В. Агеевым, Л. Заде, А. А. Харкевичем [1, 2] и другими учеными. Общая теория нашла ряд практических применений, особенно при построении многоканальных систем радиосвязи.

Главное ограничение теории линейной селекции — необходимость считать фильтры, являющиеся избирательными элементами, идеальными, с *P*-образной характеристикой избирательности. Такие фильтры физически неосуществимы; их использование в теории часто приводит к потере существенных особенностей разделения радиосигналов, с которыми приходится встретиться на практике.

Во многих практических случаях ставится задача выделения нужного сигнала из случайным образом создавшейся совокупности радиосигналов. При этом важно учесть возможность прохождения сигналов не только внутри полосы пропускания, а и за ее пределами, которое будет иметь место при большом динамическом диапазоне входных сигналов. Учет такой возможности и постановка обоснованных требований к характеристикам избирательных элементов радиоприемника является весьма актуальной задачей в современных условиях массового использования радиотехнических средств.

Дополнительно следует отметить весьма важное обстоятельство, которое не отражается общей теорией линейной селекции. Процесс выделения нужных сигналов из некоторой совокупности не является чисто линейным. Действие линейной системы (фильтра) сводится к обеспечению заранее предопределенных преимуществ в прохождении полезных радиосигналов в соответствии с формой характеристики избирательности, но не исключает прохождения нежелательных радиосигналов. Дальнейшее использование именно нелинейной (пороговой) системы исключает прохождение посторонних радиосигналов, если они были в достаточной степени ослаблены линейной системой.

Эти рассуждения приводят к выводу, что для некоторых применений теория линейной селекции недостаточна; требуется построение другой модели процесса селекции с учетом особенностей прохождения радиосигналов через радиоприемник с реальными избирательными элементами.

Недостаточность линейной теории селекции особенно заметна при изучении условий деления потоков радиосигналов, образованных излучением массовых радиосредств. Такое деление (селекция) имеет место в радиосвязи, радиовещании, радиоразведке при большой плотности потока радиосигналов на входе приемника, отличающегося большим динамическим диапазоном.

2. ОДНОМЕРНАЯ ЗАДАЧА РАЗДЕЛЕНИЯ РАДИОСИГНАЛОВ

Пусть на входе радиоприемника действует совокупность радиосигналов, создаваемых с помощью N источников, различающихся по некоторому параметру x .

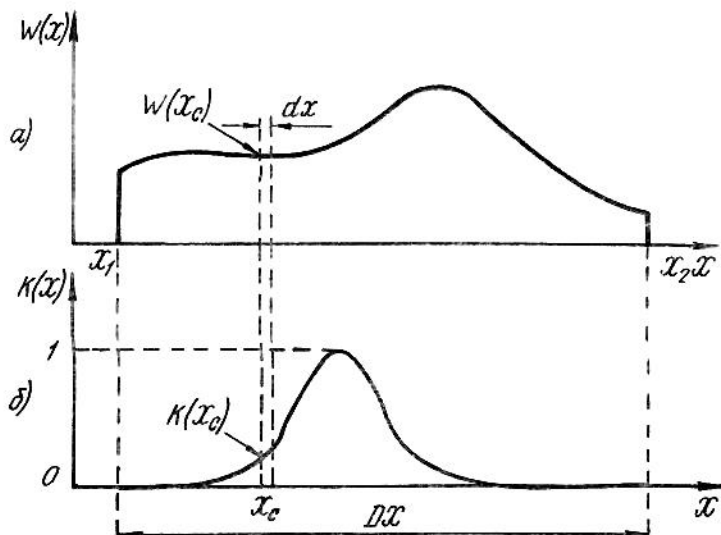


Рис. 1.

Известна функция $w(x)$ (рис. 1а), выражающая собой дифференциальный закон распределения параметра x в диапазоне Dx . Это значит, что нам заранее, априорно, известно, как по параметру x распределены действующие на входе приемника сигналы от N источников. Кривая $w(x)$ определяется статистически для некоторых условий, типичных с точки зрения применения нашего радиоприемника. При получении таких априорных сведений мы встретимся с такими же трудностями, которые известны из теории статистического радиоприема и которые не могут быть причиной отказа от применения этих априорных сведений.

К априорным сведениям следует отнести также распределение радиосигналов по мощности в точке радиоприема. Пусть такие сведения имеются в виде функции $w(P)$ (рис. 2), вид которой зависит от мощности отдельных источников, дальности до них из точки приема и от других причин. Функции $w(x)$ и $w(P)$ разные, однако для простоты записи они обозначены одной и той же буквой без индекса, что, по-видимому, не должно вести к недоразумениям. Из характеристик радиоприемника следует знать

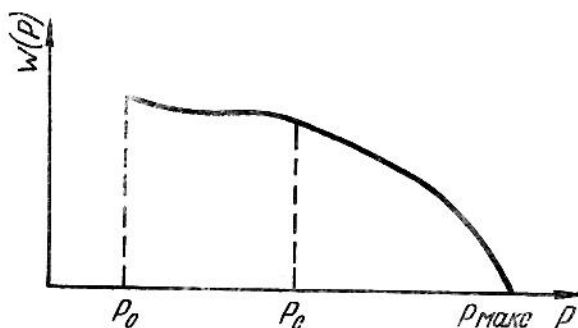


Рис. 2.

характеристику избирательности по x , заданную аналитически в виде функции $k(x)$ (см. рис. 1б), и характеристику чувствительности радиоприема, заданную в виде минимального (порогового) уровня мощности P_0 радиосигнала на входе приемника.

Определим, какое количество N_c источников будет приниматься приемником, если в точке его расположения действуют сигналы от N источников.

Выделим на рис. 1а и 1б при $x = x_c$ некоторый отрезок малой длины ($dx \ll Dx$). Найдем для этого отрезка число источников, сигналы которых пройдут на выход радиоприемника

$$dN_c = N \int_{P_c}^{P_{\max}} \omega(P) dP \omega(x_c) dx. \quad (1)$$

В формуле (1) приняты следующие обозначения и предположения:

1. $P_c = \frac{P_0}{k(x_c)}$. Это значит, что в соответствии с коэффициентом усиления по мощности $k(x_c)$ для данного значения параметра x_c установился новый порог приема P_c вместо P_0 , определенного для $k(x) = 1$.

2. Принимаем, что случайные величины P и x , представленные с помощью функций $\omega(P)$ и $\omega(x)$, статистически независимы.

3. Предполагается также, что кривая $\omega(x)$ является гладкой, так что для любого x_c в интервале dx за значение функции можно принять $\omega(x_c)$.

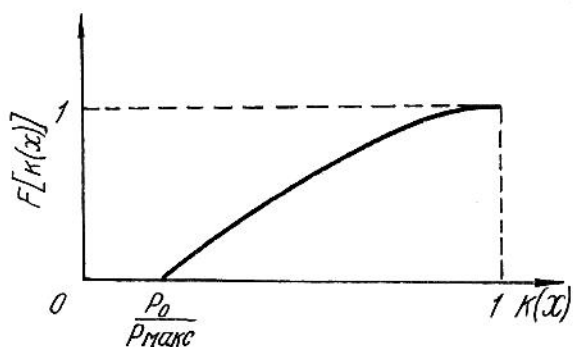


Рис. 3.

Заметим, что интеграл в выражении (1) — это функция от x , поскольку его нижний предел определяется значением $k(x)$. Упростим запись, введя обозначение

$$F[k(x)] = \int_{P_c}^{P_{\max}} \omega(P) dP. \quad (2)$$

Примерный вид $F[k(x)]$ показан на рис. 3. С учетом (2) можно записать

общее выражение для среднего числа N_c источников, радиосигналы которых пройдут через радиоприемник

$$N_c = N \int_{(D)} F[k(x)] \omega(x) dx. \quad (3)$$

Формулой (3) таким образом определено, какое количество источников радиосигналов после рассортировки их мощности в соответствии с кривой избирательности по параметру x обеспечит преодоление порога P_0 , если априорно известны распределения сигналов на входе приемника в виде $\omega(x)$ и $\omega(P)$.

3. РАЗДЕЛЕНИЕ РАДИОСИГНАЛОВ ПО n ПАРАМЕТРАМ

Подход к задаче при разделении радиосигналов по n параметрам остается таким же, как в одномерном случае.

Предполагаем, что имеются априорные сведения о мощности радиосигналов $\omega(P)$ и n -мерная функция $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Для простоты

будем считать, что $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = \omega(x_1)\omega(x_2)\dots\omega(x_n)$. При селекции по двум параметрам формула (3) может быть переписана в следующем виде:

$$N_{c_2} = N \int_{(D_{c_1})} dx_1 \int_{(D_{c_2})} F_2[k_2(x_1, x_2)] \omega(x_1)\omega(x_2) dx_2. \quad (4)$$

В (4) имеется функция

$$F_2[k_2(x_1, x_2)] = \int_{P_{c_1, c_2}} \omega(P) dP,$$

в которой

$$P_{c_1, c_2} = \frac{P_0}{k_2(x_1, x_2)} = \frac{P_0}{k(x_1)k(x_2)},$$

если допустимо считать, что

$$k_2(x_1, x_2) = k(x_1)k(x_2).$$

Аналогично для n -мерного случая

$$N_{cn} = N \int_{(DX)} F_n[k_n(x_1, x_2, \dots, x_n)] \omega(x_1)\omega(x_2)\dots\omega(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n. \quad (5)$$

Здесь $DX = DX_1, DX_2 \dots DX_n$ — обобщенный диапазон изменения параметров x_1, x_2, \dots, x_n . Интеграл в (5) n -кратный.

Выражение (5) отвечает на поставленный вопрос о среднем числе источников радиосигналов которых будут проходить через радиоприемник, использующий селектирующие элементы по n параметрам.

Познакомимся с некоторыми примерами, иллюстрирующими применение формул (3) и (5).

4. ПРИМЕРЫ

Пример 1. Рассчитать количество источников, радиосигналы которых пройдут на выход радиоприемника, настроенного на частоту f_0 с полосой пропускания частот ΔF и чувствительностью, характеризующейся пороговым уровнем мощности P_0 . Радиоприемник имеет частотную характеристику $k(f)$, снятую по мощности

$$k(f) = \begin{cases} 1 & [f_0 - \frac{\Delta F}{2} \leq f \leq f_0 + \frac{\Delta F}{2}], \\ 0 & [f < f_0 - \frac{\Delta F}{2}, f > f_0 + \frac{\Delta F}{2}]. \end{cases}$$

Смесь радиосигналов на входе радиоприемника образована от N излучателей, причем

$$\omega(f) = \frac{1}{Df}, \quad \omega(P) = \frac{1}{P_{\max}}.$$

Решение. Используем выражения (2) и (3)

$$F[k(f)] = \begin{cases} \frac{P_{\max} - P_0}{P_{\max}} & [f_0 - \frac{\Delta F}{2} \leq f \leq f_0 + \frac{\Delta F}{2}], \\ 0 & [f < f_0 - \frac{\Delta F}{2}, f > f_0 + \frac{\Delta F}{2}]. \end{cases}$$

Сигнал на выходе существует только в полосе пропускания ΔF .

$$N_c = N \frac{P_{\text{макс}} - P_0}{P_{\text{макс}}} \frac{\Delta F}{Df}. \quad (6)$$

Решение весьма просто, особенно если положить, что $P_{\text{макс}} \gg P_0$. Тогда

$$N_c = N \frac{\Delta F}{Df}. \quad (7)$$

Такой результат можно было бы получить методами линейной селекции [1]. В этом простом результате (7) не учтены важные факторы: динамический диапазон принимаемых радиосигналов и чувствительность радиоприемника, чем выражение (6) не грешит.

Нетрудно видеть, что из соотношения (3) или в простейшем случае из соотношений типа (6), полученных для конкретных условий, можно находить отношение $\frac{\Delta F}{Df}$, определяющее полосу пропускания приемника, если задано, каким должно быть среднее значение числа принимаемых станций, при котором условия выделения полезного сигнала будут удовлетворительными. Это значит, что полученные здесь соотношения можно использовать при проектировании радиоприемных устройств.

Пример 2. Селекция ведется по частоте и азимуту. Необходимо рассчитать количество источников N_{c2} , сигналы которых будут зарегистрированы на выходе приемника, если в точке приема действует N источников с равномерным распределением по мощности

$$w(P) = \frac{1}{P_{\text{макс}}}$$

и равномерным распределением по частоте

$$w(f) = \frac{1}{Df}.$$

Приемник принимает радиосигналы, превышающие на входе уровень мощности P_0 . Он имеет прямоугольную частотную характеристику $k(f)$ с полосой пропускания ΔF , как в примере 1, а антенна обладает в азимутальной плоскости характеристикой направленности

$$k(\alpha) = e^{-2,77 \frac{(\alpha - \alpha_0)^2}{\Delta A^2}},$$

где ΔA — раствор диаграммы направленности в азимутальной плоскости по половинной мощности,

α_0 — направление максимума приема.

Распределение источников излучения по азимуту прием равномерным, т. е.

$$w(\alpha) = \frac{1}{2\pi}.$$

Решение. Имеет место случай двумерной селекции. Расчет N_{c2} будем вести по формуле (4)

$$F_2[k_2(f, \alpha)] = 1 - \frac{P_0}{P_{\text{макс}}} e^{2,77 \frac{(\alpha - \alpha_0)^2}{\Delta A^2}}.$$

Эта функция существует только в полосе пропускания частот ΔF . Границы ее существования по α легко находятся из условия неотрицательности функции $F_2[k_2(f, \alpha)]$.

$$\alpha_0 - 0,6\Delta A \sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}} \leq \alpha \leq \alpha_0 + 0,6\Delta A \sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}}.$$

Сокращенно границы α обозначим соответственно α_n и α_p . Запишем формулу (4) применительно к нашему примеру

$$N_{c_2} = N \int_{f_0 - \frac{\Delta F}{2}}^{f_0 + \frac{\Delta F}{2}} \frac{df}{Df} \int_{\alpha_n}^{\alpha_p} \left\{ 1 - \frac{P_0}{P_{\max}} \exp \left[2,77 \frac{(\alpha - \alpha_0)^2}{\Delta A^2} \right] \right\} \frac{d\alpha}{2\pi}.$$

После вычислений найдем

$$N_{c_2} = N \frac{\Delta F \Delta A}{Df} 1,2 \left[\sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}} - \frac{P_0}{P_{\max}} F \left(\sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}} \right) \right]. \quad (8)$$

Здесь $F \left(\sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}} \right)$ — функция типа $F(x) = \int_0^x e^{-t^2} dt$, представленная в таблицах, например, в работе [3]. Если прием ведется только внутри ΔA , т. е. $\frac{P_{\max}}{P_0} \leq 2$, то можно воспользоваться первым членом разложения

$$e^{-t^2} = 1 - t^2 + \dots$$

и тогда

$$F \left(\sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}} \right) \approx \sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}}.$$

Следовательно,

$$N_{c_2} \approx N \frac{\Delta F \Delta A}{Df} 1,2 \sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}} \left(1 - \frac{P_0}{P_{\max}} \right). \quad (9)$$

Возможны также упрощения и для другого случая, когда $\frac{P_{\max}}{P_0} \gg 10$.

С ошибкой, не превышающей 30%, как и в предыдущем упрощении, получим формулу для N_{c_2} ,

$$N_{c_2} \approx N \frac{\Delta F \Delta A}{Df} 1,2 \sqrt{\ln \frac{P_{\max}}{P_0}}. \quad (9')$$

Соотношения (4) и (5), как и их конкретные разновидности (8), (9) и (9'), могут быть использованы при синтезе радиоприемных устройств, поскольку они содержат необходимые функциональные связи результата селекции с параметрами радиосигнала и радиоприемника.

ВЫВОДЫ

1. При разделении радиосигналов существенную роль играют априорные данные о распределении мощности и параметров сигналов, по которым ведется селекция, а также форма характеристик избирательности радиоприемника и его чувствительность.

2. Для данных условий работы радиоприемника можно поставить задачу о необходимых характеристиках радиоприемника, обеспечивающих определенные результаты селекции (разделения) радиосигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Харкевич. Очерки общей теории связи. ГИТТЛ, 1955.
2. Л. Заде, К. Миллер. Основы теории линейных многоканальных систем. Сборник переводов с английского под редакцией А. А. Харкевича, ГИФМЛ, 1959.
3. К. А. Карпов. Таблицы функции $F(z) = \int_0^z e^{x^2} dx$ в комплексной области. Изд-во АН СССР, 1958.