ОБ ОСЛАБЛЕНИИ МОЩНОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ ПОМЕХ В КАНАЛЕ С ПРЕДЫСКАЖЕНИЯМИ

В. К. Маригодов

Севастополь

Для оценки переходных помех в групповом тракте многоканальных радиорелейных линий связи или для нелинейных помех в индивидуальных каналах тех же линий наиболее удобно в качестве математического аппарата использовать корреляционный метод [1]. При этом обычно спектральная плотность мощности группового спектра сигнала моделируется нормальным случайным стационарным процессом с равномерным спектром. Такую же модель с некоторыми приближениями для количественной оценки упомянутых помех можно применять и для отдельных каналов. Эффективность введения предыскажений для ослабления мощности шумов, обусловленных нелинейностью амплитудной характеристики тракта модулятор — демодулятор аппаратуры уплотнения отдельного телефонного канала радиорелейной линии, была исследована в [2]. В качестве простейшей модели энергетического спектра сигнала в [2] использовался нормальный случайный стационарный процесс с равномерной спектральной плотностью $G_1 = \text{const}$. Однако такая упрощенная модель не всегда соответствует реальным передаваемым сообщениям.

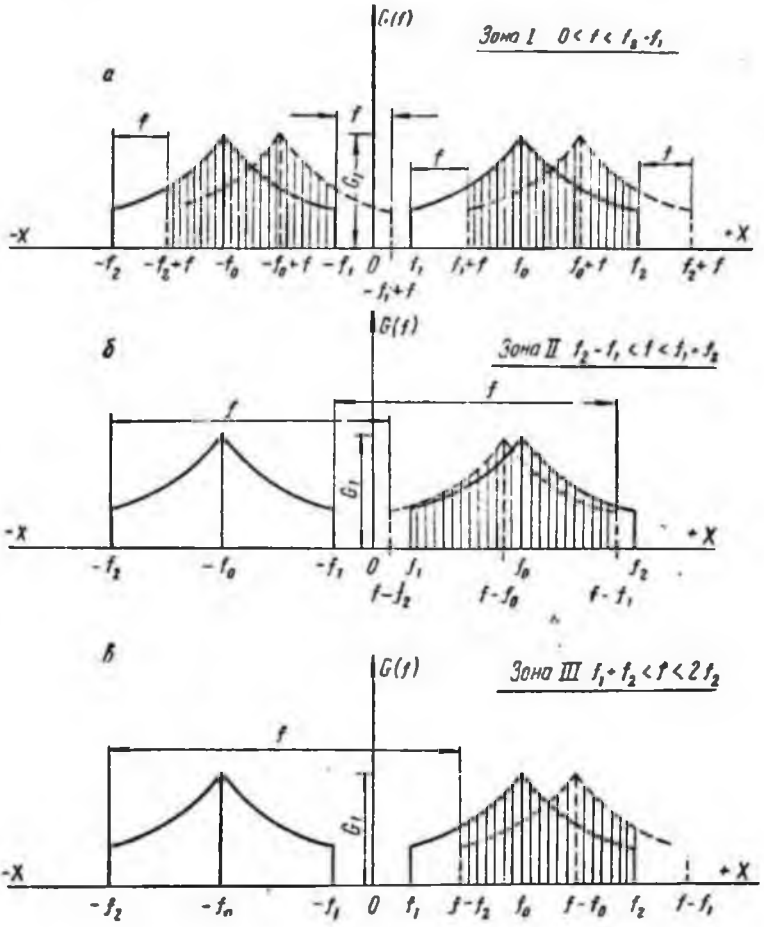
В статье рассмотрена эффективность предыскажений в отдельном телефонном канале радиорелейной линии с точки зрения ослабления продуктов нелинейности. При этом полагали, что огибающая энергетического спектра сигнала моделируется экспоненциальными отрезками. Некоторые частные случаи аддитивных помех в канале связи и их ослабление в результате введения предыскажений при таком моделировании энергетического спектра фототелеграфного сигнала описаны в [3, 4].

На рисунке представлены в условном масштабе спектральные плотности входного сигнала с экспоненциальной огибающей спектра при отсутствии предыскажений для трех наиболее характерных зон интегрирования в соответствии с методикой [1, 2]. Здесь G_1 — максимальная величина спектральной плотности, f_0 — несущая, f_1 и f_2 — граничные частоты типового телефонного канала, f — текущая частота.

Спектральная плотность нелинейных шумов второго порядка $G_2(f)$ на выходе канала при отсутствии предыскажений равна [1]

$$G_2(f) = \alpha_2^2 \int_{-\infty}^{\infty} G_1(x)\, G_1(f-x)\, dx, \qquad (1)$$

где $G_1(x)$ — спектральная плотность неискаженного сигнала;
α_2 — приведенный коэффициент при члене второго порядка полинома, аппроксимирующего амплитудную характеристику нелинейного тракта.



Аналитические выражения для аппроксимации закона изменения спектральной плотности на различных участках каждой из зон рисунка (в соответствии с упомянутой методикой) представлены в таблице.

В выражениях спектральной плотности (таблица) β — коэффициент, характеризующий быстроту экспоненциального спада.

С помощью формулы (1) и данных таблицы находим спектральные плотности нелинейных помех второго порядка для различных зон рисунка (при отсутствии предыскажений).

Для зоны I (рисунок, *а*)

$$G_2(f) = \alpha_2^2 G_1^2 \left[\int_{f-f_0}^{-f_0} e^{-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_1} - \frac{\beta(f_0+x)}{f_0-f_1}} dx + \right.$$

$$\left. + \int_{-}^{-f_1} e^{-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_1} - \frac{\beta(f_0+x)}{f_0-f_1}} dx + \right.$$

$$+\int_{f-f_0}^{-f_1} e^{-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_1}-\frac{\beta(f_0+x)}{f_0-f_1}}dx+\int_{f_1+f}^{f_0} e^{-\frac{\beta(f_0-x)}{f_0-f_1}-\frac{\beta(f_0+f-x)}{f_0-f_1}}dx+$$

$$+\int_{f_0}^{f_0+f} e^{-\frac{\beta(x-f_0)}{f_2-f_0}-\frac{\beta(f_0+f-x)}{f_0-f_1}}dx+\int_{f_0+f}^{f_2} e^{-\frac{\beta(x-f_0)}{f_2-f_0}-\frac{\beta(x-f_0-f)}{f_2-f_0}}dx\Bigg]. \qquad (2)$$

Диапазон частот	Аналитическое выражение для спектральной плотности сигнала
$-f_2 \div -f_0$	$G_1 e^{-\frac{\beta(f_0+x)}{f_0-f_1}}$
$-f_0 \div -f_1$	$G_1 e^{-\frac{\beta(f_0+x)}{f_0-f_1}}$
$f_1 \div f_0$	$G_1 e^{-\frac{\beta(f_0-x)}{f_0-f_1}}$
$f_0 \div f_2$	$G_1 e^{-\frac{\beta(x-f_0)}{f_2-f_0}}$
$(f-f_2) \div (f-f_0)$	$G_1 e^{-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_1}}$
$(f-f_0) \div (f-f_1)$	$G_1 e^{-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_1}}$
$(f_1+f) \div (f_0+f)$	$G_1 e^{-\frac{\beta(f_0+f-x)}{f_0-f_1}}$
$(f_0+f) \div (f_2+f)$	$G_1 e^{-\frac{\beta(x-f_0-f)}{f_2-f_0}}$

После интегрирования и преобразования с учетом $f_2-f_0=f_0-f_1$ получим

$$G_2(f)=2\alpha_2^2G_2^2\left\{\frac{(f_0-f_1)}{\beta}\left[e^{-\frac{\beta f}{f_0-f_1}}-e^{\frac{\beta f}{f_0-f_1}}e^{-2\beta}\right]+fe^{-\frac{\beta f}{f_0-f_1}}\right\}. \qquad (3)$$

Средняя мощность нелинейных помех второго порядка для I зоны при отсутствии предыскажений

$$N_2=\int_0^{f_2-f_1} G_2(f)\,df=2\alpha_2^2G_1^2\left\{\frac{(f_0-f_1)}{\beta}\left[\int_0^{f_2-f_1} e^{-\frac{\beta f}{f_0-f_1}}df-\right.\right.$$

$$\left.\left.-e^{-2\beta}\int_0^{f_2-f_1} e^{\frac{\beta f}{f_0-f_1}}df\right]+\int_0^{f_2-f_1} fe^{-\frac{\beta f}{f_0-f_1}}df\right\}.$$

После интегрирования и преобразований

$$N_2=2\alpha_2^2G_1^2\frac{(f_0-f_1)^2}{\beta^2}[1-e^{-2\beta}(2\beta+1)]. \qquad (4)$$

Спектральная плотность нелинейных помех второго порядка при отсутствии предыскажений для зоны II (рисунок, *б*) равна

$$G_2(f)=\alpha_2^2G_1^2\left[\int_{f_1}^{f-f_0} e^{-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_2}-\frac{\beta(f_0-x)}{f_0-f_1}}dx+\right.$$

$$\left.+\int_{f-f_0}^{f_0} e^{-\frac{\beta(f_0-x)}{f_0-f_1}-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_1}}dx+\int_{f_0}^{f-f_1} e^{-\frac{\beta(x-f+f_0)}{f_0-f_1}-\frac{\beta(x-f_0)}{f_2-f_0}}dx\right]. \qquad (5)$$

После интегрирования и преобразований

$$G_2(f) = \alpha_2^2 G_1^2 \left\{ e^{-\frac{\beta f}{f_0 - f_1}} [f - (f_0 + f_1)] + e^{\frac{-\beta(2f_0 - f)}{f_0 - f_1}} (2f_0 - f) + \right.$$
$$\left. + \frac{(f_0 - f_1)}{2\beta} \left[e^{\frac{\beta(f - 2f_0)}{f_0 - f_1}} - e^{\frac{\beta(2f_1 - f)}{f_0 - f_1}} \right] \right\}. \quad (6)$$

Средняя мощность нелинейных помех второго порядка при отсутствии предыскажений для зоны II

$$N_2 = \alpha_2^2 G_1^2 \left(\frac{(f_0 - f_1)^2}{\beta^2} \left\{ e^{-\frac{2\beta f_1}{f_0 - f_1}} \left[\left(1 + \frac{2\beta f_1}{f_0 - f_1} \right) - e^{-\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} \right] \left[\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1} + 1 \right] \right\} - \right.$$
$$- \frac{(f_0^2 - f_1^2)}{\beta} \left[e^{-\frac{2\beta f_1}{f_0 - f_1}} - e^{-\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} \right] +$$
$$+ 2f_0 \frac{(f_0 - f_1)}{\beta} e^{-\frac{2f_0\beta}{f_0 - f_1}} \left[e^{\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} - e^{\frac{2\beta f_1}{f_0 - f_1}} \right] - \frac{(f_0 - f_1)^2}{\beta^2} e^{-\frac{2f_0\beta}{f_0 - f_1}} \left\{ e^{\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} \times \right.$$
$$\times \left[\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1} - 1 \right] - e^{\frac{2\beta f_1}{f_0 - f_1}} \left[\frac{2\beta f_1}{f_0 - f_1} - 1 \right] \right\} + \frac{(f_0 - f_1)}{2\beta} e^{\frac{\beta}{f_0 - f_1}} e^{-2f_0} \times$$
$$\left. \times (e^{f_1 + f_2} - e^{2f_1}) - \frac{(f_0 - f_1)}{2\beta} e^{\frac{\beta}{f_0 - f_1}} e^{2f_1} [e^{-2f_1} - e^{-(f_1 + f_2)}] \right). \quad (7)$$

Аналогичные вычисления для зоны III (рисунок, *в*) дают

$$N_3 = \int_{f_1 + f_2}^{2f_2} G_2(f)\, df = \alpha_2^2 G_1^2 \left(\frac{(f_0 - f_1)}{2\beta} \left\{ e^{\frac{2\beta f_0}{f_0 - f_1}} (f_2 - f_1) - \right. \right.$$
$$- e^{-\frac{2\beta f_2}{f_0 - f_1}} \frac{(f_0 - f_1)}{2\beta} \left[e^{\frac{4\beta f_2}{f_0 - f_1}} - e^{\frac{2\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} \right] \left. \right\} + e^{\frac{2\beta f_0}{f_0 - f_1}} \left\{ \frac{(f_0 - f_1)^2}{\beta^2} e^{-\frac{2\beta f_2}{f_0 - f_1}} \times \right.$$
$$\times \left(1 + \frac{2\beta f_2}{f_0 - f_1} \right) - \frac{(f_0 - f_1)^2}{\beta^2} e^{-\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} \left[1 + \frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1} \right] - 2f_0 \frac{(f_0 - f_1)}{\beta} \times$$
$$\times \left[e^{-\frac{\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} - e^{-\frac{2\beta f_2}{f_0 - f_1}} \right] \left. \right\} + \frac{(f_0 - f_1)}{2\beta} \left\{ e^{\frac{2\beta f_0}{f_0 - f_1}} \frac{(f_0 - f_1)}{2\beta} \left[e^{-\frac{2\beta(f_1 + f_2)}{f_0 - f_1}} - \right. \right.$$
$$\left. \left. \left. - e^{-\frac{4\beta f_2}{f_0 - f_1}} \right] - e^{-\frac{2\beta f_2}{f_0 - f_1}} (f_2 - f_1) \right\} \right]. \quad (8)$$

Найдем теперь среднюю мощность нелинейных помех для тех же участков спектра при наличии предыскажений. Если в канале связи действует наихудшая аддитивная помеха — белый шум, то для наибольшей эффективности предыскажений при выбранном нами энергетическом спектре сигнала необходимо, чтобы спектральная плотность сигнала на выходе предыскажающего устройства была равномерной [3, 4].

Полагая спектральную плотность мощности сигнала на выходе предыскажающего устройства равномерной, т. е.

$$G'(f) = G_1 e^{-\beta} = \text{const}$$

при $f_1 \leqslant f \leqslant f_2$,

получим следующие выражения для спектральной плотности нелинейных помех второго порядка при наличии предыскажений для каждой из зон интегрирования:

$$G_2'(f) = \begin{cases} 2\alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} (\Delta f - f) & \text{при} \quad 0 \leqslant f \leqslant \Delta f, \\ \alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} (f - 2f_1) & \text{при} \quad 2f_1 \leqslant f \leqslant f_1 + f_2, \\ \alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} (2f_2 - f) & \text{при} \quad f_1 + f_2 \leqslant f \leqslant 2f_2, \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\Delta f = f_2 - f_1.$$

Пользуясь выражениями (9), определяем среднюю мощность нелинейных помех второго порядка при наличии предыскажений.

Для зоны I

$$N_2' = \int_0^{f_2-f_1} G_2'(f)\,df = 2\alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} \int_0^{f_2-f_1} (\Delta f - f)\,df =$$

$$= \alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} (f_2 - f_1)^2.$$

Для зоны II

$$N_2' = \alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} \int_{2f_1}^{f_1+f_2} (f - 2f_1)\,df = \alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} \left[\frac{(f_1+f_2)^2}{2} - 2f_1^2 - \Delta f\right].$$

Для зоны III

$$N_2' = \alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} \int_{f_1+f_2}^{2f_2} (2f_2 - f)\,df = \alpha_2^2 G_1^2 e^{-2\beta} \times$$

$$\times \left[\Delta f (1 + 2f_2) - \frac{(f_1+f_2)^2}{2} + 2f_1^2\right].$$

Для типового телефонного канала найдем ослабление средней мощности нелинейных помех второго порядка в результате влияния предыскажений. Степень ослабления средней мощности нелинейных помех второго порядка можно характеризовать коэффициентом S_2 [2].

Для I зоны имеем

$$S_2 = \frac{N_2}{N_2'} = \frac{1 - e^{-2\beta}(2\beta + 1)}{2\beta^2 e^{-2\beta}}. \qquad (10)$$

Из (10) следует, что ослабление нелинейных помех тем больше, чем сильнее форма огибающей спектра входного сигнала отличается от равномерной, т. е. чем больше коэффициент β.

При $\beta = 2$ из (10) имеем

$$S_2 = 6{,}3$$

или

$$\Delta S_2 = \frac{1}{2} \ln 6{,}3 = 0{,}92 \text{ неп.}$$

Для зоны II при тех же данных

$$S_2 = \frac{0{,}49\alpha_2^2 G_1^2}{0{,}087\alpha_2^2 G_1^2} \approx 5{,}6,$$

$$\Delta S_2 = \frac{1}{2} \ln 5{,}6 = 0{,}86 \text{ неп.}$$

Для зоны III

$$S_2 = \frac{1{,}71\alpha_2^2 G_1^2}{0{,}29\alpha_2^2 G_1^2} \approx 5{,}9$$

$$\Delta S_2 = \frac{1}{2} \ln 5{,}9 \approx 0{,}89 \text{ неп.}$$

Таким образом, при выбранных оптимальных предыскажениях (по отношению к аддитивному белому шуму, действующему в канале связи) средняя мощность нелинейных помех второго порядка уменьшается при-

мерно в 6 раз (на 0,9 неп). Полученные соотношения справедливы для любого из телефонных каналов радиорелейной линии связи. Пользуясь такой же методикой, можно показать, что нелинейные помехи третьего порядка при тех же условиях в результате введения предыскажений уменьшаются в 8—10 раз. Расчетные выражения здесь не приводятся ввиду их громоздкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Бородич. Расчет шумов в каналах радиорелейных линий с частотным уплотнением и частотной модуляцией. «Электросвязь», 1956, № 1.

2. В. К. Маригодов. К оценке степени ослабления нелинейных шумов в канале связи при наличии предыскажений. «Электросвязь», 1966, № 8.

3. В. К. Маригодов, Г. С. Пантелеев. К вопросу оценки эффективности предыскажений при передаче фототелеграфного сигнала по телефонным каналам радиорелейных линий связи. «Электросвязь», 1967, № 7.

4. В. К. Маригодов. К вопросу оценки эффективности предыскажений при различных формах спектров сигналов и помех. «Изв. вузов, Радиоэлектроника», т. 10, № 3, 1967.

ОБУЧЕНИЕ АВТОМАТОВ ОПТИМАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИТУАЦИЙ

И. Б. Сироджа, В. И. Салыга, О. И. Кузьмина

Харьков

Для многих отраслей техники необходимы совершенные автоматические системы, способные принимать решение в сложной быстро меняющейся обстановке. В связи с этим ведутся работы по созданию устройств (автоматов), выполняющих специфические функции распознавания образов (ситуаций). Для опознавания необходимо выбрать правило решения — алгоритм, по которому может быть произведена оптимальная классификация.

В настоящей статье рассматривается задача обучения автомата умению классифицировать ситуации. В процессе функционирования объекта управления возникает множество производственных ситуаций, каждая из которых характеризуется конкретными значениями некоторого набора параметров (числовым вектором), причем этот набор параметров (внешних воздействий) может быть одним и тем же для всех ситуаций. Требуется синтезировать алгоритм, позволяющий сгруппировать ситуации таким образом, чтобы в одной группе они были «похожи» друг на друга и отличались бы от ситуаций, не принадлежащих этой группе. Такие группы ситуаций назовем классами.

Задачу классификации будем трактовать как задачу принятия решения (принятия гипотезы γ_j) о том, что предъявляемая ситуация $\bar{V}$ принадлежит к j-му классу. В математической интерпретации требуется наиболее правильно определить границы областей, соответствующих различным классам. Число распознаваемых классов примем равным N, а число признаков каждого класса n. Каждому эталонному классу соответствует n-мерный вектор

$$\mu_j = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{Q} \bar{V}_{jq} \; (j = \overline{1, N}), \tag{1}$$

где Q — число измерений каждого параметра.