АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ, ПРИВОДЯЩИХ К СБОЯМ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ ПО КАНАЛАМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СВЯЗИ

А. П. Зорько

Харьков

Механизм воздействия импульсных помех на частотно-модулированный сигнал впервые рассмотрен в работе А. М. Зингеренко [1]. При этом рассматривался лишь частный случай воздействия импульсов типа δ — функция Дирака.

Реальные же импульсные помехи, приводящие к сбоям в каналах тонального и надтонального телеграфирования [2], представляют собой достаточно сложную последовательность импульсов — «пачку» импульсов.

Из копии осциллограммы, приведенной на рис. 1, *а*, видно, что данную «пачку» можно рассматривать как последовательность амплитудно-модулированных сигналов, где модулирующим сигналом является последовательность прямоугольных импульсов, а несущей — гармоническое колебание вида

$$U(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0).$$

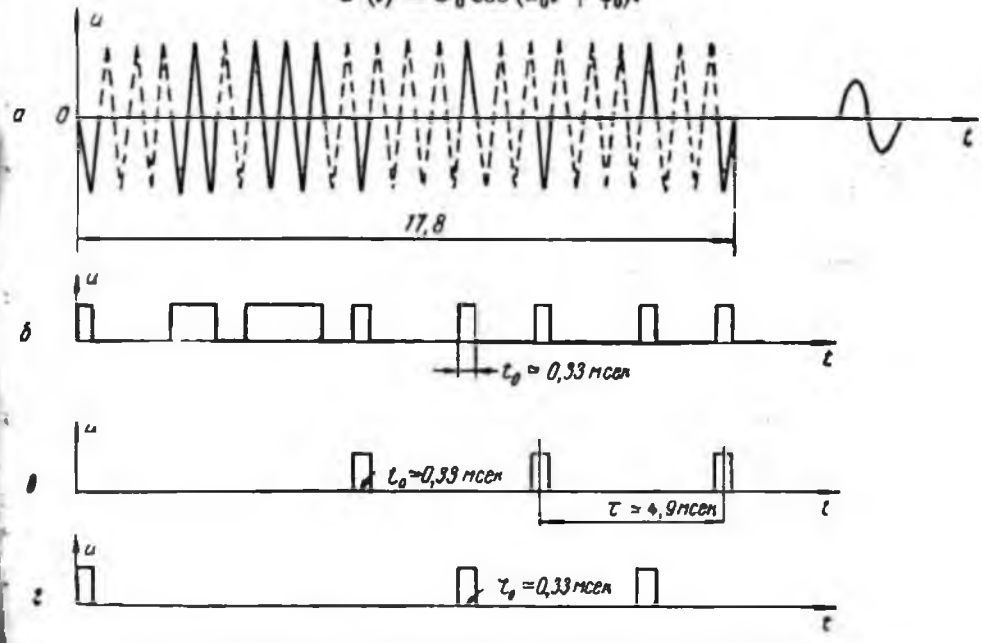


Рис. 1. Характер представления реальных импульсных помех.

Последовательность прямоугольных импульсов рис. 1, *б* носит почти случайный характер по длительности импульсов и длительности интервалов (их длительности кратны длительности элементарного импульса t_0).

Такую последовательность можно представить следующим образом:

$$F(t) = f_{n_1 t_0}(t + k_1 t_0) + f_{n_2 t_0}(t + k_2 t_0) + \ldots + f_{n_j t_0}(t + k_0 t_0) + \ldots =$$

$$= \sum_{i=1}^{N'} f_{n_j t_0}(t + k_i t_0),$$

$$i = 1, 2, 3, \ldots, (N-1) \qquad (1)$$

$$j = 1, 2, 3, \ldots, N,$$

где i — порядковый номер интервала;
k — длительность интервала;
j — порядковый номер импульса;
n — длительность его;
t_0 — длительность элементарного импульса;
N' — число импульсов в пачке.

Импульсы последовательности (1) оказывают различное мешающее влияние на каналы надтонального телеграфирования, работающие в диапазоне 2,8—5,7 *кгц*.

В последовательности необходимо учитывать только те длительности импульсов, реальный спектр которых — 99% мощности спектра,

заключенной в интервале $[0 - 2/t_0]$ — перекрывает интересующий нас диапазон.

С учетом амплитудной модуляции «пачки» данное условие можно представить в виде двух неравенств

$$\left(f_0 - \frac{2}{t_0}\right) \leqslant 2800 \text{ и } \left(f_0 + \frac{2}{t_0}\right) \geqslant 5700,$$

где f_0 — частота несущей, *гц*;

t_0 — длительность импульса, *сек*.

Первому неравенству удовлетворяют любые длительности, поскольку частота несущей (около 1500 *гц*) ниже границы диапазона.

Подставляя во второе неравенство значение несущей и решая его, получим

$$t_0 \leqslant 0{,}00048 \text{ сек} = 0{,}48 \text{ мсек}.$$

С учетом данного ограничения и длительности импульсов, наблюдаемых в канале ($t_0 = 0{,}33$ *мсек*), можно сказать, что наибольшее влияние на каналы надтонального телеграфирования оказывает последовательность элементарных импульсов вида

$$F(t) = f(t + k_1 t_0) + f(t + k_2 t_0) + \ldots + f(t + k_i t_0) = \sum_{i=1}^{N} f(t + k_i t_0), \qquad (2)$$

где N — число элементарных импульсов в пачке.

Последовательность (2) можно представить как комбинацию двух последовательностей, ограниченную периодическую последовательность рис. 1, *в* и последовательностью со случайным интервалом рис. 1, *г*.

Представим ограниченную периодическую последовательность состоящей из центрального импульса и $(m - 1)$ пары отстающих и опережающих импульсов.

Спектр импульса, отстающего на τ *сек* от начала отсчета, равен

$$|S(\omega)\, t - \tau| = S_0(\omega)\, e^{-j\omega\tau}, \qquad (3)$$

где $S_0(\omega)$ — спектр центрального импульса.

С учетом (3) спектр «пачки» импульсов показан на рис. 1, *в*

$$|S(\omega)| = S_0(\omega) + \sum_{k=1}^{m-1} [S_0(\omega)\, e^{-j\omega k\tau} + S_0(\omega)\, e^{j\omega k\tau}] =$$

$$= S_0(\omega)\left[1 + 2\sum_{k=1}^{m-1} \cos \omega k\tau\right], \quad k = 1, 2, 3, \ldots, (m-1), \qquad (4)$$

где k — удаленность периферийной пары импульсов.

Функция

$$|q(\omega)| = \frac{S(\omega)}{S_0(\omega)} = 1 + 2\sum_{k=1}^{m-1} \cos \omega k\tau \qquad (5)$$

определяет структуру спектра внутри области, охваченной более широким спектром импульса $S_0(\omega)$ (огибающая спектра), поэтому достаточно проанализировать только эту функцию.

Выражение (5) представляет совокупность главных лепестков, сосредоточенных у точек $x = 0, 2\pi, 4\pi, \ldots, 2n\pi$, где $n = 0, 1, 2, 3, \ldots, (N - 2)$ и боковых лепестков, максимумы которых сосредоточены у точек

$$x = \frac{3n\pi}{N};\ n = 1, 2, 3, \ldots, (N - 2).$$

(N — число импульсов в пачке).

На рис. 2 показан вид функции $|q(\omega)|$ для «пачки», состоящей из трех импульсов, что соответствует рассматриваемому случаю.

Проанализируем последовательность со случайным интервалом (рис. 1, *в*).

Пусть имеется последовательность импульсов вида

$$F(t) = f(t + t_1) + f(t + t_2) + \ldots + f(t + t_k) + \ldots = \sum_{k=1}^{N} f(t + t_k). \quad (6)$$

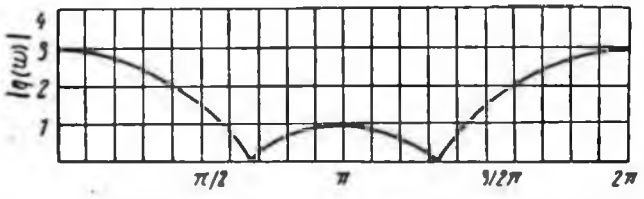


Рис. 2. Вид функции $|q(\omega)|$ для «пачки», состоящей из трех импульсов.

Начало отсчета примем в начале пачки;
спектр пачки

$$S(\omega) = S_0(\omega) \sum_{k=1}^{N} e^{j\omega t_k}; \quad (7)$$

модуль спектра

$$|S(\omega)| = |S_0(\omega)| \left| \sum_{k=1}^{N} e^{j\omega t_k} \right|; \quad (8)$$

квадрат модуля суммы

$$\left| \sum_{k=1}^{N} e^{j\omega t_k} \right|^2 = \left(\sum_{k=1}^{N} \cos \omega t_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{N} \sin \omega t_k \right)^2 =$$

$$= \sum_{k=1}^{N} \cos^2 \omega t_k + \sum_{k=1}^{N} \sin^2 \omega t_k + 2 \sum_{k=1}^{N} \cos \omega t_k \cos \omega t_l +$$

$$+ 2 \sum_{k=1}^{N} \sin \omega t_k \cdot \sin \omega t_l = n + 2 \sum_{k=1}^{N} \cos \omega (t_k - t_l). \quad (9)$$

Поскольку интервалы $(t_k - t_l)$ принимают любые значения с равной вероятностью, равновероятны также будут все значения $\cos(t_k - t_l)$ в интервале $[-1, +1]$ и следовательно, среднее значение

$$\sum_{k=1}^{N} \cos \omega (t_k - t_l)$$

будет флуктуировать около нуля.

Таким образом,

$$\overline{|S(\omega)|} = \sqrt{N} |S_0(\omega)|. \quad (10)$$

Из изложенного выше следует, что структура спектра «пачки» импульсов, следующих со случайными интервалами, не отличается от структуры спектра одиночного импульса. Увеличение числа импульсов приводит лишь к увеличению мощности спектра.

На основании теоремы о сложении спектров [3] можно записать

$$S(\omega) = S_n(\omega) + S_c(\omega), \tag{11}$$

где $S(\omega)$ — результирующий спектр;
$S_n(\omega)$ — спектр «пачки» с равными интервалами;
$S_c(\omega)$ — то же со случайным интервалом.

Подставляя в (11) соответствующие значения (4) и (10), получим

$$|\overline{S(\omega)}| = |S_0(\omega)| \left| 1 + \sqrt{N-p} + 2 \sum_{k=1}^{P-1} \cos \omega k\tau \right|, \tag{12}$$

где N — общее число импульсов в пачке;
$(P-1)$ — число пар импульсов, образующих периодическую пачку.

Для прямоугольных импульсов выражение (12) примет вид

$$|\overline{S(\omega)}| = \left| q \frac{\sin \frac{\omega t_0}{2}}{\frac{\omega t_0}{2}} \right| \cdot \left| 1 + \sqrt{N-P} + 2 \sum_{k=1}^{P-1} \cos \omega k\tau \right|. \tag{13}$$

($q = ht_0$ — площадь элементарного импульса)

Поскольку данная последовательность импульсов модулирована несущей

$$U(t) = U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0),$$

спектр «пачки» импульсов определим как

$$|\overline{S(\omega)}| = \left\{ \left| q \frac{\sin \frac{\omega t_0}{2}}{\frac{\omega t_0}{2}} \right| \cdot \left| 1 + \sqrt{N-P} + 2 \sum_{k=1}^{P-1} \cos \omega k\tau \right| \right\} U_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \tag{14}$$

Спектр «пачки» импульсных помех, приведенной на рис. 1, *а*, показан также на рис. 3.

При построении учтено, что функция

$$\frac{\sin \frac{\omega t_0}{2}}{\frac{\omega t_0}{2}}$$

обращается в нуль при $\frac{\omega t_0}{2} = [0, \pi, 2\pi, \ldots, k\pi]$, следовательно, частота повторения определяется соотношением

$$F_n = \frac{\pi}{2\pi \frac{t_0}{2}} = \frac{1}{t_0} \simeq 3000 \text{ гц}.$$

Функция $|q(\omega)|$ периодична на интервале $[0 - 2\pi]$, и ее частота повторения

$$F_n' = \frac{2\pi}{2\pi\tau} = \frac{1}{kt_0} = \frac{1}{15t_0} \simeq 200 \text{ гц}.$$

Из рис. 3 видно, что спектр «пачки» импульсных помех достаточно неравномерен, оставаясь монотонным. При этом неравномерна и часть спектра помехи, попадающая в диапазон работы одного телеграфного канала.

Таким образом, представление импульсных помех в виде δ — функции Дирака не всегда отражает картину появления сбоев при передаче данных по телеграфным каналам с ЧМ.

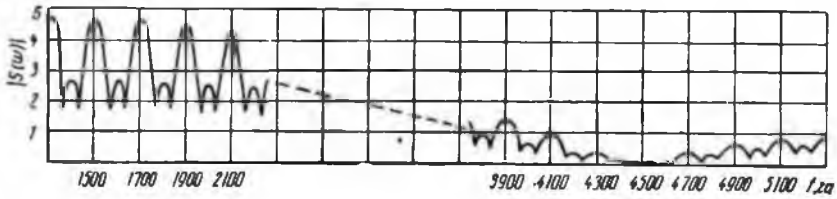


Рис. 3. Спектр реальных импульсных помех, присутствующих в канале.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Зингеренко. Искажения телеграфного импульса в канале тонального телеграфирования при воздействии помехи импульсного типа. «Электросвязь», 1956, № 6.
2. А. П. Зорько. Основные причины ошибок при передаче данных по телеграфным каналам с частотной модуляцией. Труды ХИИТа, вып. 112, Изд-во «Транспорт», 1969.
3. А. А. Харкевич. Спектры и анализ. Гостехиздат, 1962.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ В КАНАЛЕ ПОЕЗДНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Н. Ф. Швачка

Харьков

Теоретические исследования качества передачи в канале поездной радиосвязи показали, что разборчивость речи в радиотракте, образованном на радиостанциях ЖР-3, при действии акустических шумов, электрических помех и волнообразного изменения сигнала отвечает классу качества не выше «удовлетворительно» [7]. Этому классу качества соответствует определенное значение отношения сигнал — помеха, являющееся более удобным критерием оценки работоспособности радиоканала, особенно при приемо-сдаточных и эксплуатационных измерениях.

Основная цель статьи — установить соотношения между известными классами качества передачи речи [3, 4, 5] и соотношение сигнал-помеха в канале поездной радиосвязи. В такой постановке задача решалась рядом авторов [4, 5] и не противоречит рекомендациям МККР [1, 2]. Результаты экспериментальных исследований разборчивости передачи позволят также подтвердить данные теоретического анализа [7].

Методика проведения экспериментальных исследований

Исследования качества передачи в радиоканале из двух радиостанций ЖР-3 проводились артикуляционным методом по слоговой разборчивости в лабораторных условиях в соответствии с требованиями ГОСТа на испытания телефонных аппаратов. Для проведения измерений была отобрана артикуляционная бригада из шести человек с нормальным слухом (согласно медицинскому освидетельствованию) в возрасте 18—21 года и проведена ее предварительная тренировка на близком к «идеальному» и реальных трактах. Выполнялись дополни-