СТАТИСТИЧЕСКОЕ КОДИРОВАНИЕ В ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

В. В. Маслов
Киев

Скорость передачи дискретной информации в частотно-временных системах при переменной длительности сигналов можно повысить путем использования статистического кодирования, которое позволяет сократить среднюю длительность кодовой комбинации на знак передаваемого сообщения, если учитывать при кодировании статистические характеристики последнего.

В связи с тем, что затягивание переходного процесса для сигналов, содержащих разные частотные составляющие, различно, дополнительное замедление при частичном выравнивании фазовой характеристики для каждой посылки

$$\Delta t'_{\text{п}} = t'_{\text{р макс}} - t'_{\text{р мин}},$$

где $t'_{\text{р макс}}$ и $t'_{\text{р мин}}$ — предельные значения времени распространения частотных составляющих посылки.

Время задержки посылки относительно минимальной величины $t_{р\ мин}$ равно

$$\Delta t_п = t'_{р\ макс} - t_{р\ мин}.$$

Для фиксации посылки необходимо, чтобы длительность ее была больше или равна времени нарастания колебаний на фильтрах $t_в$, увеличенному на время задержки $\Delta t_п$, т. е.

$$t_{пос} \geqslant t_в + \Delta t_п.$$

Минимальная длительность посылки

$$t_{пос} = t_в + \Delta t_п.$$

Так как время задержки для разных посылок различно, то при постоянном времени нарастания колебаний на фильтрах посылки будут иметь различную минимальную длительность. Поэтому при расчете можно оперировать лишь средними значениями $\bar{t}_{пос}$ и $\Delta\bar{t}_п$. Тогда

$$\bar{t}_{пос} = t_в + \Delta\bar{t}_п. \qquad (1)$$

Очевидно, средняя длительность посылки $\bar{t}_{пос}$ определяется статистическими характеристиками сообщения. Для простейших — некоррелированных — дискретных сообщений статистические свойства полностью задаются одномерным распределением вероятностей P_i знаков алфавита M.

При симметричном размещении рабочих частот в канале связи все комбинации по длительности можно разбить на $\frac{n_ч}{2}$ (при $n_ч$ — нечетном) или $\frac{n_ч+1}{2}$ (при $n_ч$ — нечетном) групп, где $n_ч$ — количество рабочих частот. Каждая группа характеризуется тем, что входящие в нее комбинации содержат хотя бы одну посылку с замедлением $\Delta t_{пj}$. Тогда средняя длительность замедления посылок определится выражением

$$\Delta\bar{t}_п = \sum_{j=1}^{j=\frac{n_ч}{2}} \Delta t_{пj} P(\Delta t_{пj}) \quad \text{при } n_ч \text{ — четном} \qquad (2)$$

или

$$\Delta\bar{t}_п = \sum_{j=1}^{j=\frac{n_ч+1}{2}} \Delta t_{пj} P(\Delta t_{пj}) \quad \text{при } n_ч \text{ — нечетном,} \qquad (3)$$

где $P(\Delta t_{пj})$ — вероятность появления посылок с замедлением $\Delta t_{пj}$.

Эта величина равна произведению вероятности появления знака, имеющего хотя бы одну посылку с замедлением $\Delta t_{пj}$, на вероятность появления в знаках посылки с замедлением $\Delta t_{пj}$:

$$P(\Delta t_{пj}) = P[\text{зн}(\Delta t_{пj})]\, P[\text{пос}(\Delta t_{пj})].$$

Величина $P[\text{зн}(\Delta t_{пj})]$ равна сумме вероятностей появления знаков $N(\Delta t_{пj})$, содержащих хотя бы одну посылку с замедлением $\Delta t_{пj}$:

$$P[\text{зн}(\Delta t_{пj})] = \sum_{i=1}^{i=N(\Delta t_{пj})} P_i.$$

Вероятность $P[\text{пос}(\Delta t_{пj})]$ определяется отношением количества посылок $N'(\Delta t_{пj})$ в передаваемых знаках с замедлением $\Delta t_{пj}$ к общему количеству посылок, приходящихся на $N(\Delta t_{пj})$ знаков. Если предположить, что каждый знак передается $n_в$ посылками, то

$$P[\text{пос}(\Delta t_{пj})] = \frac{N'(\Delta t_{пj})}{n_в N(\Delta t_{пj})}.$$

БИБЛИОТЕКА ХИРЭ Инв. 526424

Подставляя указанное выражение в (2) и (3), получим

$$\Delta\bar{t}_{\text{п}} = \sum_{j=1}^{j=\frac{n_{\text{ч}}}{2}} \Delta t_{\text{п}j} \frac{N'(\Delta t_{\text{п}j})}{n_{\text{в}} N(\Delta t_{\text{п}j})} \sum_{i=1}^{i=N(\Delta t_{\text{п}j})} P_i \qquad (4)$$

при $n_{\text{ч}}$ — четном;

$$\Delta\bar{t}_{\text{п}} = \sum_{j=1}^{j=\frac{n_{\text{ч}}+1}{2}} \Delta t_{\text{п}j} \frac{N'(\Delta t_{\text{п}j})}{n_{\text{в}} N(\Delta t_{\text{п}j})} \sum_{i=1}^{i=N(\Delta t_{\text{п}j})} P_i$$

при $n_{\text{ч}}$ — нечетном.

При двухчастотных посылках и $n_{\text{ч}} = 6$, $n_{\text{в}} = 2$ комбинации по длительности можно разбить на три группы. В табл. 1 представлены в каждой группе отдельно комбинации, содержащие из двух посылок только одну с замедлением $\Delta t_{\text{п}j}$, и комбинации, содержащие обе посылки с замедлением $\Delta t_{\text{п}j}$.

Таблица 1

№ п/п	1 группа	2 группа		3 группа	
1	34—13	34—24		34—13	
2	34—24	34—35		34—46	
3	34—35	23—13		34—51	
4	34—46		23—24	34—62	
5	34—51		23—35	23—13	
6	34—62	23—46		23—46	
7		23—51		23—51	
8		23—62		23—62	
9		45—13		45—13	
10			45—24	45—46	
11			45—35	45—51	
12		45—46		45—62	
13		45—51			12—13
14		45—62		12—24	
15		12—24		12—35	
16		12—35			12—46
17		56—24			12—51
18		56—35			12—62
19		16—24			56—13
20		16—35		56—24	
21				56—35	
22					56—46
23					56—51
24					56—62
25				61—24	
26				61—35	

В первой группе $N(\Delta t_{\text{п}_1}) = N'(\Delta t_{\text{п}_1}) = 6$. Поэтому

$$P[\text{пос}(\Delta t_{\text{п}_1})] = \frac{6}{2 \cdot 6} = 0{,}5.$$

Вторая группа содержит $N(\Delta t_{\text{п}_2}) = 20$ и $N'(\Delta t_{\text{п}_2}) = 24$. Следовательно, $P[\text{пос}(\Delta t_{\text{п}_2})] = 0{,}6$. В третьей группе $N(\Delta t_{\text{п}_3}) = 26$, $N'(\Delta t_{\text{п}_3}) = 34$ и $P[\text{пос}(\Delta t_{\text{п}_3})] = 0{,}654$.

С учетом полученных значений вероятностей появления посылок с определенными замедлениями выражение (4) для данного примера запишется так:

$$\Delta\bar{t}_{\text{п}} = 0{,}5\Delta t_{\text{п}_1} \sum_{i=1}^{N(\Delta t_{\text{п}_1})} P_i + 0{,}6\Delta t_{\text{п}_2} \sum_{i=1}^{N(\Delta t_{\text{п}_2})} P_i + 0{,}654\Delta t_{\text{п}_3} \sum_{i=1}^{N(\Delta t_{\text{п}_3})} P_i. \qquad (5)$$

При равномерной загрузке всех знаков алфавита вероятность $P_i = \frac{1}{M}$ и

$$\sum_{i=1}^{N(\Delta t_{nj})} P_i = \frac{N(\Delta t_{nj})}{M}.$$

Из табл. 1 видно, что при $M = 32$ $N(\Delta t_{n_1}) = 6$, $N(\Delta t_{n_2}) = 20$, $N(\Delta t_{n_3}) = 26$. Тогда

$$\sum_{i=1}^{N(\Delta t_{n_1})} P_i = 0{,}1875; \quad \sum_{i=1}^{N(\Delta t_{n_2})} P_i = 0{,}625; \quad \sum_{i=1}^{N(\Delta t_{n_3})} P_i = 0{,}814.$$

Подставим полученные значения вероятностей в (5)

$$\Delta\bar{t}_n = 0{,}1875\Delta t_{n_1} + 0{,}625\Delta t_{n_2} + 0{,}814\Delta t_{n3}.$$

В табл. 2 приведены значения Δt_{n_1}, Δt_{n_2}, Δt_{n_3} и $\Delta\bar{t}_n$ для разных рабочих полос ΔF типового телефонного канала систем высокочастотного телефонирования.

Таблица 2

ΔF, *кгц*	Δt_{n_1}, *мсек*	Δt_{n_2}, *мсек*	Δt_{n_3}, *мсек*	$\Delta\bar{t}_n$, *мсек*
1,6	0,05	0,13	0,3	0,213
2,0	0,07	0,2	0,5	0,347
2,4	0,09	0,3	0,85	0,573
2,8	0,12	0,45	1,4	0,905
3,0	0,15	0,55	1,8	1,16

Зависимость среднего значения замедления (*мсек*) от рабочей полосы телефонного канала (*кгц*) можно аппроксимировать выражением

$$\Delta\bar{t}_n = 0{,}44\Delta F^2 - 1{,}3\Delta F + 1{,}21. \qquad (6)$$

Приняв во внимание, что $t_и = \frac{k}{\Delta F}$ [1], и подставив (6) в (1), получим

$$\bar{t}_{пос} = \frac{k}{\Delta F} + 0{,}44\Delta F^2 - 1{,}3\Delta F + 1{,}21.$$

Минимальные значения $\bar{t}_{пос}$ и соответствующие им рабочие полосы ΔF при разных величинах k представлены в табл. 3.

Таблица 3

K	2	3	4	5	6
ΔF, *кгц*	2,1	2,3	2,4	2,5	2,54
$\bar{t}_{пос}$, *мсек*	1,36	1,84	2,3	2,71	3,1

Расчеты показывают, что средняя длительность посылок при частичном выравнивании фазовой характеристики меньше на 6—10% длительности при полном выравнивании. Ширина рабочей полосы при этом также увеличивается на 6—10%.

При неравномерной загрузке посылок задача статистического кодирования заключается в составлении таблицы кодовых комбинаций, для которой величина $\Delta\bar{t}_n$ минимально возможна. Для выполнения этого

условия необходимо выписать знаки алфавита в порядке убывающей вероятности $P_i \geqslant P_j$, где $i < j$. Тогда длительности соответствующих замедлений должны удовлетворять соотношению $\Delta t_{ni} \leqslant \Delta t_{nj}$.

Распределение вероятностей знаков зависит от характера передаваемого сообщения. Нами принято распределение, характерное для некоторых сообщений [2]. В табл. 4 приведены знаки, их вероятности и комбинации частотно-временного неприводимого кода, которыми обозначены знаки.

Таблица 4

№№ п/п	Знаки		Вероятность ×100	Кодовые комбинации
	буквы	цифры		
1	Пробел		10,12	34—35
2	О	9	8,53	34—24
3	Е	3	6,60	45—35
4	А	—	6,25	45—24
5	Р	4	5,83	23—35
6	Буквы		5,05	23—24
7	Цифры		5,05	34—46
8	В	2	4,84	34—26
9	И	8	4,73	34—15
10	Н	;	4,33	34—13
11	С	,	3,86	45—46
12	Я	1	3,82	45—26
13	Т	5	3,57	45—15
14	П	0	3,37	45—13
15	К	(	3,30	23—46
16	Л	)	3,14	23—26
17	У	7	2,55	23—15
18	М	.	2,12	23—13
19	Д	Кто там	2,06	56—35
20	Й	Ю	1,78	56—24
21	Б	Ш	1,69	12—35
22	Г	+	1,69	12—24
23	З	/	1,15	16—35
24	Ь	Ъ	1,05	16—24
25	Ы	=	1,02	56—46
26	Ж		0,79	56—15
27	Х	Щ	0,64	56—13
28	Ц	:	0,49	56—26
29	Ф	Э	0,18	12—46
30	Перевод строки		0,15	12—15
31	Возврат каретки		0,15	12—13
32	Латинские		0,15	12—26
33	Резерв			16—46
34	»			16—15
35	»			16—13
36	»			16—26

Вероятности появления знаков, имеющих хотя бы одну посылку с замедлениями Δt_{n_1}, Δt_{n_2}, Δt_{n_3}, определяются путем суммирования соответствующих вероятностей

$$\sum_{i=1}^{N(\Delta t_{n_1})} P_i = 0{,}376; \quad \sum_{i=1}^{N(\Delta t_{n_2})} P_i = 0{,}775; \quad \sum_{i=1}^{N(\Delta t_{n_3})} P_i = 0{,}53.$$

Подставив полученные значения в (5), получим

$$\Delta\bar{t}_{\text{п}} = 0{,}188\Delta t_{\text{п}_1} + 0{,}465\Delta t_{\text{п}_2} + 0{,}347\Delta t_{\text{п}_3}. \qquad (7)$$

Зависимость $\Delta\bar{t}_{\text{п}}$ от ширины рабочей полосы канала для этого случая можно описать трехчленом

$$\Delta\bar{t}_{\text{п}} = 0{,}29\Delta F^2 - 0{,}87\Delta F + 0{,}847.$$

Подставив значение (7) в (1), запишем

$$\bar{t}_{\text{пос}} = \frac{k}{\Delta F} + 0{,}29\Delta F^2 - 0{,}87\Delta F + 0{,}847.$$

Оптимальные значения ΔF и соответствующие им средние длительности посылок приведены в табл. 5.

Таблица 5

K	2	3	4	5	6
ΔF, *кгц*	2,2	2,4	2,55	2,65	2,7
$t_{\text{пос}}$, *мсек*	1,24	1,68	2,08	2,47	2,83

Выполненные расчеты показывают, что при частичном выравнивании фазовой характеристики и статистическом кодировании средняя длительность посылок может быть укорочена на 13—18% по сравнению с длительностью при выравнивании фазовой характеристики во всем рабочем диапазоне телефонного канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. М'аслов. Определение оптимальной полосы телефонного канала, предназначенного для передачи дискретной информации многочастотными кодами. Вестник Киевского политехнического института, Серия автоматики и приборостроения, № 5, 1968.
2. Д. А. Новик. Эффективное кодирование. Изд-во «Энергия», 1966.

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ВЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В АСИНХРОННЫХ СИСТЕМАХ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Ф. А. Катков, В. М. Вышняков, В. И. Захарченко
Киев

Обратная связь является одним из наиболее распространенных методов повышения верности передачи информации. В системах с попосылочным квитированием обратная связь позволяет автоматически приспосабливать скорость передачи к состоянию канала связи. В этих системах сигнал передается до тех пор, пока не будет получена квитанция по противоположному каналу. Анализ принимаемой информации заканчивается после посылки квитанции, однако если его продолжать, то верность передачи можно повысить. Это достигается при двойном анализе сигнала.

На рис. 1 приведена блок-схема анализатора с двойным анализом для параллельного кода передачи. С его помощью сигнал анализируется в две стадии. Первая — предварительный анализ — представляет собой обычную фильтрацию сигнала с накоплением энергии до уровня сраба-