

## ЦИФРОВОЕ ПОЛУНАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С АДАПТИВНЫМ ПОРОГОМ

Бартенев В.Г., Бартенев М.В.

МВТУ им. Н.Э. Баумана

В докладе приводится пример анализа эффективности сложного цифрового устройства, реализованного на цифровом процессоре обработки сигналов (DSP), на который подавались моделируемые воздействия, формируемые персональным компьютером. Этим достигались две цели: проверка правильности реализованного в DSP алгоритма и его эффективность.

Рассматривается многоканальная схема объединения пространственных, частотных или временных каналов с адаптивным порогом [1], программно реализованная на сигнальном процессоре. Величина порога пропорциональна нормированной сумме амплитуд сигналов на выходе каналов. С порогом сравнивается сигнал максимальной амплитуды. Оценка эффективности такой системы производилась по вероятностным характеристикам. Данная схема объединения каналов может найти применение в системах с автоматическим съемом информации, к которым предъявляется одно из важнейших требований - обеспечение постоянства уровня ложных тревог. Именно применение управляемого порога, реагирующего на изменение интенсивности воздействующих шумов в каждом канале, позволяет решить данную задачу. Оценка эффективности системы производилась методом полунатурного моделирования, когда на плату с сигнальным процессором, программно реализующим исследуемый алгоритм, подаются моделируемые воздействия, формируемые компьютером, а результат обработки этих моделируемых сигналов отображается на мониторе компьютера в виде вероятностных характеристик.

Поступающая на вход многоканальной схемы аддитивная смесь сигнала и шума математически моделировалась на компьютере в предположении, что в каждом из  $N$  каналов имеется по два квадратурных подканала. Квадратурные составляющие каждого канала детектируются квадратичными детекторами и суммируются, образуя квадраты огибающих сигналов. Именно эти сигналы в виде 16 разрядных кодов и подавались на плату с сигнальным процессором. В сигнальном процессоре с помощью схемы отбора максимальной амплитуды выделялся полезный сигнал, действующий в одном из каналов. Сигнал канала, имеющего максимальную амплитуду, подавался на пороговое устройство, уровень отсечки которого пропорционален с коэффициентом  $\alpha$  нормированной сумме входных сигналов действующих на входе схемы максимального отбора.

Оценка эффективности производилась в три этапа. На первом этапе аналитически были вычислены значения нормированного порога для требуемой вероятности ложной тревоги на выходе устройства объединения каналов. Для этого, считая каналы идентичными и независимыми друг от друга, а шум на входе с распределением квадратурных составляющих по нормальному закону с дисперсией  $\sigma_n^2$  и нулевым средним, вероятность ложной тревоги  $P_{FA}$  на выходе рассматриваемой системы есть:

$$\begin{aligned} P_{FA} &= P(Z_1 > \alpha Z_S) + P(Z_2 > \alpha Z_S) + \dots + P(Z_N > \alpha Z_S) + P(Z_1 \text{ и } Z_2 > \alpha Z_S) - \\ &P(Z_1 \text{ и } Z_3 > \alpha Z_S) - \dots - P(Z_{N-1} \text{ и } Z_N > \alpha Z_S) + \dots + P(Z_1 \text{ и } Z_2 \text{ и } \dots \text{ и } Z_N > \alpha Z_S) = \\ &= NP_1 - \frac{N(N-1)}{2!} P_2 + \frac{N(N-1)(N-2)}{3!} P_3 + \dots + P_N \end{aligned} \quad (1),$$

где:

$Z_1, Z_2 \dots Z_N$  - квадраты огибающих сигналов,

$Z_S = Z_1 + \dots + Z_N$  - сумма сигналов, подаваемая на адаптивный порог,

$\alpha$  - коэффициент пропорциональности, определяющий вероятность ложной тревоги,

$P_1, P_2, \dots P_N$  - вероятность превышения порога сигналом одного, двух, ...  $N$  каналов,

соответственно.

Вероятность превышения порога в одном канале

$$P_1 = P(Z_1 > \alpha Z_S) = \int_0^\infty dZ_S \int_0^\infty dZ_N \dots \int_0^\infty dZ_{N-1} \int_{\alpha Z_S}^\infty P(Z_1, \dots, Z_N, Z_S) dZ_1, \quad (2)$$

где:

$P(Z_1, \dots Z_N, Z_S)$  - совместное распределение квадратов огибающих  $N$  каналов и их суммы.

С учетом того, что  $P(Z_i) = \frac{1}{2\sigma_n^2} e^{-\frac{Z_i}{2\sigma_n^2}}$  и  $Z_S = Z_1 + \dots + Z_i + \dots + Z_N$  (2) можно переписать

$$P_1(Z_1 > \alpha Z_S) = \int_0^\infty dZ_S \int_0^{Z_S - \alpha Z_S} dZ_{N-1} \dots \int_{\alpha Z_S}^{Z_S - Z_2 - \dots - Z_{N-1}} \frac{1}{(2\sigma_n^2)^N} e^{-\frac{Z_S}{2\sigma_n^2}} dZ_1 = (1 - \alpha)^{N-1} \quad (3)$$

Аналогично, вероятность превышения порога для любого числа каналов

$$P_k(Z_1 \text{ и } Z_2 \text{ и } \dots \text{ и } Z_k > \alpha Z_S) = (1 - k\alpha)^{N-1} \quad (4)$$

Таким образом, общее выражения для вероятности ложной тревоги для устройства объединения каналов с управляемым порогом будет:

$$P_{FA} = \sum_{k=1}^N C_N^k (-1)^{k+1} (1 - k\alpha)^{N-1} \quad (5)$$

В таблице 1 приведены значения нормированного порога  $d = \alpha N$  для разных вероятностей ложных тревог и разного числа каналов  $N=4,8,16,32$ .

N	4	8	16	32
$10^{-1}$	2.8	3.68	4.56	5.44
$10^{-3}$	3.74	5.67	7.6	9.104
$10^{-5}$	3.944	6.842	9.824	12.24
$10^{-6}$	3.974	7.172	10.7114	13.68

На втором этапе, данные аналитические расчеты были подтверждены полунатурным моделированием. Для этого на плату с DSP подавались моделируемые 16-разрядные выборки шума, и на выходе подсчитывалось число превышений адаптивного порога. При выборке моделируемых отсчетов шума равной 5000 получено практически совпадение частоты превышения порога с расчетной вероятностью ложной тревоги.

На третьем этапе полунатурного моделировались характеристики обнаружителя для моделируемого полезного сигнала со случайной начальной фазой и постоянной амплитудой действовавшего в одном канале. Число выборок сигнала и шума составляло также 5000.

Для оценки потерь в цифровом многоканальном устройстве за счет введения адаптивного порога и конечной разрядной сетки, используемой для реализации исследуемого алгоритма, просчитывались характеристики обнаружения системы с фиксированным порогом на персональном компьютере. Нормированные пороги для моделирования рассчитывались аналитически для задаваемых вероятностей ложных тревог по формуле (2):

$$d = -2 \ln(1 - (1 - P_{FA}^{-n})^{\frac{1}{N}}) \quad (6)$$

В таблице 2 приведены нормированные пороги для  $N=4,8,16,32$  и  $n=1,3,5,6$ .

	4	8	16	32
$10^{-1}$	7.3	8.673	10.05	11.435
$10^{-3}$	16.59	17.974	19.36	20.746
$10^{-5}$	25.784	27.85	28.57	29.957
$10^{-6}$	30.404	31.79	33.176	34.563

Вероятность правильного обнаружения рассчитывалась методом статистического моделирования на персональном компьютере.

Сравнение двух систем реальной на DSP и идеальной показывает, что потери в обнаружении сигнала для системы с регулируемым порогом заметно уменьшаются с ростом числа каналов и при их числе равном 32 они не превышают 1 дБ для вероятности ложной тревоги  $10^{-1} - 10^{-5}$ .

Потери в пороговом сигнале для сравниваемых систем при вероятности ложных тревог  $10^{-1}, 10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-6}$  и вероятности правильного обнаружения 0,5 для сигнала со случайной начальной фазой и постоянной амплитудой приведены в таблице 3.

	4	8	16	32
$10^{-1}$	3	1.5	0.8	0.6
$10^{-3}$	7	3	1.4	0.85
$10^{-5}$	12	4.75	2.2	1.0
$10^{-6}$	14.5	5.5	2.8	1.1

Таким образом, используя методику полунатурного моделирования, удалось не только качественно проверить правильность работы запрограммированного на DSP устройства, которое в дальнейшем легко может быть перенесено в конкретный тракт цифровой обработки информации, но и количественно оценить вероятностные характеристики устройства, наиболее полно характеризующие его эффективность.

#### Литература

1.Бартенев В.Г., Шлома А.М. О нормировании при инвариантном обнаружении сигналов на фоне помех. Радиотехника.-1983.Т.38,№2.-С.17.

2.Бартенев В.Г., Медведев В.Н. Цифровые методы обработки радиолокационных сигналов. – М., ИПК МРП.1987.

