

В. П. МАЙКО, А. Н. ПИСЕЦКИЙ  
(Геленджик)

### АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ СЛЕДЯЩЕГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

Описываемый следящий измеритель может быть применен в схемах цифровых измерительных приборов, измеряющих параметры сигналов (амплитуда, разность фаз и т. д.) на уровне помех. Схема измерителя изображена на рис. 1. Он представляет собой устройство сравнения весов кодов (УСВК), сравнивающее веса кодов отсчета цифрового измерительного прибора (ЦИП) и отсчета реверсивного счетчика (РС). При поступлении импульса на шину опроса УСВК вырабатывает импульс, поступающий на один из входов РС, изменяя его показания в сторону уменьшения разбаланса отсчетов. При равенстве отсчетов ЦИП и РС состояние РС не изменяется. Импульсы на вход опроса УСВК поступают через интервал времени  $T$ . Показания РС отображают значение измеряемого параметра сигнала.

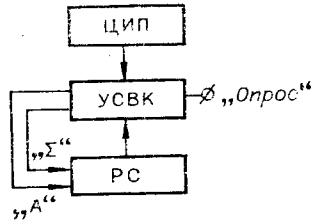


Рис. 1.

Будем считать показания ЦИП аддитивной смесью постоянного во времени полезного сигнала  $M$  и помехи. Таким образом, показания ЦИП можно считать случайной величиной  $\xi$ , принимающей значения  $M+i\Delta$  с вероятностями

$$P_i = P(\xi = M+i\Delta),$$

где  $i = -m, -m+1, \dots, m-1, m$ ;  $\Delta$  — шаг дискретности  $\xi$ . Нетрудно видеть, что показания РС представляют собой функцию  $f$  случайной величины  $\xi$ :

$$f(t_0 + T) = \begin{cases} f(t_0) + 1 & \text{при } f(t_0) < \xi(t_0); \\ f(t_0) & \text{при } f(t_0) = \xi(t_0); \\ f(t_0) - 1 & \text{при } f(t_0) > \xi(t_0), \end{cases} \quad (1)$$

где  $t_0$  — некоторый произвольный момент времени.

Таким образом, показания РС, снятые в равноотстоящие моменты времени с шагом  $T$ , образуют однородную цепь Маркова [1]. Действительно, из определения (1) функции  $f$  следует, что вероятность  $P_{in}(k)$  того, что в  $k$ -й момент времени показание РС равно  $f_n$  при условии, что в  $k-1$ -й момент времени показание РС равно  $f_e$ , не зависит от того, каковы показания РС в более ранние моменты времени.

Рассмотрим случай, когда  $T$  больше интервала корреляции случайной величины  $\xi$ . Значения случайной величины, взятые в равноотстоящие моменты времени с шагом  $T$ , в силу этого можно считать статистически независимыми.

Пусть в  $k$ -й момент времени показание РС равно  $f_i = M+i\Delta$ . Вероятность того, что в  $k+1$ -й момент времени показание РС останется прежним, равна  $P_i$ . Вероятность того, что показание РС станет равным  $f_{i+1}$ , равна  $P_{i+1} + \dots + P_m = \sum_{k=i+1}^m P_k$ . Вероятность того, что показание РС уменьшится на единицу, равна  $P_{i-1} + \dots + P_{-m} = \sum_{k=-m}^{i-1} P_k$ . Вероятности остальных переходов равны нулю.

Таким образом, матрица перехода представляет собой трехдиагональную матрицу

$$R = \begin{pmatrix} P_{-m} & \sum_{k=-m+1}^m P_k & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \sum_{k=-m}^{i-1} P_k & P_i & \sum_{k=i+1}^m P_k & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \sum_{k=-m}^{m-1} P_k & & P_m \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Из физических соображений ясно, что все возможные состояния РС образуют один существенный класс, что, в свою очередь, означает применимость эргодической теоремы.

т. е. существуют предельные вероятности  $Q_i$  нахождения РС в  $i$ -м состоянии ( $i = -m, -m+1, \dots, m-1, m$ ) при  $t \rightarrow \infty$ .

Строка  $Q$  средних предельных абсолютных вероятностей определяется из условия

$$QR = Q. \quad (3)$$

Откуда

$$Q_{i-1} \sum_{j=i}^m P_j + Q_i P_i + Q_{i+1} \sum_{j=-m}^i P_j = Q_i. \quad (4)$$

Таким образом, получаем рекуррентные соотношения:

$$Q_{i+1} = \frac{Q_i(1 - P_i) - Q_{i-1} \sum_{j=i}^m P_j}{\sum_{j=-m}^i P_j}. \quad (5)$$

Рекуррентные соотношения (5) представляют собой  $2m$  уравнений относительно  $2m+1$  неизвестных  $Q_i$ . (Отметим, что  $Q_i = 0$  при  $i < -m$  и  $i > m$ .) Последним  $2m+1$ -м уравнением является условие нормировки

$$\sum_{i=-m}^m Q_i = 1. \quad (6)$$

Нетрудно видеть, что система (5), (6) имеет единственное решение.

Покажем, что если  $P_i = P_{-i}$ , то и  $Q_i = Q_{-i}$ . Из выражения (4) получаем

$$Q_{i-1} = \frac{Q_i(1 - P_i) - Q_{i+1} \sum_{j=-m}^i P_j}{\sum_{j=-i}^m P_j}. \quad (7)$$

Из (5) при  $i = -1$  следует:

$$Q_0 = \frac{Q_{-1}(1 - P_{-1}) - Q_{-2} \sum_{j=-1}^m P_j}{\sum_{j=-m}^{-1} P_j}. \quad (8)$$

Из выражения (7) при  $i = 1$  находим

$$Q_0 = \frac{Q_1(1 - P_1) - Q_2 \sum_{j=-m}^1 P_j}{\sum_{j=1}^m P_j}. \quad (9)$$

Условие  $P_i = P_{-i}$  приводит к равенствам:

$$P_1 = P_{-1}; \quad \sum_{j=1}^m P_j = \sum_{j=-m}^{-1} P_j; \quad \sum_{j=-1}^m P_j = \sum_{j=-m}^1 P_j. \quad (10)$$

С учетом произвольности  $P_i$  из (10) следует, что  $Q_1 = Q_{-1}$ ,  $Q_2 = Q_{-2}$ , откуда с учетом рекуррентных соотношений (5) и (7) получаем, что  $Q_i = Q_{-i}$  для произвольного  $i$ .

Таким образом, при измерении постоянного во времени полезного сигнала, имеющего равновероятные отклонения от среднего значения, оценка сигнала будет несмещенной.

Для численной оценки помехозащищенности следящего измерителя были проведены расчеты на ЭВМ ЕС-1010. За величины  $P_i$ ,  $i = -m, \dots, m$ , была принята плотность нормального распределения. (Так, например, в работе [2] показано, что при отношении сигнал-шум, много большем единицы, распределение фазы в смеси сигнала и помехи подчиняется нормальному закону.) Величины  $Q_i$ ,  $i = -m, \dots, m$ , рассчитывались по формулам (5) с учетом (6). После этого вычислялась величина дисперсии  $\sigma_{\text{ВЫХ}}^2$  показаний РС по плотностям распределения  $Q_i$ .

Кроме расчетов на этой же ЭВМ был поставлен машинный эксперимент по моделированию следящего измерителя. Результаты расчетов и моделирования хорошо со-

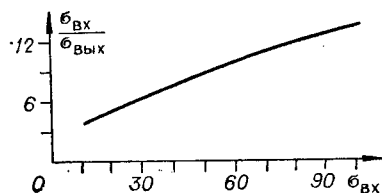


Рис. 2.

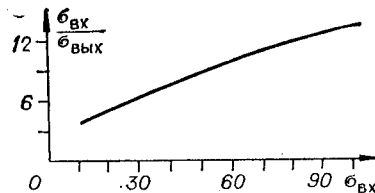


Рис. 3.

гласуются. На рис. 2 и 3 изображена зависимость помехозащищенности следящего измерителя, определяемая как отношение  $\sigma_{\text{вх}}/\sigma_{\text{вых}}$  от  $\sigma_{\text{вх}}$ , где  $\sigma_{\text{вх}}^2$  — дисперсия флуктуаций входного сигнала в выбранных единицах дискрета измеряемой величины.

Полученная зависимость хорошо аппроксимируется выражением

$$\sigma_{\text{вх}}/\sigma_{\text{вых}} = 1,32\sqrt{\sigma_{\text{вх}}} - 0,24. \quad (11)$$

Коэффициенты помехозащищенности, определенные по формуле (11), отличаются от вычисленных ранее не более чем на 10% в диапазоне  $2 \leq \sigma_{\text{вх}} \leq 100$ . Численные коэффициенты в выражении (11) были получены методом наименьших квадратов. Таким образом,  $\sigma_{\text{вых}}$  можно определить по формуле

$$\sigma_{\text{вых}} = \sigma_{\text{вх}} / (1,32\sqrt{\sigma_{\text{вх}}} - 0,24). \quad (12)$$

По описанной выше методике могут быть проведены расчеты помехозащищенности и для других видов распределений, отличных от нормального.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Следящий измеритель обладает помехозащищенностью, возрастающей при увеличении дисперсии флуктуаций входного сигнала.
2. При измерении постоянного во времени полезного сигнала, имеющего равновероятные отклонения от среднего значения, получается несмещенная оценка сигнала.
3. Характеристика помехозащищенности может быть рассчитана аналитически.
4. Следящий измеритель может применяться в цифровых измерителях параметров сигнала на уровне помех.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. М., «Наука», 1969.
2. Цветнов В. В. Статистические свойства сигналов и помех в двухканальных фазовых системах. — «Радиотехника», 1957, № 5.

Поступило в редакцию 10 марта 1977 г.;  
окончательный вариант — 28 января 1978 г.

УДК 621.391

Ю. Е. ДУКАРЕВИЧ, В. Н. НАРВЕР

(Ленинград)

#### ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ СПОСОБ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОКОНТРАСТНОГО ОТСЧЕТНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЫ

Известны голографические методы создания и обработки высококонтрастных изображений в фокальной плоскости телескопов [1]. В связи с этим представляет определенный интерес анализ распределения интенсивности света в голограмме, расположенной непосредственно на входной апертуре приемного устройства. Линейное смещение такого распределения  $x$ , именуемого далее отсчетным изображением, связано с угловым смещением  $\alpha$ , с расстоянием между излучателем и с приемником  $L$  соотношением  $x \cong \alpha L$ . Отсюда следует, что для больших  $L$  ( $\geq 10$  км) возможно создание сверхточных систем пространственной ориентации. Однако для реализации подобного рода устройств необходимо обеспечить малый угловой размер микроструктуры  $\Delta x/L$  отсчетного изображения и высокую контрастность его, что весьма затруднительно из-за наличия тур-