УДК 621.396.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПОМЕХ

д.т.н. Г.В. Алешин, к.т.н. Ю.А. Богданов, к.т.н. А.В. Коломийцев

В статье предложена оценка точности измерителей частоты методом счета числа пересечений сигналом порога в условиях воздействия флуктуационных помех. Сделан вывод о предпочтительности частотных дискриминаторов при малых отношениях сигнал / шум.

Доплеровский измеритель скорости объектов получил широкое распространение ввиду известных достоинств: высокой точности измерений, широкого диапазона измеряемых скоростей и цифровой формы результата измерений. Эти достоинства в высококачественных системах реализуются за счет введения устройств поиска и сопровождения сигнала по частоте (ФАПЧ), т.е. они «покупаются» ценой усложнения аппаратуры и увеличения времени вхождения в связь. Значительное число радиотехнических и лазерных измерителей не используют указанные устройства поиска и сопровождения сигнала по частоте. Это приводит к увеличению погрешности измерений доплеровской частоты в условиях воздействия флуктуационных помех. Поэтому требуется оценить точность измерений частоты такими измерителями при различных отношениях сигнал / шум.

Будем предполагать, что флуктуационный шум представляет собой стационарный гауссов процесс с гауссовой корреляционной функцией, который можно считать адекватной моделью реального шума, прошедшего предварительную фильтрацию в радиосистеме, и что пересечение смеси гармонического сигнала с порогом фиксируется компаратором и затем счетчиком сформированных импульсов.

Мешающий флуктуационный шум с временем корреляции $\mathbf{t_{кор}}$, значительно меньшим времени наблюдения $\mathbf{T}$, приводит в среднем к увеличению числа пересечений смесью сигнала с шумом заданного порога, т.е. к увеличению погрешности измерений доплеровской частоты. Для оценки этого увеличения числа пересечений порога воспользуемся формулой Стратоновича [1]

$$\mathbf{n_0} = \frac{\sqrt{-\mathbf{R}''_\tau(0)}}{2\pi}\exp\left(-\frac{\mathbf{b}^2}{2\sigma^2}\right), \tag{1}$$

где $\mathbf{n_0}$ - частота пересечений порога; $\mathbf{R(\tau)}$ - нормированная корреляционная функция шума; **b** – порог; σ^2 - дисперсия шума.

Нормированная корреляционная функция шума имеет вид:

$$R(\tau) = e^{-\frac{(\alpha\tau)^2}{2}}; \qquad (2)$$

$$R''(\tau) = -\alpha^2 \exp\left(-\frac{\alpha^2\tau^2}{2}\right), \qquad (3)$$

где $\alpha = \frac{1}{t_{кор}}$ - параметр ширины энергетического спектра шума.

Из (1) видно, что с ростом порога число дополнительных за счет шума пересечений порога n_0 уменьшается. Обычно в таких измерителях подсчитывается число переходов смеси через нуль. Поэтому наличие во входной смеси сигнала равносильно тому, как если бы порог менялся по закону

$$b = U_{mc} \sin\omega_0 t, \qquad (4)$$

где U_{mc} - амплитуда сигнала, ω_0 - доплеровская частота сигнала, **t** – время.

Тогда, с учетом (1), (3), (4):

$$n_0(t) = \frac{\alpha}{2\pi} \exp\left\{-\frac{q}{4}\sin^2 \omega_0 t\right\}, \qquad (5)$$

где **q** – отношение сигнал / шум.

Среднее число шумовых пересечений порога за время **T** равно

$$N = \int_0^T n_0(t)dt. \qquad (6)$$

Обозначив $\omega_0 t = x$ и считая, что $f_0 T$ есть целое число **n**, получим

$$N_{T_0} = \frac{\alpha T}{2\pi} P_1(q,n),$$

где

$$P_1(q,n) = \frac{1}{n}\int_0^n e^{-\frac{q}{2}\sin^2 x} dx. \qquad (7)$$

Средняя погрешность оценивания частоты за счет шумов $\Delta f_ш(\alpha,q)$:

$$\Delta f_ш = \frac{N}{T} = \frac{\alpha}{2\pi} P_1(q,n). \qquad (8)$$

Примечательно, что $\mathbf{P(q)}$ не зависит от частоты сигнала $\boldsymbol{\omega_0}$. Это понятно: во сколько раз выше частота сигнала, во столько же раз увеличивается его крутизна и во столько же раз в каждом периоде уменьшается время пребывания процесса над порогом. Поэтому среднее число превышений порога остается неизменным по отношению к частоте $\boldsymbol{\omega_0}$.

Оценим погрешность измерения частоты методом счета числа пересечений порога для случая, когда отношение сигнал/шум велико.

Упростим (8) в первом приближении. Для этого определим интервалы времени, когда частота $\mathbf{n(t)}$ пересечений порога мала, и пренебрежем ею. Будем считать эту частоту малой, если она уменьшится, считая от максимума в $\mathbf{e^2}$ раз. Это соответствует потери точности почти на 10 %. Поэтому

$$\max n(t) = n(0) = \frac{\alpha}{2\pi}$$

и

$$\frac{n(t)}{n(0)} = \exp\left(-\frac{q}{4}\sin^2 \omega_0 t\right) \le \frac{1}{e^2}$$

или

$$\frac{q}{4}\sin^2 \omega_0 t_1 \ge 2 . \qquad (9)$$

Отсюда следует, что мы оцениваем лишь частоту пересечений порога в интервалах времени $[-t_1, t_1]$ в каждом полупериоде сигнала. Из (9) получим

$$t_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\omega_0 \sqrt{q}} . \qquad (10)$$

Для того, чтобы выполнялось соотношение $\frac{t_1}{T} \le \frac{\pi}{2}$, необходимо, чтобы было $\mathbf{q \ge 0{,}1}$. Для больших $\mathbf{q}$ и $\mathbf{n = f_0 T}$:

$$N \approx \frac{2\alpha n}{2\pi}\int_0^{t_1} e^{-\frac{q}{2}\sin^2 \omega_0 t} dt \approx \frac{\alpha n}{\pi\sqrt{q}\omega_0}\int_0^{\sqrt{q}\omega_0 t_1} e^{-\frac{y^2}{2}} dy , \qquad (11)$$

где $\mathbf{y = \sqrt{q}\omega_0 t}$.

Тогда

$$\sqrt{q}\omega_0 t_1 = \frac{\sqrt{q}\omega_0 2\sqrt{2}}{\omega_0\sqrt{q}} = 2\sqrt{2} ;$$

$$\mathbf{N} = \frac{\sqrt{2}\mathbf{T}\alpha}{\pi^{3/2}\sqrt{\mathbf{q}}} = \Phi(2\sqrt{2}),$$

где $\Phi(\mathbf{x_1}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{\mathbf{x_1}} \mathbf{e}^{-\frac{\mathbf{x}^2}{2}}\mathbf{dx}$ - функция Лапласа;

$$\Phi(2\sqrt{2}) = 0{,}4976.$$

Отсюда

$$\Delta \mathbf{f_{cp}} = \frac{\mathbf{N}}{\mathbf{T}} = \frac{0{,}136}{\sqrt{\mathbf{q}}}\alpha, \tag{12}$$

при $\mathbf{q} \geq 8$.

Если смесь сигнала с шумом фильтруется в полосе $\mathbf{П}=\alpha$, то погрешность оценивания частоты сигнала методом счета пересечений порога меньше погрешности оценивания частоты двухканальным частотным дискриминатором, для которого [2]:

$$\Delta \mathbf{f_{4D}} = \frac{\mathbf{П}}{\sqrt{2\mathbf{q}}}$$

при тех же значениях **П** и **q**.

Таким образом, при малых отношениях сигнал/шум (**q < 8**) предпочтение следует отдавать частотным дискриминаторам.

ЛИТЕРАТУРА

1 *Стратонович Е.Л.. Избранные вопросы теории флуктуаций в радиотехнике. – М. : Сов. радио, 1970. – 341 с.*

2 *Алешин Г.В. Основы построения оптимальных информационно - измерительных радиотехнических систем. – Х. : ХВУ, 1994. – 254 с.*

Поступила 24.01.2002

***АЛЕШИН Геннадий Васильевич**, доктор техн. наук, профессор кафедры Харьковского института военно-воздушных сил. В 1962 году окончил Харьковское высшее командно - инженерное училище. Область научных интересов – основы радиоэлектронной системологии.*

***БОГДАНОВ Юрий Алексеевич**, канд. техн. наук, вице - президент Научно - технологичного института трансляции транскрипции и репликации. В 1974 году окончил Харьковский авиационный институт. Область научных интересов – основы радиоэлектронной системологии в геофизике.*

***КОЛОМИЙЦЕВ Алексей Владимирович**, канд. техн. наук, старший инженер Харьковского военного университета. В 1993 году окончил Харьковское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск. Область научных интересов – основы лазерной системологии.*