

УДК 621.396

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТКЛОНЕНИЙ В НАСТРОЙКЕ ВХОДНОГО ФИЛЬТРА В АППАРАТУРЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ С ЧАСТОТНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ НА СМЕЩЕНИЕ ОЦЕНКИ ФАЗЫ СИГНАЛА ПРИ НАЛИЧИИ ПОМЕХИ С НЕСИММЕТРИЧНЫМ СПЕКТРОМ ДЛЯ ФАЗОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

О.А. ЕВТУШЕНКО

Рассматривается влияние несимметрии спектра помехи, вызванной неточностью настройки входного фильтра, на точность фазовых навигационных определений в спутниковых радионавигационных системах с частотным разделением каналов.

Ключевые слова: спутниковая радионавигационная система, фазовые навигационные определения, точность измерения.

В принципе работы спутниковых радионавигационных систем (СРНС) заложена возможность повышения точности местоопределения путем перехода от кодовых навигационных определений (НО) к фазовым. Потребность в таком переходе обусловлена расширением круга навигационных задач (НЗ), требующих повышенной точности НО, которые предполагается решать с использованием СРНС. К ним, например, относятся обеспечение посадки ВС по третьей категории ИКАО.

Особенностью СРНС ГЛОНАСС является то, что в ней в отличие от СРНС GPS используется не кодовое, а частотное разделение каналов. При этом в аппаратуре потребителей (АП) СРНС ГЛОНАСС при ее изготовлении производится компенсация фазовых набегов в каналах радиоприемного устройства (РПУ). В этой связи представляет интерес оценить, насколько эффективна такая процедура в условиях воздействия на РПУ АП помех, имеющих место в условиях эксплуатации. Причиной дополнительных фазовых сдвигов в каналах РПУ, приводящих к снижению точности фазовых НО, может служить неидеальность РЭО, а именно: неточность настройки входного фильтра, приводящая к несимметрии спектра помехи, воздействующей на РПУ. Кроме того, несимметрия спектра помехи может быть обусловлена несимметрией амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра при его низкой добротности.

При анализе точности фазовых измерений в условиях действия помехи с несимметричным спектром исключим из рассмотрения фазовый сдвиг, обусловленный влиянием фазочастотной характеристики неточно настроенного фильтра, поскольку он компенсируется при осуществляемой на чистом сигнале калибровке. Рассмотрению подлежит лишь дополнительная погрешность, возникающая при действии помехи.

Пусть измерению подлежит фаза квазигармонического сигнала

$$S(t) = A(t) \cos(\omega t + \varphi), \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (1)$$

на фоне нестационарной нормальной помехи $n(t)$ с корреляционной функцией

$$B(t, u) = b_1(t, u) \cos \omega(t - u) - b_2(t, u) \sin \omega(t - u), \quad (2)$$

соответствующей в стационарном случае несимметричному спектру помехи.

Функционал отношения правдоподобия для этого случая запишется в виде [1]

$$L[x(t) | \varphi] = \exp \left[-\frac{1}{2} \int_0^\tau A(t) f_1(t) dt \right] \exp \left[2 \cos \varphi \int_0^\tau x(t) v_1(t) dt + 2 \sin \varphi \int_0^\tau x(t) v_2(t) dt \right], \quad (3)$$

где $x(t) = s(t) + n(t); \quad v_1(t) = f_1(t) \cos \omega t + f_2(t) \sin \omega t;$
 $v_2(t) = f_1(t) \cos \omega t - f_2(t) \sin \omega t.$

Здесь $f_1(t), f_2(t)$ - решения интегральных уравнений:

$$\int_0^{\tau} b_1(t, u) f_1(u) du = A(t); \tag{4}$$

$$\int_0^{\tau} b_1(t, u) f_2(u) du = \int_0^{\tau} b_2(t, u) f_1(u) du. \tag{5}$$

При этом оценка максимального правдоподобия фазы сигнала записывается

$$\varphi^* = \text{arctg}(Y/X) + p\pi, \tag{6}$$

где
$$X = \int_0^{\tau} x(t) v_1(t) dt; \quad Y = \int_0^{\tau} x(t) v_2(t) dt; \quad p = \begin{cases} 0, & X > 0; \\ 1, & X < 0. \end{cases}$$

Случайные величины X, Y нормальны, поскольку они получены в результате линейных операций над нормальным случайным процессом $x(t)$. Для средних значений дисперсии случайных величин X, Y и коэффициента корреляции между ними справедливы выражения:

$$\bar{X} = d_1 \cos \tau - \bar{d}_2 \sin \varphi; \quad Y = d_1 \sin \varphi + d_2 \cos \varphi; \quad \sigma_X^2 = \sigma_Y^2 = d_1; \quad R_{XY} = R = d_2/d_1,$$

где
$$d_i = \int_0^{\tau} A(t) f_i(t) dt, \quad i = 1, 2. \tag{7}$$

Рассматривая оценку φ^* как фазу вектора с декартовыми координатами X и Y , путем стандартных преобразований [2] получаем ее плотность вероятностей

$$\begin{aligned} W(\varphi^*) = & \frac{1}{2\pi(1-R^2)^{1/2}(1-R \sin 2\varphi^*)} \exp \left[-\frac{d_1}{2} (1+R^2)(1-2 \sin \psi) \right] + \\ & + \left(\frac{d_1(1+R^2)}{2\pi(1-R^2)} \right)^{1/2} \frac{\cos(\varphi^* - \psi) - R \sin(\varphi^* + \psi)}{(1-R \sin 2\varphi^*)^{3/2}} \times \\ & \times \exp \left\{ -\frac{d_1(1+R^2)}{2(1-R \sin 2\varphi^*)} [\sin^2(\varphi^* - \psi) - R^2(1-2\psi \cos 2\varphi^*)] \right\} \times \\ & \times F \left\{ \left(\frac{d_1(1+R^2)}{1-R \sin 2\varphi^*} \right)^{1/2} [\cos(\varphi^* - \psi) - R \sin(\varphi^* + \psi)] \right\}, \quad |\varphi^*| \leq \pi, \end{aligned} \tag{8}$$

где $\psi = \varphi + \text{arctg} R, F\{\dots\}$ – функция Лапласа.

Анализ (8) показывает, что несимметрия спектра помехи приводит к появлению смещения оценки фазы сигнала, причем для наиболее интересного случая малой несимметрии спектра ($b_2(t, u) \ll b_1(t, u)$) оценка асимптотически нормальна (при $d_1 \rightarrow \infty$) с дисперсией и смещением:

$$\sigma_{\varphi^*}^2 = d_1^{-1}; \tag{9}$$

$$\delta\varphi^* = \text{arctg} \left(\frac{d_2}{d_1} \right). \tag{10}$$

Из (10) видно, что при симметричном спектре помехи ($b_2(t, u) \equiv 0$) смещение оценки отсутствует, поскольку при этом в соответствии с (5) и (7) $f_2(t) \equiv 0, d_2 \equiv 0$.

В качестве иллюстрации полученных соотношений рассмотрим оптимальную оценку фазы сигнала (1) на фоне стационарной нормальной помехи, полученной в результате прохождения белого шума через низкодобротный колебательный контур. Корреляционная функция такой помехи равна [3]

$$B(t-u) = \sigma^2 \exp(-\alpha|t-u|) [\cos \omega(t-u) + (\alpha/\omega) \sin \omega(t-u)], \tag{11}$$

где σ^2 – дисперсия помехи.

Решая совместно интегральные уравнения (4) и (5) и полагая, что $\alpha/\omega \ll 1$, а огибающая сигнала дважды дифференцируема на интервале $[0; \tau]$, выбираемом для простоты равным целому числу периодов сигнала $T = 2\pi / \omega$, с учетом (2), (6), (9) и (11) получаем алгоритм оценки

максимального правдоподобия фазы сигнала и ее точностные характеристики

$$\varphi^* = \arctg \frac{\int_0^{\tau} x(t)r_2(t)dt + C_1(0)x(0) + C_2(\tau)x(\tau)}{\int_0^{\tau} x(t)r_1(t)dt + \left(\frac{1}{\omega}\right)[C_1'(0)x(0) + C_2'(\tau)x(\tau)]} + \rho\pi, \quad (12)$$

где $\rho = \begin{cases} 0 & \text{при знаменателе} > 0; \\ 1 & \text{при знаменателе} < 0; \end{cases}$ $r_1(t) = a(t) \cos \omega t + \left[\frac{a'(t)}{\omega}\right] \sin \omega t;$

$$r_2(t) = \left[\frac{a(t)}{\omega}\right] \cos \omega t - a(t) \sin \omega t; \quad a(t) = \alpha^2 A(t) - A''(t);$$

$$C_1(t) = \alpha A(t) - A'(t); \quad C_2(t) = \alpha A(t) + A'(t);$$

$$\sigma_{\varphi^*}^2 = \frac{2\alpha\sigma^2}{\left(\int_0^{\tau} \left\{ \alpha^2 A^2(t) + [A'(t)]^2 \right\} dt + \alpha [A^2(0) + A^2(\tau)]\right)};$$

$$\delta_{\varphi^*}^2 = \arctg \frac{C_2^2(\tau) - C_1^2(0)}{2\omega \left(\int_0^{\tau} \left\{ \alpha^2 A^2(t) + [A'(t)]^2 \right\} dt + \alpha [A^2(0) + A^2(\tau)]\right)}. \quad (13)$$

Определим смещение оценки [4], полагая, что огибающая сигнала имеет гауссову форму с максимумом в середине интервала наблюдения $[0; \tau]$ $A(t) = A_0 \exp[-\mu(t - \tau/2)^2]$, причем длительность импульса сигнала на уровне 0,1 от $\tau_u = 2/(\mu \lg e)^{1/2} \cong 3,03/\mu^{1/2}$ связана с длительностью интервала наблюдения τ и периодом сигнала $T = 2\pi/\omega$ соотношением

$\tau_u = \tau = 10 T$. Зависимость смещения оценки (13) от отношения α/ω , характеризующего степень асимметрии спектра помехи, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость смещения оценки фазы сигнала от степени несимметрии спектра помехи

α/ω	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
$\delta\varphi^*$, град	0,5	1,3	2,5	4,6	6,3

Результаты данных исследований могут быть использованы также при анализе воздействия на АП СРНС узкополосной помехи от мешающих радиотехнических средств с частотой, близкой к частоте полезного сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаткин Н.Г., Далецкий Ю.Л., Красный Л.Г. Обнаружение сигналов на фоне нестационарных помех // *Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника*. 1970. № 3.
2. Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники*. М.: Советское радио, 1966. Кн. 1.
3. Хелстром К. *Статистическая теория обнаружения сигналов*. М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. Т. 1.
4. Затучный Д.А., Логвин А.И. Критерий уменьшения динамической ошибки в режиме автоматического зависящего наблюдения // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2013. № 189. С. 5-8.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF REJECTIONS IN TUNING OF ENTRANCE FILTER IN APPARATUS OF CONSUMERS OF SATELLITE RADIONAVIGATION SYSTEMS FREQUENCY-DIVISION CHANNELS ON DISPLACEMENT OF ESTIMATION OF PHASE OF SIGNAL AT PRESENCE OF HINDRANCE WITH UNSIMMETRY BY SPECTRUM FOR PHASE NAVIGATION DETERMINATIONS

Evtuchenko O.A.

Influence of unsymmetry of spectrum of the hindrance caused by inaccuracy of tuning of entrance filter is examined, on exactness of phase navigation determinations in a satellite radionavigation systems frequency-division channels.

Keywords: satellite radionavigation system, phase navigation determinations, measuring exactness.

REFERENCES

1. **Gatkin N.G., Daletskiy U.L., Krasnyy L.G.** Obnaruzhenie signalov na fone nestatsionarnykh pomekh. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika*. 1970. № 3. (In Russian).
2. **Levin B.R.** *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiyehniki*. M.: Sovetskoe radio. 1966. Kn. 1. (In Russian).
3. **Khelstrom K.** *Statisticheskaya teoriya obnaruzheniya signalov*. M.: Izd-vo inostrannoy literatury. 1963. T. 1. (In Russian).
4. **Zatuchnyy D.A., Logvin A.I.** Kriteriy umensheniya dinamicheskoy oshibki v rezhime avtomaticheskogo zavisimogo nabludeniya. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*. 2013. № 189. Pp. 5-8. (In Russian).

Сведения об авторе

Евтушенко Олег Александрович, 1970 г.р., окончил ОЛАГА (1992), доцент, кандидат технических наук, директор ГосНИИ «Аэронавигация», автор 14 научных работ, область научных интересов – навигация, управление воздушным движением обеспечение безопасности полетов.