

УДК 621.396.98:629.783

В.П. Пашинцев

Ставропольский военный институт связи РВ, Ставрополь, Россия

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШУМОВОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПСЕВДОДАЛЬНОСТИ В СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ ИОНОСФЕРЫ В СЛОЕ F

Произведен прогноз возрастания шумовой погрешности измерения псевдодальности и времени запаздывания сигналов в спутниковых радионавигационных системах по мере увеличения степени частотно-селективных замираний в трансionoсферном радиоканале при возмущениях ионосферы в слое F, сопровождаемых ростом интенсивности ее неоднородностей.

спутниковые радионавигационные системы, шумовая погрешность измерения, псевдодальность, трансionoсферный радиоканал, ионосфера, слой F

Введение

Известно [1], что в основе методов, применяемых в спутниковых радионавигационных системах (СРНС) для расчета координат объектов лежит высокоточное значение псевдодальности R . Она определяется по результатам измерения времени запаздывания τ сигнала, передаваемого со спутника СРНС, как $R = c\tau$ (где c – скорость света в вакууме). Для уменьшения шумовой погрешности измерения псевдодальности (σ_R) в СРНС передаются широкополосные сигналы (ШПС) с полосой спектра $\Delta F_0 \approx 1$ МГц или 10 МГц на несущей частоте $f_0 \approx 1,6$ ГГц. Выбор таких значений f_0 и ΔF_0 обеспечивает условия распространения радиоволн (РРВ) через атмосферу Земли, при которых принимаемый сигнал подвержен лишь флуктуациям начальной фазы. Использование ШПС обеспечивает повышение потенциальной точности измерения τ в оптимальной схеме обработки сигнала с флуктуирующей фазой на фоне гауссовских шумов [2]. Это следует из выражения $\sigma_\tau = (q\Delta\Omega_s)^{-1}$ для среднеквадратического отклонения (СКО) измерения τ , где $q = \sqrt{2E_T/N_0}$ – отношение сигнал/шум (с/ш) на выходе согласованного фильтра, E_T – энергия принимаемого сигнала, N_0 – спектральная плотность шума, $\Delta\Omega_s$ – эффективная ширина спектра передаваемого сигнала. Однако потенциальные точности измерения времени запаздывания ($\sigma_\tau \sim 10^{-9}$ с) и псевдодальности ($\sigma_R = c\sigma_\tau = c/q\Delta\Omega_s \approx 2 \dots 6$ м) будут достигаться только при РРВ через нормальную (невозмущенную) ионосферу.

При возмущениях ионосферы на высотах ее F-слоя (150...300 км) происходит рост СКО электронной концентрации ($\sigma_{\Delta N}$) в ее неоднородностях и при этом полоса когерентности трансionoсферно-

го канала связи (КС) может сужаться до значений $\Delta F_K < 100$ кГц и менее [3]. В этом случае достигаются отношения $\Delta F_0/\Delta F_K > 10$ или 100 и в СРНС будет выполняться условие $\Delta F_0/\Delta F_K > 1$ возникновения частотно-селективных замираний (ЧСЗ) принимаемых сигналов. Это приведет к росту шумовой погрешности измерения времени запаздывания ($\tau = R/c$) сигнала с ЧСЗ $\sigma_{\tau(ч)}$ и определяемой ею псевдодальности $\sigma_{R(ч)} = c\sigma_{\tau(ч)}$ по сравнению со случаем отсутствия ЧСЗ (когда $\Delta F_0/\Delta F_K \ll 1$):

$$\sigma_{R(ч)} = c\sigma_{\tau(ч)} > c\sigma_\tau = \sigma_R. \quad (1)$$

Целью статьи является оценка увеличения относительной шумовой погрешности измерения псевдодальности ($\sigma_{R(ч)}/\sigma_R$) в СРНС по мере роста степени ЧСЗ ($\Delta F_0/\Delta F_K$) при возмущениях ионосферы в слое F (увеличения $\sigma_{\Delta N}$).

Результаты исследований

Известно [2], что при передаче сигнала с комплексной огибающей $\dot{S}_t(t)$, энергией E_t , нормированной комплексной огибающей $\dot{f}(t) = \dot{S}_t(t)/\sqrt{E_t}$ и несущей частотой $\omega_0 = 2\pi f_0$

$$\begin{aligned} s_t(t) &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \{ \dot{S}_t(t) \exp(j\omega_0 t) \} = \\ &= \sqrt{2} \operatorname{Re} \{ \sqrt{E_t} \dot{f}(t) \exp(j\omega_0 t) \} \end{aligned}$$

по КС с флуктуирующей (неизвестной) начальной фазой принимаемый сигнал отличается от передаваемого лишь ослаблением амплитуды (в $\sqrt{K_{oc}}$ раз) и запаздыванием на время τ :

$$s_\tau(t) = \sqrt{2} \operatorname{Re} \{ \sqrt{E_t K_{oc}} \dot{f}(t-\tau) \exp[j\omega_0(t-\tau)] \}. \quad (2)$$

При РРВ через ионосферу время запаздывания τ сигнала складывается из: 1) времени $t_0 = R_0/c$ его распространения в свободном пространстве на

расстояние R_0 от навигационного спутника (НС) до навигационной аппаратуры потребителей (НАП); 2) поправки на среднее значение группового времени запаздывания волны $\bar{\tau}_r$ с несущей частотой f_0 в ионосферном слое со средней интегральной электронной концентрацией (ЭК) \bar{N}_T [3 – 5]:

$$\tau = t_0 + \bar{\tau}_r = R_0 / c + \delta\bar{R}_r / c = R_0 / c + 40,4\bar{N}_T / cf_0^2, \quad (3)$$

где $\delta\bar{R}_r = 40,4\bar{N}_T / f_0^2$ – поправка на среднее значение группового пути волны в ионосфере. Здесь средняя интегральная ЭК (или полное электронное содержание) по всей высоте h ионосферы определяется как

$$\bar{N}_T = \int_0^{\infty} \bar{N}(h)dh = h_3\bar{N}_m, \quad (4)$$

где h_3 – эквивалентная толщина ионосферы со средней ЭК, соответствующей высоте $h = h_m$ максимума ионизации в слое F ионосферы $\bar{N}_m = \bar{N}(h = h_m)$.

Потенциальная точность измерения времени запаздывания (τ) принимаемого сигнала (2) оптимальной некогерентной схемой (рис. 1) его обработки на фоне гауссовских флуктуационных шумов $n(t)$ определяется величиной СКО, описываемой выражением вида [2]

$$\sigma_\tau = \left[\sqrt{2(E_r / N_0) \Delta\Omega_3} \right]^{-1} = \left(\sqrt{2h^2 \Delta\Omega_3} \right)^{-1} = (\rho\Delta\Omega_3)^{-1}, \quad (5)$$

где $h^2 = E_r / N_0 = E_t K_{oc} / N_0$ – отношение энергии принимаемого сигнала (2) $E_r = E_t K_{oc}$ к спектральной плотности мощности шума N_0 ; $\Delta\Omega_3$ – эффективная ширина спектра сигнала.

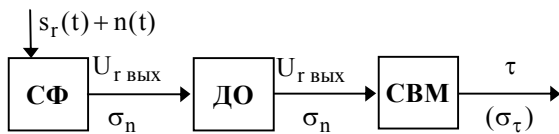


Рис. 1. Оптимальная некогерентная схема измерения времени запаздывания (τ) принимаемого сигнала

На рис.1 обозначены: СФ – согласованный фильтр; ДО – детектор огибающей; СВМ – схема выбора максимума; $U_{Г \text{ Вых}}$ – амплитуда напряжения сигнала на выходе СФ (а также ДО); σ_n – СКО гауссовского шума на выходе СФ (ДО). Отметим, что отношение мощности сигнала на выходе СФ ($P_{Г \text{ Вых}}$) к мощности шума ($P_{н \text{ Вых}}$) в момент времени $t = \tau + T_s$ в схеме рис.1 описывается выражениями

$$q^2 = (P_r / P_n)_{\text{Вых}} = (U_{Г \text{ Вых}} / \sigma_n)^2 = (a_1 E_r / a_1 \sqrt{E_r N_0 / 2})^2 = 2E_r / N_0 = 2h^2, \quad (6)$$

где $a_1 = \text{const}$.

Длительность сигнала T_s определяет ширину его спектра $\Delta F_0 = 1/T_s$. Последняя связана линейной зависимостью с эффективной шириной спектра сигнала $\Delta\Omega_3 = a_2 \Delta F_0 = a_2 / T_s$, где коэффициент $a_2 = \text{const}$ определяется формой огибающей [2]. Например, для сигналов с прямоугольной и колоколообразной формами огибающей спектра $\Delta\Omega_3$ описывается выражениями вида:

$$\Delta\Omega_3 = a_2 / T_s = \pi / \sqrt{3} T_s = \pi \Delta F_0 / \sqrt{3};$$

$$\Delta\Omega_3 = a_2 / T_s = \sqrt{\pi} / T_s = \sqrt{\pi} \Delta F_0. \quad (7)$$

В соответствии с (6 – 7), выражение (5) можно записать в виде

$$\sigma_\tau = T_s / qa_2 = T_s / (U_{Г \text{ Вых}} / \sigma_n) a_2. \quad (8)$$

Анализ выражения (8) показывает, что СКО (σ_τ) времени запаздывания (τ) входного сигнала (2) уменьшается при уменьшении его длительности ($T_s = a_2 / \Delta\Omega_3$) и увеличении амплитуды пика выходного сигнала СФ и ДО ($U_{Г \text{ Вых}} = a_1 E_r$).

Принимаемый сигнал в КС с ЧСЗ описывается выражением вида [3 – 7]

$$s_r(t) = \sqrt{2} \times$$

$$\times \text{Re} \left\{ \sqrt{E_t} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(t - \tau - \lambda) \hat{b}(\lambda) d\lambda \exp[j\omega_0(t - \tau)] \right\}, \quad (9)$$

где $\hat{f}(t - \tau - \lambda)$ – нормированная комплексная огибающая передаваемого сигнала $\hat{f}(t)$ со средним временем запаздывания τ (неизвестная неслучайная величина, подлежащая измерению) и случайным запаздыванием λ ; $\hat{b}(\lambda)$ – низкочастотная импульсная функция КС (комплексный гауссовский процесс с математическим ожиданием $M[\hat{b}(\lambda)] = 0$ и корреляционной функцией $M[\hat{b}(\lambda)\hat{b}^*(\lambda_1)] = 2\sigma_b^2 \sigma_n(\lambda)\delta(\lambda - \lambda_1)$, где $2\sigma_b^2$ – мощность коэффициента передачи (b) КС с релеевскими общими замираниями (ОЗ), а $\sigma_n(\lambda)$ – нормированная функция рассеяния КС по времени).

Причиной появления ЧСЗ принимаемых сигналов СРНС при возмущениях ионосферы в слое F является увеличение флуктуаций ЭК в ее пространственных неоднородностях $\Delta N(\rho, h_m)$ относительно их среднего значения $\bar{N}(h_m)$. Вследствие этого возрастают флуктуации группового времени запаздывания во фронте волны на выходе неоднородного ионосферного слоя $\Delta\tau_r(\rho)$ относительно $\bar{\tau}_r$ [3, 5, 8, 9]

$$\Delta\tau_r(\rho) = 40,4\Delta N(\rho, h_m) / cf_0^2. \quad (10)$$

Последние однозначно определяет флуктуации группового времени запаздывания в точку лучей

$\lambda_i = \Delta\tau_r(\rho_i)$, образованных на поверхности (ρ_i) фронта волны на выходе ионосферы, а также характер функции рассеяния трансionoсферного КС по времени $\sigma_H(\lambda)$.

Погрешность измерения в схеме рис.1 времени запаздывания τ принимаемого сигнала с ЧСЗ (9) проанализируем для простейшего случая передачи сигнала с колоколообразной формой огибающей [2, 4]

$$f(t) = (1/\sqrt{E_t}) \exp(-\pi t^2 / T_s^2) = (1/\sqrt{E_t}) \exp(-t^2 \Delta\Omega_3^2) \quad (11)$$

и эффективной шириной спектра вида (7) $\Delta\Omega_3 = \sqrt{\pi}\Delta F_0 = \sqrt{\pi}/T_s$ по трансionoсферному КС с нормированной функцией рассеяния гауссовского вида [3, 5]

$$\sigma_H(\lambda) = (\sqrt{2\pi}\sigma_\lambda)^{-1} \exp(-\tau^2 / 2\sigma_\lambda^2). \quad (12)$$

Здесь СКО определяется полосой когерентности $\Delta\Omega_K = 2\pi\Delta F_K$ данного КС[3 – 9]:

$$\sigma_\lambda = 2\sqrt{2} / \Delta\Omega_K = \sqrt{2} / \pi\Delta F_K, \quad (13)$$

которая зависит от СКО флуктуаций ЭК в неоднородностях ионосферы $\sigma_{\Delta N} = \langle \Delta N^2(\rho, h_m) \rangle^{1/2} = \beta \bar{N}_m$ согласно выражению

$$\Delta F_K = \frac{cf_0^2}{80,8\pi^{5/4} (2l_s h_3 \sec \theta_0)^{1/2} D_1 \sigma_{\Delta N}}. \quad (14)$$

Здесь $\beta = \sigma_{\Delta N} / \bar{N}_m$ – интенсивность ионосферных неоднородностей; l_s – характерный размер ионосферных неоднородностей; θ_0 – угол возвышения приемной антенны; $D_1 \geq 1$ – коэффициент, характеризующий нарастание дифракционных эффектов во фронте волны по мере ее распространения внутри неоднородного ионосферного слоя и за ним до точки приема на расстоянии h_0 :

$$D_1 = \left[1 + \frac{(3h_0^2 - 3h_0 h_3 + h_3^2)c^2 \sec^2 \theta_0}{384\pi^2 f_0^2 l_s^4} \right]^{1/2}, \quad (15)$$

Следует заметить, что выражение (14) для $\Delta F_K \sim cf_0^2 / \sigma_{\Delta N}$ соответствует известной формуле общего вида для любого многолучевого КС $\Delta F_K \approx 1/\Delta\tau_r$, поскольку согласно выражению (7) $\Delta\tau_r(\rho) \sim \Delta N(\rho, h_m) / cf_0^2$.

На основе выражений (9, 11 – 13) в [4] получена формула для оценки СКО времени запаздывания (τ) сигнала с ЧСЗ в схеме обработки рис.1 в виде

$$\sigma_{\tau(ч)} = \left[2\bar{E}_r \frac{\bar{E}_r \eta_ч}{N_0(N_0 + \bar{E}_r \eta_ч)} \Omega_3^2 \mu_ч \right]^{-1/2} = (2\bar{E}_r C'_ч \Delta\Omega_3^2 \mu_ч)^{-1/2}, \quad (16)$$

где $\bar{E}_r = 2\sigma_b^2 E_t = E_r$ – средняя энергия принимае-

мого сигнала с ЧСЗ, равная его энергии в КС без замираний ($E_r = E_t K_{oc}$);

$$\eta_ч = (1 + 4\Delta F_0^2 / \pi\Delta F_K^2)^{-1/2} \leq 1 \quad (17)$$

коэффициент энергетических потерь (уменьшения $\bar{E}_r = E_r$) при некогерентной обработке в схеме рис. 1 сигнала, подверженного ЧСЗ;

$$\mu_ч = (1 + 4\Delta F_0^2 / \pi\Delta F_K^2)^{-3/2} \leq 1 \quad (18)$$

коэффициент сужения квадрата эффективной ширины спектра ($\Delta\Omega_3^2 = \pi/T_s^2 = \pi\Delta F_0^2$) при некогерентной обработке в схеме рис. 1 сигнала с ЧСЗ;

$$C'_ч = \bar{E}_r \eta_ч / N_0(N_0 + \bar{E}_r \eta_ч).$$

В частном случае отсутствия ЧСЗ (т.е. $\Delta F_0 / \Delta F_K \ll 1$) будем иметь:

$$\eta_ч = 1; \mu_ч = 1; C'_ч = C' = \bar{E}_r / N_0(N_0 + \bar{E}_r). \quad (19)$$

Тогда выражение (16) сводится к известному [2] виду для оценки σ_τ в КС с релейевскими ОЗ, который при отношении $\bar{E}_r / N_0 = E_r / N_0 \geq 10$ (когда $C' \approx 1/N_0$) примерно соответствует формуле (5) для КС без замираний:

$$\sigma_\tau = \left[2\bar{E}_r \frac{\bar{E}_r}{N_0(N_0 + \bar{E}_r)} \Delta\Omega_3^2 \right]^{-1/2} = (2\bar{E}_r C' \Delta\Omega_3^2)^{-1/2} \approx (\sqrt{2\bar{E}_r / N_0} \Delta\Omega_3)^{-1}. \quad (20)$$

По мере увеличения степени ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_K$) указанные коэффициенты уменьшаются: $\eta_ч < 1$, $\mu_ч < 1$, $C'_ч < C'$ и σ_τ (20) возрастает до $\sigma_{\tau(ч)}$ (16).

С учетом (6 – 8) и (20) выражение (16) можно записать в виде, аналогичном (5) и (8):

$$\sigma_{\tau(ч)} = \left[\sqrt{(2E_r / N_0) \cdot A_ч} \Delta\Omega_3 \sqrt{\mu_ч} \right]^{-1} = \frac{T_s / \sqrt{\mu_ч}}{q\sqrt{A_ч} a_2} = \frac{T_s \rho_ч}{(U_{ГВЫХ} l_ч / \sigma_n) a_2}, \quad (21)$$

где

$$\sqrt{A_ч} = \sqrt{\frac{\bar{E}_r \eta_ч}{N_0 + \bar{E}_r \eta_ч}} = \sqrt{\frac{1}{1 + N_0 / \bar{E}_r \eta_ч}} = 1_ч \leq 1 \quad (22)$$

коэффициент уменьшения максимального значения амплитуды сигнала на выходе СФ ($U_{ГВЫХ}$) вследствие ЧСЗ входного сигнала;

$$\rho_ч = 1/\sqrt{\mu_ч} \geq 1 \quad (23)$$

коэффициент увеличения длительности ($T_s = a_2 / \Delta\Omega_3$) сигнала на выходе СФ вследствие ЧСЗ входного сигнала.

Указанные выше эффекты уменьшения амплитуды сигнала на выходе СФ в момент отсчета ($t = \tau + T_s$) и увеличения его длительности обусловлены рассогласованием по форме огибающей при-

нимаемого сигнала, искаженной из-за ЧСЗ, и заложенной в СФ копии передаваемого сигнала.

На рис. 2 показана аддитивная смесь гауссовского шума $n_1(t)$ и амплитуды напряжения сигнала на выходе СФ и ДО $U_{Г\text{ВЫХ}}(t)$ для случаев прихода сигналов с одинаковыми энергиями E_T и длительностями $T_S = a_2 / \Delta\Omega_3$ при отсутствии ($\Delta F_0 / \Delta F_K \ll 1$) и наличии ($\Delta F_0 / \Delta F_K > 1$) в них ЧСЗ.

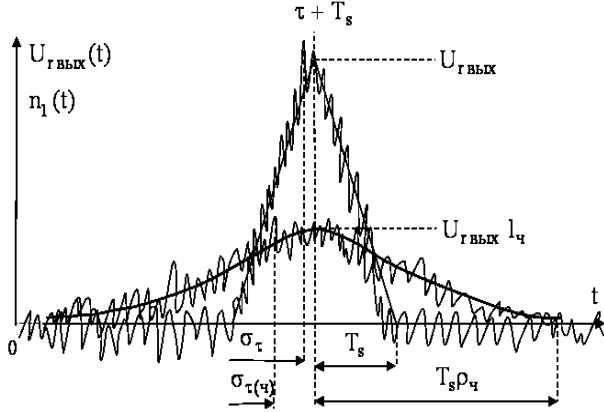


Рис. 2. Влияние «расплывания» отклика согласованного фильтра из-за частотно-селективных замираний входного сигнала на рост погрешности измерения (σ_{τ}) его времени запаздывания (τ)

В последнем случае будет иметь место «расплывание» отклика СФ, которое сопровождается уменьшением его амплитуды $U_{Г\text{ВЫХ}} I_{\text{ч}} < U_{Г\text{ВЫХ}}$ и «остроты» (т.е. увеличением ширины основания $T_S \rho_{\text{ч}} > T_S$). В силу одновременного действия этих двух величин согласно выражениям (21) и (8) величина СКО времени запаздывания сигнала, подверженного ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_K > 1$), в схеме измерения рис. 1 может существенно возрасти по сравнению со случаем отсутствия ЧСЗ ($I_{\text{ч}} = \rho_{\text{ч}} = 1$):

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau(\text{ч})} &= T_S \rho_{\text{ч}} / (U_{Г\text{ВЫХ}} I_{\text{ч}} / \sigma_n) a_2 > \sigma_{\tau} = \\ &= T_S / (U_{Г\text{ВЫХ}} / \sigma_{\tau}) a_2. \end{aligned} \quad (24)$$

Анализ рис. 2, и соотношений (8) и (24), показывает, что увеличение ширины спектра передаваемого сигнала $\Delta F_0 = 1/T_S$ за счет уменьшения его длительности $T_{S1} < T_{S2}$ (или прямого расширения спектра, когда

$$\Delta F_0 = B_s / T_s = 1/T_3,$$

где $B_s = T_s \Delta F_0 = T_s / T_3 \gg 1$ – база ШПС с длительностью элемента сигнала T_3) обеспечит уменьшение СКО времени запаздывания принимаемого сигнала ($\sigma_{\tau 1} < \sigma_{\tau 2}$) только в КС без ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_K \ll 1$). В транссионосферных КС с ограниченной полосой когерентности (ΔF_K) увеличение ширины спектра сигнала до значений, когда начинает выполняться условие возникновения ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_K > 1$) приведет к

увеличению рассматриваемого СКО ($\sigma_{\tau(\text{ч})} > \sigma_{\tau}$).

Следовательно, при заданной $\Delta F_K = \text{const}$ транссионосферного КС существует оптимальное значение ширины спектра передаваемого сигнала $\Delta F_0 = \Delta F_{0\text{opt}}$, при котором достигается минимальная величина погрешности измерения в схеме рис. 1 времени запаздывания $\sigma_{\tau(\text{ч})} = \sigma_{\tau(\text{ч})\text{min}}$.

Выражение (16) для дисперсии $\sigma_{\tau(\text{ч})}^2$ с учетом (17, 18) можно записать в виде суммы:

$$\sigma_{\tau(\text{ч})}^2 = \frac{(1 + 4\Delta F_0^2 / \pi \Delta F_K^2)^{3/2}}{2\pi \Delta F_0^2 \bar{E}_T / N_0} + \frac{(1 + 4\Delta F_0^2 / \pi \Delta F_K^2)^2}{2\pi \Delta F_0^2 (\bar{E}_T / N_0)^2}. \quad (25)$$

Анализ выражения (25) показывает, что для обычно реализуемого в СРНС отношения сигнал/шум $\bar{E}_T / N_0 \geq 10^3$ [1] второе слагаемое будет на порядок меньше первого при значениях $\Delta F_0 / \Delta F_K \leq 10^2$. Поэтому для указанных отношений формулу (25) можно записать в приближенном виде как

$$\sigma_{\tau(\text{ч})}^2 \approx (1 + 4\Delta F_0^2 / \pi \Delta F_K^2)^{3/2} / (2\pi \Delta F_0^2 \bar{E}_T / N_0). \quad (26)$$

Заметим, что при выполнении условия отсутствия ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_K \ll 1$) выражение (26) сводится к виду (5) для случая (7) $\Delta\Omega_3 = \sqrt{\pi} \Delta F_0$:

$$\sigma_{\tau}^2 \approx [2\pi \Delta F_0^2 (E_T / N_0)]^{-1} = [2(E_T / N_0) \Delta\Omega_3^2]^{-1}, \quad (27)$$

Приравняв к нулю производную от функции $\sigma_{\tau(\text{ч})}^2$ (26) по ΔF_0 , получим уравнение, решение которого дает искомую формулу для выбора оптимальной ширины спектра передаваемого сигнала по транссионосферному КС с ограниченной полосой когерентности (ΔF_K):

$$\Delta F_0 = \Delta F_{0\text{opt}} = \sqrt{0,5\pi} \Delta F_K. \quad (28)$$

При оптимальной ширине спектра передаваемого сигнала (28) погрешность (СКО) измерения в схеме рис. 1 времени запаздывания сигнала с ЧСЗ (26) будет иметь минимальное значение:

$$\sigma_{\tau(\text{ч})} = \sigma_{\tau(\text{ч})\text{min}} \approx 3^{3/4} [2\pi \Delta F_0^2 (\bar{E}_T / N_0)]^{-1/2}, \quad (29)$$

которое лишь в $3^{3/4} \approx 2,28$ раз превышает погрешность измерения времени запаздывания (σ_{τ}) сигнала без ЧСЗ (27).

В соответствии с выражением (26) на рис. 3 построены графики зависимости погрешности измерения времени запаздывания сигналов $\sigma_{\tau(\text{ч})}$ и псевдодальности $\sigma_{R(\text{ч})} = c\sigma_{\tau(\text{ч})}$ от степени их ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_K = 0,1 \dots 10^2$) при величине $\Delta F_K = 1\text{МГц}$ и типовых отношениях сигнал/шум на входе приемника СРНС: $\bar{E}_T / N_0 = 10^3 \dots 10^5$ (30...50 дБ) [1]. Анализ этих графиков показывает, что при отношении

$\Delta F_{0opt} / \Delta F_k = \sqrt{0,5\pi} \approx 1,25$ наблюдается минимум погрешностей $\sigma_{\tau(ч)}$ и $\sigma_{R(ч)}$, значение которых возрастают почти на порядок при $\Delta F_0 / \Delta F_k \approx 10^2$ (например, $\sigma_{R(ч)} \approx 500\text{м}$ для $\bar{E}_r / N_0 = 10^3$).

Поскольку $\sigma_{R(ч)} = c \sigma_{\tau(ч)} > \sigma_R = c \sigma_{\tau}$ (согласно (1)), то в качестве меры возрастания шумовой погрешности измерения псевдодальности по результатам обработки сигналов с ЧСЗ в схеме рис.1 по сравнению со случаем их отсутствия целесообразно использовать величину отношения СКО (16) к (5):

$$\Delta R = \frac{\sigma_{R(ч)}}{\sigma_R} = \frac{\sigma_{\tau(ч)}}{\sigma_{\tau}} = \frac{(2\bar{E}_r C'_ч \Delta\Omega_3 \mu_ч)^{-1/2}}{\left[2(\bar{E}_r / N_0) \Delta\Omega_3\right]^{-1/2}} = \left[1 + \left(\frac{\bar{E}_r}{N_0}\right)^{-1} \eta_ч^{-1}\right]^{1/2} \mu_ч^{-1/2} = \left[1 + \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi\Delta F_k^2}\right)^{1/2} / \left(\frac{\bar{E}_r}{N_0}\right)\right]^{1/2} \left(1 + \frac{4\Delta F_0^2}{\pi\Delta F_k^2}\right)^{3/4} \quad (30)$$

Анализ полученного выражения (30) показывает, что возрастание шумовой погрешности измерения псевдодальности слабо зависит от входного отношения с/ш (\bar{E}_r / N_0) и определяется в основном степенью ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k$). При выполнении соотношения ($\bar{E}_r / N_0 \gg \Delta F_0 / \Delta F_k$) формула (30) сводится к виду, соответствующему отношению СКО (26) к (27):

$$\Delta R = \sigma_{R(ч)} / \sigma_R = \sigma_{\tau(ч)} / \sigma_{\tau} \approx (1 + 4\Delta F_0^2 / \pi\Delta F_k^2)^{3/4} \quad (31)$$

В соответствии с выражением (30) на рис. 4 построены графики зависимости относительной погрешности измерения псевдодальности в СРНС ($\Delta R = \sigma_{R(ч)} / \sigma_R$) от превышения полосы их спектра над полосой когерентности КС ($\Delta F_0 / \Delta F_k$) при фиксированных отношениях сигнал/шум ($\bar{E}_r / N_0 = E_r / N_0$).

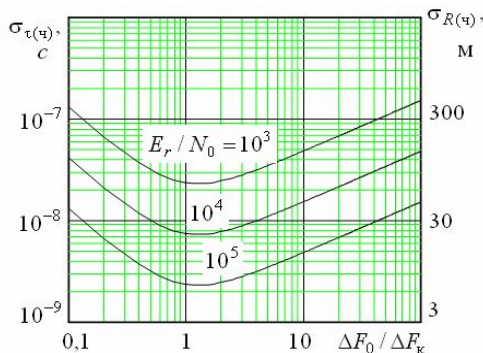


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения времени запаздывания сигнала $\sigma_{\tau(ч)}$ от степени ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k$)

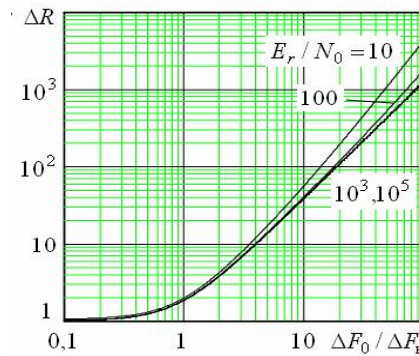


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности $\Delta R = \sigma_{\tau(ч)} / \sigma_R$ измерения псевдодальности в СРНС от степени ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k$)

Анализ графиков на рис.4 показывает, что при типовых параметрах сигналов СРНС ($\Delta F_0 \approx 1\text{МГц}$, $E_r / N_0 \approx 10^4$) и сужении полосы когерентности $\Delta F_k \sim f_0^2 / \sigma_{\Delta N}$ трансионосферных КС до значения $\Delta F_k \approx 1\text{МГц}$ (когда $\Delta F_0 / \Delta F_k = 1$) при сильных возмущениях слоя F ионосферы (характеризуемых $\sigma_{\Delta N} \approx 5 \cdot 10^{13}$ эл/м³), шумовая погрешность измерения псевдодальности $\sigma_{R(ч)}$ возрастет в 2 раза, а при $\Delta F_k = 100\text{кГц}$ (когда $\Delta F_0 / \Delta F_k = 10$) – в 40 раз по сравнению с обеспечиваемым значением $\sigma_R = 2...6$ м при нормальной ионосфере (когда $\sigma_{\Delta N} \approx 5 \cdot 10^9$ эл/м³, $\Delta F_k \approx 10\text{ГГц}$ и отсутствуют ЧСЗ). При передаче в СРНС сигналов с $\Delta F_0 = 10\text{МГц}$ по КС с $\Delta F_k = 100\text{кГц}$ (когда $\Delta F_0 / \Delta F_k = 100$) относительная шумовая погрешность измерения псевдодальности возрастет до $\sigma_{R(ч)} / \sigma_R \approx 10^3$. При этом компенсация роста относительной шумовой погрешности измерения псевдодальности в СРНС из-за ЧСЗ ($\sigma_{R(ч)} / \sigma_R$) за счет увеличения энергетического отношения сигнал/шум ($E_r / N_0 > 10^5$) невозможна.

Выводы

Таким образом, при возмущениях ионосферы в слое F, вызывающих рост флуктуаций ЭК в неоднородностях ($\sigma_{\Delta N}$) и отношения ($\Delta F_0 / \Delta F_k$) ширины спектра передаваемого сигнала к полосе когерентности трансионосферного канала, шумовая погрешность измерения псевдодальности (σ_R) в СРНС может возрастать по сравнению с условиями нормальной ионосферы ($\sigma_R = 2...6\text{м}$) в 40...1000 раз, достигая значений $\sigma_R \approx 80...6 \cdot 10^3$ м. Уменьшить эту погрешность за счет увеличения отношения сигнал/шум на входе приемника (E_r / N_0) невозможно, поскольку она обусловлена рассогласованием по форме огибающей при-

нимаемого сигнала, подверженного ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k > 1$), с копией передаваемого сигнала, заложеной в схеме обработки (рис.1). Поэтому наиболее предпочтительным путем уменьшения шумовой погрешности измерения псевдодальности в этих условиях функционирования СРНС является увеличение несущей частоты передаваемого сигнала с $f_0 \sim 1$ ГГц до $\sim 20...40$ ГГц, что позволяет значительно расширить полосу когерентности трансионосферного КС $\Delta F_k \sim f_0^2 / \sigma_{\Delta N}$ и уменьшить степень ЧСЗ ($\Delta F_0 / \Delta F_k$).

Список литературы

1. Волков Н.М. и др. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС // Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 1. – С. 31-46.
2. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Наука, 1992. – 304 с.
3. Маслов О.Н., Пашинцев В.П. Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи / Прил. к журналу “Инфокоммуникационные технологии”. – Самара, ПГАТИ, 2006. – Вып. 4. – 357 с.
4. Пашинцев В.П. Влияние частотно-селективных замираний на измерение времени запаздывания сигналов в системах космической связи // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 4. – С. 410-414.
5. Пашинцев В.П., Колосов Л.В., Тишкин С.А., Смирнов А.А. Влияние ионосферы на обнаружение сигналов в системах космической связи // Радиотехника и электроника. – 1999. – Т. 44, № 2. – С. 143-150.
6. Пашинцев В.П., Тишкин С.А., Солчатов М.Э. Влияние частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции на помехоустойчивость высокоскоростных систем космической связи // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2001. – № 9. – С. 49-60.
7. Пашинцев В.П., Стрекалов А.В., Солчатов М.Э., Боровлев И.И. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с произвольными базами в каналах космической связи с ограниченной полосой когерентности // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 2002. – № 1. – С. 23-32.
8. Пашинцев В.П., Сапожников А.Д., Вититлов Л.Л. Аналитическая методика оценки влияния ионосферы на помехоустойчивость систем космической связи // Радиотехника. – 1991. – № 11. – С. 80–83.
9. Пашинцев В.П., Солчатов М.Э., Гахов Р.П. Влияние ионосферы на характеристики космических систем передачи информации: Монография. – М.: Физматлит, 2006. – 184 с.

Поступила в редколлегию 1.08.2007

Рецензент: д-р техн. наук проф. Ю.В. Стасев, Харьковский университет воздушных сил им. И. кожедуба, Харьков.