

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  $\tau$  сигнала, передаваемого со спутника СРНС, как  $R = c\tau$  (где  $c$  – скорость света в вакууме). Для уменьшения шумовой погрешности измерения псевдодальности ( $\sigma_R$ ) 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  $\Delta F_0$  обеспечивает условия распространения радиоволн (РРВ) через атмосферу Земли, при которых принимаемый сигнал подвержен лишь флуктуациям начальной фазы. Использование ШПС обеспечивает повышение потенциальной точности измерения  $\tau$  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  $\tau$ , 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  $\tau$ :

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

При РРВ через ионосферу время запаздывания  $\tau$  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 ( $\tau$ ) 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.

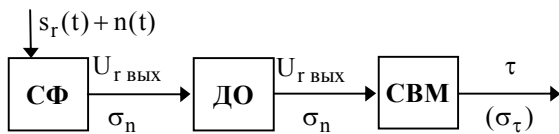


Рис. 1. Оптимальная некогерентная схема измерения времени запаздывания ( $\tau$ ) принимаемого сигнала

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

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

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

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

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

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  $\tau$  (неизвестная неслучайная величина, подлежащая измерению) и случайным запаздыванием  $\lambda$ ;  $\hat{b}(\lambda)$  – 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 релейскими 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 определяют флуктуации группового времени запаздывания в точку лучей

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

Погрешность измерения в схеме рис.1 времени запаздывания  $\tau$  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]

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

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;  $\theta_0$  – 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 ( $\tau$ ) 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  $\sigma_\tau$  в КС с релейскими 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  $\sigma_\tau$  (20) возрастает до  $\sigma_{\tau(ч)}$  (16).

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

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

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 ( $U_{r\text{вых}}$ ) 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.

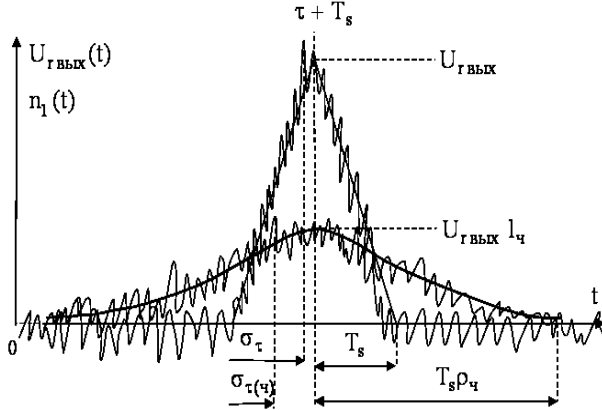


Рис. 2. Влияние «расплывания» отклика согласованного фильтра из-за частотно-селективных замираний входного сигнала на рост погрешности измерения ( $\sigma_{\tau}$ ) его времени запаздывания ( $\tau$ )

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 ( $I_{\text{ч}} = \rho_{\text{ч}} = 1$ ):

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

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 ( $\Delta F_K$ ) 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  $\Delta F_0$ , получим уравнение, решение которого дает искомую формулу для выбора оптимальной ширины спектра передаваемого сигнала по транссионосферному КС с ограниченной полосой когерентности ( $\Delta F_K$ ):

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

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 ( $\sigma_{\tau}$ ) 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 ( $\bar{E}_r / N_0 = E_r / N_0$ ).

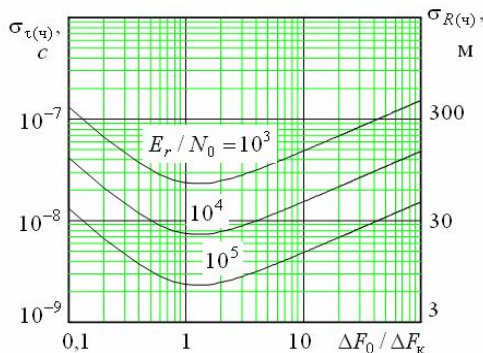


Рис. 3. Зависимость погрешности измерения времени запаздывания сигнала  $\sigma_{\tau(ч)}$  от степени ЧСЗ ( $\Delta F_0 / \Delta F_k$ )

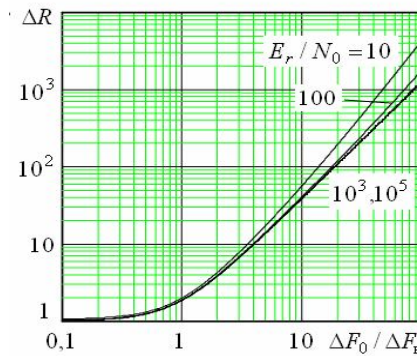


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности  $\Delta R = \sigma_{\tau(ч)} / \sigma_R$  измерения псевдодальности в СРНС от степени ЧСЗ ( $\Delta F_0 / \Delta F_k$ )

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/м<sup>3</sup>), 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/м<sup>3</sup>,  $\Delta F_k \approx 10\text{ГГц}$  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 ( $\sigma_R$ ) в СРНС может возрастет 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, заложенной 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  $\sim 20 \dots 40$  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.