

УДК 621.396.98: 629.783

## ШУМОВАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПСЕВДОДАЛЬНОСТИ В СПУТНИКОВОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ВОЗМУЩЕНИЯХ ИОНОСФЕРЫ

Чипига А.Ф., Слюсарев Г.В.

ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет»,  
Ставрополь, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru

Показано, что возмущения ионосферы в слое  $F$ , сопровождающиеся увеличением флуктуаций электронной концентрации, способны привести к возникновению частотно-селективных замираний принимаемых сигналов и повышению шумовой составляющей погрешности определения псевдодальности в спутниковой радионавигационной системе «ГЛОНАСС». Получена аналитическая зависимость этой погрешности от превышения ширины спектра сигнала над полосой когерентности трансionoсферного канала и отношения сигнал/шум на входе приемника измерения псевдодальности. Показано, что в условиях возмущений ионосферы в слое  $F$  шумовая погрешность измерения псевдодальности может существенно возрастать по сравнению с условиями нормальной ионосферы, достигая значений 15 м в одночастотном режиме работы и 80 м – в двухчастотном и дифференциальном режимах работ.

**Ключевые слова:** спутниковая навигация, псевдодальность, шумовая погрешность, неоднородности ионосферы, полоса когерентности, частотно-селективные замирания

## NOISE ERROR IN DETERMINING THE PSEUDORANGE SATELLITE RADIO NAVIGATION SYSTEM AT IONOSPHERIC DISTURBANCES

Chipiga A.F., Slyusarev G.V.

FGAOU VPO «North Caucasian Federal University», Stavropol, e-mail: lubenchov@nti.ncstu.ru

It is shown that the perturbations in the ionosphere layer  $F$ , accompanied withdrawn-cheniem fluctuations of the electron density, can lead to the appear- veniyu-frequency selective fading of the received signals and increase the noise component of the error in the determination of the pseudo-satellites howling radio navigation system «Glonass». The analytical ble this error from exceeding the width of the signal over the coherence bandwidth of the channel transionoсpheric and signal / noise ratio at the input-receiver pseudo-range measurements. It is shown that under conditions of ion-sphere perturbation in the fiber noise measurement error can significantly increase the pseudo compared to the normal conditions of the ionosphere, reaching values of 15 m in single-frequency mode and 80 meters – in two-frequency and differential modes of operation.

**Keywords:** satellite navigation, pseudo-noise, error, ionospheric irregularities, coherence bandwidth, frequency-selective fading

Известно [1], что погрешность определения координат в навигационной аппаратуре потребителя (НАП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС) прямо пропорционально зависит от погрешности измерения псевдодальности  $\delta R$  до каждого из навигационных спутников. Она определяется как сумма ее составляющих, обусловленных различными причинами: влиянием ионосферы ( $\delta R_{\text{ион}}$ ), тропосферы ( $\delta R_{\text{троп}}$ ), шумов приемника ( $\delta R_{\text{шум}}$ ) и целым рядом других факторов ( $\delta R_{\text{др}}$ ):

$$\delta R = \delta R_{\text{ион}} + \delta R_{\text{троп}} + \delta R_{\text{шум}} + \delta R_{\text{др}}. \quad (1)$$

Наибольший вклад в погрешность определения псевдодальности  $\delta R = 30$  м вносит ионосферная составляющая  $\delta R_{\text{ион}} \approx 15$  м и шумовая ( $\delta R_{\text{шум}}$ ), характеризуемая величиной среднеквадратического отклонения (СКО)  $\sigma_{R_{\text{шум}}} \approx 3$  м. Для устранения ионосферной составляющей погрешности измерения псевдодальности ( $\delta R_{\text{ион}} \approx 0$  м) в СРНС «ГЛОНАСС» используются режим

работы НАП на двух несущих частотах ( $f_{0в} = 1,6$  ГГц,  $f_{0н} = 1,25$  ГГц) и дифференциальный режим работы. Для уменьшения шумовой составляющей измерения псевдодальности до значений  $\sigma_{R_{\text{шум}}} < 1$  м в СРНС используют широкополосные сигналы с шириной спектра  $\Delta F_0 = 1$  МГц и  $\Delta F_0 = 10$  МГц.

Однако при воздействии возмущающих факторов на слой  $F$  ионосферы (на высотах 150...300 км) возникают интенсивные флуктуации электронной концентрации (ЭК) в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы, которые вызывают рассеяние радиоволн, их многолучевое распространение, замирания принимаемых сигналов и сужение полосы когерентности ионосферы до  $\Delta F_k < 0,1...1$  МГц [2]. При распространении радиоволн через возмущенную ионосферу, например в результате выброса бария или радионагрева, на высоте слоя  $F$  принимаемые сигналы будут подвержены

частотно-селективным замираниям (ЧСЗ), т.к. ширина спектра сигнала ( $\Delta F_0 = 1 \dots 10$  МГц) может на порядок и более превышать полосу когерентности ( $\Delta F_k = 0,1 \dots 1$  МГц) ионосферы (т.е.  $\Delta F_0 \gg \Delta F_k$ ), что приводит к уменьшению амплитуды отклика на выходе корреляционной схемы обработки принимаемого сигнала и увеличению шумовой составляющей погрешности определения псевдодальности  $\sigma_{R_{\text{шум}}}$ . Однако вопросы исследования влияния ЧСЗ на точность определения псевдодальности и координат потребителя в [2] не рассматривались.

**Цель статьи** – оценка шумовой составляющей погрешности измерения псевдодальности ( $\sigma_{R_{\text{шум}}}$ ) в СРНС при возмущениях ионосферы в слое  $F$ .

$$\sigma_\tau = \left[ \sqrt{2(E_r/N_0)\Delta\Omega_s} \right]^{-1} = \left( \sqrt{2h^2\Delta\Omega_s} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где  $h^2 = \frac{E_r}{N_0} = \frac{E_t K_{\text{ос}}}{N_0}$  – отношение энергии принимаемого сигнала  $E_r$  к спектральной мощности шума  $N_0$ ,  $\Delta\Omega_s$  – эффективная ширина спектра передаваемого сигнала, связанная с традиционной полосой спектра широкополосного сигнала с длительностью элементарных символов  $\tau_0 = \frac{1}{\Delta F_0}$  как

$$\Delta\Omega_s = \sqrt{\pi}\Delta F_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{\tau_0}. \text{ Анализ (3) показывает,}$$

что с увеличением ширины спектра передаваемого сигнала  $\Delta F_0$  шумовая погрешность измерения времени запаздывания ( $\tau$ ) принимаемого сигнала  $\sigma_\tau \sim \frac{1}{\Delta F_0}$  уменьшается.

Оптимальная НК схема измерения  $\tau$  согласно [3, 4] остается оптимальной в случае, когда принимаемые сигналы подвержены релейским замираниям. При этом потенциальная точность измерения време-

$$\dot{S}_r(t) = \sqrt{E_t} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{f}(t - \tau - \lambda) \dot{b}(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

где  $\dot{f}(t - \tau - \lambda)$  – нормированная комплексная огибающая передаваемого сигнала со средним временем запаздывания  $\tau$  (неизвестная неслучайная величина, подлежащая измерению) и случайным запаздыванием  $\lambda$ ;  $\dot{b}(\lambda)$  – низкочастотная импульсная функция канала связи (комплексный гауссовский процесс с математическим ожида-

### Основная часть

Известно [3], что комплексная огибающая принимаемого сигнала отличается от комплексной огибающей передаваемого сигнала  $\dot{S}_t(t) = \sqrt{E_t} \dot{f}(t)$  с энергией  $E_t$  и нормированной комплексной огибающей  $\dot{f}(t)$  лишь ослаблением амплитуды (в  $\sqrt{K_{\text{ос}}}$  раз) и запаздыванием на время  $\tau$ :

$$\dot{S}_r(t) = \sqrt{E_t K_{\text{ос}}} \dot{f}(t - \tau). \quad (2)$$

Потенциальная точность измерения времени запаздывания ( $\tau$ ) принимаемого сигнала  $s_r(t)$  оптимальной некогерентной (НК) схемой его обработки на фоне гауссовских флуктуационных шумов определяется величиной среднеквадратического отклонения (СКО), описываемой выражением вида [4]

ни запаздывания ( $\tau$ ) принимаемого сигнала определяется выражением

$$\sigma_\tau = \left[ 2\bar{E}_r \frac{\bar{E}_r}{N_0(N_0 + \bar{E}_r)} \Delta\Omega_s^2 \right]^{-0,5}, \quad (4)$$

где  $\bar{E}_r = 2\sigma_b^2 E_t = E_r$  – средняя энергия принимаемого сигнала с ЧСЗ, равная его энергии в канале без замираний ( $E_r = E_t K_{\text{ос}}$ );  $2\sigma_b^2$  – мощность коэффициента передачи канала ( $b$ ) с релейскими замираниями. При обычно реализуемом в СРНС отношении сигнал/шум  $\bar{E}_r / N_0 \geq 10^3$  [5] выражение (4) сводится к виду (3).

Следует учесть, что релейские замирания принимаемого сигнала являются частным случаем ЧСЗ, что позволяет обобщить известный метод оценки точности измерения времени запаздывания принимаемого сигнала (4) на случай приема сигнала с ЧСЗ. Комплексную огибающую принимаемого сигнала с ЧСЗ можно записать как [3]

нием  $M[\dot{b}(\lambda)] = 0$  и корреляционной функцией  $M[\dot{b}(\lambda) \dot{b}^*(\lambda_1)] = 2\sigma_b^2 \sigma_h(\lambda) \delta(\lambda - \lambda_1)$ .

Здесь  $\sigma_h(\lambda)$  – нормированная функция рассеяния КС по времени, связанная преобразованием Фурье с нормированной двухчастотной корреляционной функцией канала (зависящей от  $\Delta F_k$ ).

Тогда потенциальная точность измерения времени запаздывания сигнала с ЧСЗ будет определяться выражением [6]

$$\sigma_{\tau^{(ч)}} = \left[ 2\bar{E}_r \frac{\bar{E}_r \eta_{ч}}{N_0(N_0 + \bar{E}_r \mu_{ч})} \Delta\Omega_3^2 \right]^{-0,5}, \quad (6)$$

где

$$\eta_{ч} = \left( 1 + 4 \Delta F_0^2 / \pi \Delta F_k^2 \right)^{-0,5} \quad (7)$$

– коэффициент энергетических потерь при корреляционной обработке сигнала с ЧСЗ,

$$\mu_{ч} = \left( 1 + 4 \Delta F_0^2 / \pi \Delta F_k^2 \right)^{-3/2} \quad (8)$$

– коэффициент сужения эффективной ширины спектра из-за ЧСЗ.

Коэффициенты энергетических потерь (7) и (8) зависят только от степени ЧСЗ

принимаемого сигнала ( $\Delta F_0 / \Delta F_k$ ). В частном случае отсутствия ЧСЗ ( $\Delta F_0 / \Delta F_k \ll 1$ ),

когда  $\eta_{ч} = 1$  и  $\mu_{ч} = 1$ , выражение (6) при  $\frac{\bar{E}_r}{N_0} = \frac{E_r}{N_0} \gg 1$  сводится к виду (4). При

выполнении условия возникновения ЧСЗ ( $\Delta F_0 / \Delta F_k \geq 1$ ) значение  $\sigma_{\tau^{(ч)}} > \sigma_{\tau}$ .

Выражение (6) с учетом (7), (8) можно записать в виде суммы двух слагаемых:

$$\sigma_{\tau^{(ч)}} = \left( \frac{\left( 1 + 4 \Delta F_0^2 / \pi \Delta F_k^2 \right)^{3/2}}{2 \pi \Delta F_0^2 \bar{E}_r / N_0} + \frac{\left( 1 + 4 \Delta F_0^2 / \pi \Delta F_k^2 \right)^2}{2 \pi \Delta F_0^2 \left( \bar{E}_r / N_0 \right)^2} \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Анализ выражения (9) показывает, что для обычно реализуемого в СРНС отношения сигнал/шум  $\bar{E}_r / N_0 \geq 10^3$  второе слага-

емое будет на порядок меньше первого при значениях  $\Delta F_0 / \Delta F_k \leq 10^2$ . Поэтому для указанных отношений формулу (9) можно записать в приближенном виде как

$$\sigma_{\tau^{(ч)}} \approx \left( \frac{\left( 1 + 4 \Delta F_0^2 / \pi \Delta F_k^2 \right)^{3/2}}{2 \pi \Delta F_0^2 \bar{E}_r / N_0} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

Качественный анализ (10) показывает, что при отсутствии возмущений ионосферы, когда полоса ее когерентности широка и намного превосходит ширину спектра сигнала (т.е.  $\Delta F_0 / \Delta F_k \ll 1$ ), шумовая погрешность измерения времени запаздывания широкополосного сигнала будет

мала, т.к.  $\sigma_{\tau} \sim \frac{1}{\Delta F_0}$ . При сильных возмущениях ионосферы, когда полоса ее когерентности сужается до значений намного меньших ширины спектра сигнала (т.е.  $\Delta F_0 / \Delta F_k \gg 1$ ), шумовая погрешность измерения времени запаздывания широкополосного сигнала будет велика, т.к.  $\sigma_{\tau} \sim \Delta F_0^{0,5} / \Delta F_k^{1,5}$ . Следовательно, при из-

вестной полосе когерентности ионосферы ( $\Delta F_k$ ) существует оптимальное значение ширины спектра передаваемого сигнала ( $\Delta F_{0opt}$ ), при котором обеспечивается минимальное значение шумовой погрешности измерения времени запаздывания  $\sigma_{\tau^{(ч)min}}$ .

Приравняв к нулю производную от функции  $\sigma_{\tau^{(ч)}}$  (10) по  $\Delta F_0$ , получим уравнение, решение которого дает искомую формулу для выбора оптимальной ширины спектра передаваемого сигнала по КС с ограниченной полосой когерентности ( $\Delta F_k$ ):

$$\Delta F_0 = \Delta F_{0opt} = \sqrt{0,5 \pi} \Delta F_k. \quad (11)$$

При оптимальной ширине спектра передаваемого сигнала (11) погрешность (СКО) измерения времени запаздывания сигнала с ЧСЗ (6) будет иметь минимальное значение

$$\sigma_{\tau^{(ч)min}} \approx 3^{3/4} \left[ 2 \pi \Delta F_0^2 \left( \bar{E}_r / N_0 \right) \right]^{-1/2}, \quad (12)$$

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

Известно [7], что полоса когерентности трансionoсферного канала связи, входящая в (7)–(8), определяется выражением

$$\Delta F_k = f_0^2 c / \left( 80,8 \pi^{5/4} (l_s h_s)^{1/2} \sigma_{\Delta N}(h_m) (2 + d_1^2)^{1/2} \right), \quad (13)$$

где  $f_0$  – несущая частота;  $l_s$  – характерный масштаб неоднородностей;  $h_3$  – эквивалентная толщина ионосферного слоя;  $\sigma_{\Delta N}(h_m) \approx \beta \cdot \overline{N}(h_m)$  – СКО флуктуаций ЭК ионосферы относительно их среднего значения на высоте  $h = h_m$  максимума ионизации  $\overline{N}(h_m)$ ;  $\beta$  – интенсивность неоднородностей;  $d_1^2 \geq 1$  – коэффициент, характеризующий нарастание дифракционных эффектов во фронте волны по мере ее распространения, определяемый как

$$d_1^2 = \frac{(h_3^2 - 3h_3 h_1 + 3h_1^2) c^2}{192 \pi^2 f_0^2 l_s^4}, \quad (14)$$

где  $h_1$  – расстояние от нижней границы ионосферного слоя до точки приема.

Воздействие различных факторов искусственного возмущения в слое  $F$  сопровождается ростом флуктуаций ЭК с  $\sigma_{\Delta N}(h_m) = 10^9 \dots 11^{10}$  до  $\sigma_{\Delta N}(h_m) = 10^{13} \dots 11^{14}$  эл/м<sup>3</sup>, т.е. могут составлять 3...4 порядка. В результате роста флуктуаций ЭК происходит пропорциональное сужение полосы когерентности

$$\sigma_{R_{\text{шум}}} = c \cdot \sigma_{\tau(\text{ч})} = c \left( \frac{(1 + 4\Delta F_0^2 / \pi \Delta F_k^2)^{3/2}}{2(E_r / N_0) \cdot \pi \Delta F_0^2} \right)^{1/2}. \quad (15)$$

Двухчастотный режим работы (на несущих частотах  $f_{0в} = 1,6$  ГГц,  $f_{0н} = 1,25$  ГГц) позволяет полностью устранить ионосферную составляющую погрешности определения псевдодальности ( $\delta R_{\text{ион}} \approx 0$  м), но при

$$\sigma_{R_{\text{шум}}(2f_0)} = \left( \left[ 2,53 \sigma_{R_{\text{шум}}(f_{0в})} \right]^2 + \left[ 1,53 \sigma_{R_{\text{шум}}(f_{0н})} \right]^2 \right)^{1/2}, \quad (16)$$

где  $\sigma_{R_{\text{шум}}(f_{0в})}$  – шумовая погрешность псевдодальности на верхней несущей частоте  $f_{0в} = 1,6$  ГГц;  $\sigma_{R_{\text{шум}}(f_{0н})}$  – на нижней несущей частоте  $f_{0н} = 1,25$  ГГц.

В дифференциальном режиме работа СРНС погрешности измерения псевдодальности, выполненные НАП и опорно-измерительной станции (ОИС), коррелированы во времени и в пространстве, за исключением шумовых погрешностей. Следовательно остаточная (после компенсации) погрешность измерения псевдодальности будет

$$\sigma_{R_{\text{шум}}(\text{др})} = \left( \sigma_{R_{\text{шум}}(f_{0в})}^2 + \left[ 2,53 \sigma_{R_{\text{шум}}(f_{0в})} \right]^2 + \left[ 1,53 \sigma_{R_{\text{шум}}(f_{0н})} \right]^2 \right)^{1/2}. \quad (18)$$

ности трансionoсферного канала связи (13)

$$\Delta F_k \sim \frac{1}{\sigma_{\Delta N}(h_m)} \text{ до значений } \Delta F_k < 1 \text{ МГц.}$$

Следует заметить, что аналогично (13) интервал пространственной когерентности трансionoсферного канала связи также связан с СКО флуктуаций ЭК ионосферы обратно пропорциональной зависимостью:  $\Delta \rho_k \sim 1/\sigma_{\Delta N}(h_m)$  [8].

Поскольку в СРНС используются широкополосные сигналы с шириной спектра  $\Delta F_0 \approx 1$  МГц и  $\Delta F_0 \approx 10$  МГц, то при трансionoсферном распространении радиоволн они могут подвергаться сильным ЧСЗ (т.к.  $\Delta F_0/\Delta F_k \approx 10 \dots 100$ ). Искажения формы огибающей принимаемого сигнала из-за ЧСЗ ( $\Delta F_0/\Delta F_k \geq 1$ ), обусловленных увеличением СКО флуктуаций ЭК  $\sigma_{\Delta N}(h_m)$ , вызовут ее рассогласование с копией передаваемого сигнала, заложенной в корреляционном приемнике измерения времени задержки принимаемого сигнала ( $\tau$ ), и, как следствие – увеличение шумовой погрешности ее измерения  $\sigma_{\tau(\text{ч})}$  из-за ЧСЗ.

С учетом (10) шумовая погрешность измерения псевдодальности при одночастотных измерениях будет определяться как

этом (из-за наличия двух каналов корреляционной обработки сигналов с частотами  $f_{0в}$  и  $f_{0н}$ ) в 2...3 раза возрастает шумовая составляющая, определяемая согласно выражению [5]

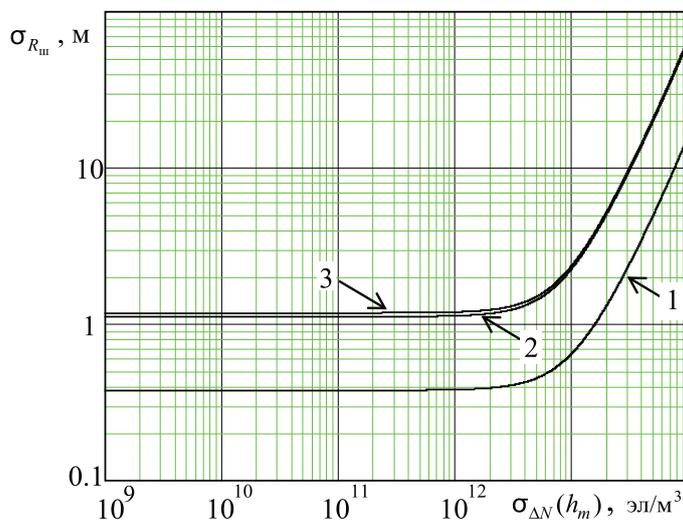
определяться СКО шумовой погрешности НАП и ОИС [9] и иметь вид

$$\sigma_{R_{\text{шум}}(\text{др})} = \left( \sigma_{R_{\text{шум}} \text{ нап}}^2 + \sigma_{R_{\text{шум}} \text{ оис}}^2 \right)^{1/2}. \quad (17)$$

Так как ОИС работает в двухчастотном режиме, то выражение для расчета СКО шумовой погрешности измерения псевдодальности определяется выражением (16), т.е.  $\sigma_{R_{\text{шум}} \text{ оис}} = \sigma_{R_{\text{шум}}(2f_0)}$ . Поскольку НАП работает в одночастотном режиме на несущей частоте  $f_{0в} = 1,6$  ГГц, то с учетом (15), (16) выражение (17) примет вид

Согласно (15)–(17) на рисунке представлены графики зависимости шумовой погрешности определения псевдодальности

$\sigma_{R_{ш}}$  от СКО флуктуаций ЭК  $\sigma_{\Delta N}(h_m) \sim 1/\Delta F_k$  при неизменной ширине спектра передаваемого сигнала  $\Delta F_0 = 10$ .



Графики зависимости шумовой погрешности определения псевдодальности  $\sigma_{R_{ш}}$  от СКО флуктуаций ЭК  $\sigma_{\Delta N}(h_m)$  в ионосфере при работе СРНС в одночастотном (1), двухчастотном (2) и дифференциальном (3) режимах

Из этих графиков видно, что при любой степени возмущения ионосферы  $\sigma_{\Delta N}(h_m)$  шумовая погрешность  $\sigma_{R_{ш}}$  при работе СРНС в одночастотном режиме (кривая 1) существенно ниже, чем при работе в двухчастотном (кривая 2) и дифференциальном (кривая 3) режимах работ, а шумовая погрешность измерения псевдодальности при работе СРНС в дифференциальном режиме лишь немного выше, чем при работе в двухчастотном режиме. При сильных возмущениях ионосферы, когда  $\sigma_{\Delta N}(h_m) > 10^{12}$  эл/м<sup>3</sup>, во всех режимах работы СРНС значения  $\sigma_{R_{ш}}$  могут возрастать на 1...2 порядка по сравнению с нормальной ионосферой, когда  $\sigma_{\Delta N}(h_m) = 10^9 \dots 10^{10}$  эл/м<sup>3</sup>. Очевидно, что при выборе оптимальной ширины спектра сигнала (11)  $\Delta F_0 = \Delta F_{0opt} = \sqrt{0,5 \pi} \Delta F_k$  увеличение  $\sigma_{R_{ш}}$  при сильных возмущениях ионосферы составило бы согласно (12) всего 2,28 раза по сравнению с нормальной ионосферой.

**Заключение**

При возмущениях ионосферы в слое F вследствие увеличения флуктуаций ЭК в мелкомасштабных неоднородностях ионосферы  $\sigma_{\Delta N}(h_m)$  согласно (13) происходит сужение полосы когерентности транс-

ионосферного канала  $\Delta F_k \sim \frac{1}{\sigma_{\Delta N}(h_m)}$ , что

приводит к выполнению условия возникновения ЧСЗ ( $\Delta F_0/\Delta F_k > 1$ ) и увеличению погрешности измерения времени запаздывания принимаемого сигнала (10). Вследствие этого увеличивается шумовая погрешность ( $\sigma_{R_{шум}}$ ) измерения псевдодальности (15)–(17) в СРНС «ГЛОНАСС». В условиях возмущений ионосферы в слое F шумовая погрешность измерения псевдодальности может существенно возрастать (рисунок) по сравнению с условиями нормальной ионосферы, достигая значений  $\sigma_{R_{шум}} \approx 15$  м в одно-

частотном режиме НАП СРНС «ГЛОНАСС» и  $\sigma_{R_{шум}} \approx 80$  м в двухчастотном и дифференциальном режимах работ. При выборе оптимальной ширины спектра сигнала (11)

$\Delta F_0 = \Delta F_{0opt} = \sqrt{0,5 \pi} \Delta F_k$  увеличение  $\sigma_{R_{ш}}$

при сильных возмущениях ионосферы составило бы всего 2,28 раза по сравнению с нормальной ионосферой.

**Список литературы**

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / год ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
2. Богуш Р.Л., Гильяно Ф.У., Непп Д.Л., Мишле А.Х. Влияние частотно-селективных эффектов распространения радиоволн на автоматическое слежение за сигналом в приемниках широкополосных систем связи // ТИИЭР. – 1981. – Т. 69, № 7. – С. 21–32.

3. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. Т. 3 – М.: Сов. радио, 1977. – 664 с.

4. Сосулин Ю.Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.

5. Волков Н.М. и др. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС // Успехи современной радиоэлектроники. – 1997. – № 1. – С. 31–46.

6. Пашинцев В.П. Влияние частотно-селективных замираний на измерение времени запаздывания сигналов систем космической связи // Радиотехника и электроника. – 1998. – Т. 43, № 4, –С. 410–414.

7. Маслов О.Н., Пашинцев В.П. Модели трансионосферных радиоканалов и помехоустойчивость систем космической связи // Приложение к журналу «Инфокоммуникационные технологии». Вып. 4. – Самара: ПГАТИ, 2006. – 357 с.

8. Чипига А.Ф., Дагаев Э.Х., Сенокосова А.В., Шевченко В.А. Оценка интервала пространственной корреляции замираний в трансионосферном канале связи // Теория и техника радиосвязи. – 2011. – № 4. – С. 97–102.

9. Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. – М.: Сов. радио, 1968. – 496 с.

### References

1. GLONASS. *Principy postroenija i funkcionirovanija. Pod red. A.I. Perova, V.N. Harisova.* (GLONASS. Principles of construction and operation. Ed. A.I. Perova, V.N. Kharisova). Moscow, Radio Publ., 2010. 800 p.

2. Bogush R.L., Gil'jano F.U., Nepp D.L., Mishle A.H. *TIIIJeR*, 1981, Vol. 69, no. 7, pp. 21–32.

3. Van Tris G. *Teorija obnaruzhenija, ocenok i moduljacji. T. 3* (Theory of detection, assessment and modulation. Volume 3). Moscow, Sov. Radio Publ., 1977. 664 p.

4. Sosulin Ju.G. *Teoreticheskie osnovy radiolokacii i radionavigacii* (Theoretical Foundations of radar and navigation). Moscow, Radio and Communications Publ., 1992. 304 p.

5. Volkov N.M. i dr. *Uspehi sovremennoj radiojelektroniki*. 1997, no. 1, pp. 31–46.

6. Pashincev V.P. *Radiotehnika i jelektronika*. 1998, Vol. 43, no. 4, pp. 410–414.

7. Maslov O.N., Pashincev V.P. *Modeli transionosfernyh radiokanalov i pomehoustojchivost' sistem kosmicheskoj svjazi* (Models transionospheric radio and immunity space communication systems) Supplement to the «Information and Communication Technologies». Issue 4. Samara: PGATI, 2006. 357 p.

8. Chipiga A.F., Dagaev Je.H., Senokosova A.V., Shevchenko V.A. *Teorija i tehnika radiosvjazi*. 2011, no.4, pp. 97–102.

9. Kazarinov Ju.M. *Radiotehnicheskie sistemy* (Radio systems). Moscow, Ows. radio Publ., 1968. 496 p.

### Рецензенты:

Жиляков Е.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород;

Лубенцов В.Ф., д.т.н., профессор кафедры информационных систем, электропривода и автоматики Невинномысского технологического института, ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет» Минобрнауки РФ, г. Невинномысск.

Работа поступила в редакцию 05.12.2014.