

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It is shown that the perturbations in the ionosphere layer F , accompanied withdrawn-cheniem fluctuations of the electron density, can lead to the appear- veniyu-frequency selective fading of the received signals and increase the noise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 transionoсферного 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 δR 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 ΔF_0 шумовая погрешность измерения времени запаздывания (τ) принимаемого сигнала $\sigma_\tau \sim \frac{1}{\Delta F_0}$ уменьшается.

Оптимальная НК схема измерения τ 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 τ (неизвестная неслучайная величина, подлежащая измерению) и случайным запаздыванием λ ; $\dot{b}(\lambda)$ – 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 τ :

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

Потенциальная точность измерения времени запаздывания (τ) 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 (τ) 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 ΔF_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 (ΔF_k) существует оптимальное значение ширины спектра передаваемого сигнала (ΔF_{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 ΔF_0 , получим уравнение, решение которого дает искомую формулу для выбора оптимальной ширины спектра передаваемого сигнала по КС с ограниченной полосой когерентности (ΔF_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 (σ_{τ}) 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; $\sigma_{\Delta N}(h_m) \approx \beta \cdot \bar{N}(h_m)$ – СКО флуктуаций ЭК ионосферы относительно их среднего значения на высоте $h = h_m$ максимума ионизации $\bar{N}(h_m)$; β – 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/м³, т.е. могут составлять 3...4 порядка. В результате роста флуктуаций ЭК происходит пропорциональное сужение полосы когерент-

ности трансионосферного 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 трансионосферного 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 трансионосферном 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 (τ), и, как следствие – увеличение шумовой погрешности ее измерения $\sigma_{\tau(ч)}$ из-за ЧСЗ.

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

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

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

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]

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

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

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

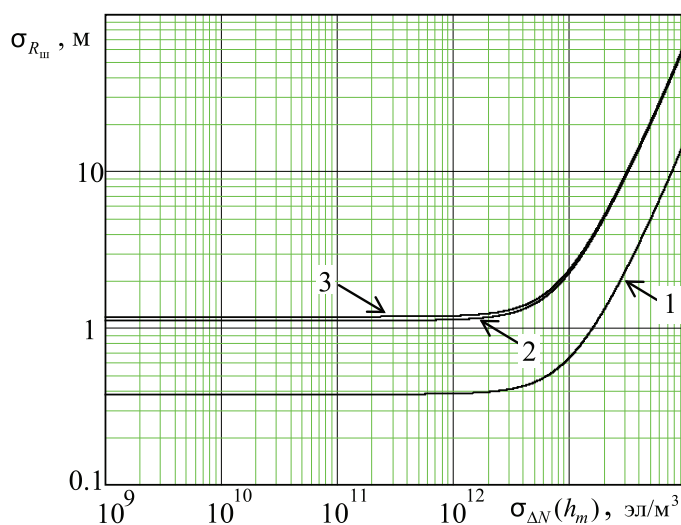
$$\sigma_{R_{шум}(др)} = \left(\sigma_{R_{шум\ нап}}^2 + \sigma_{R_{шум\ оис}}^2 \right)^{1/2}. \quad (17)$$

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

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

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/м³, 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/м³. 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.