

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Я. О. Жевняк

Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

E-mail: zhevnyakyadviga@gmail.com

Проведено исследование факторов, влияющих на качество работы спутниковых навигационных систем (СНС) в зависимости от уровня шума, сопровождающего радионавигационный сигнал на этапе его обработки приемной системой. В данной работе рассматриваются только фундаментальные шумы естественного происхождения: электромагнитное излучение атмосферы, космоса, Земли, а также шумы, генерируемые внутри самой приемной системы. Учитывалось влияние на мощность сигнала таких параметров как: угол места НКА, широта местоположения приемной системы, физические и химические параметры атмосферы, погода. Приводятся результаты численного моделирования основных энергетических параметров СНС при различных условиях.

Ключевые слова: *отношение сигнал/шум, затухание радиосигнала в атмосфере, затухание радиосигнала в дожде, шумовая температура, спутниковая навигация.*

Одним из главных параметров, описывающих качество работы навигационной радиосистем, является отношение сигнал/шум SNR , определяемое как отношение мощности принимаемого полезного сигнала к мощности шума в полосе пропускания 1 Гц, измеренные в одно и то же время в одном и том же месте схемы [1, с.54].

ШУМЫ ПРИЕМНОЙ СИСТЕМЫ

Шумы приемной системы включают естественное шумовое электромагнитное излучение, захватываемое приемной антенной, а также внутренние шумы, генерируемые в компонентах приемной системы. Чтобы оценить уровень шумов приемной системы необходимо рассчитать её эквивалентную шумовую температуру [2, с. 43]:

$$T_{\text{сис}} = \frac{T_a}{L} + \frac{L-1}{L}T_0 + (F-1)T_0, \quad (1)$$

где T_a – шумовая температура антенны [К]; L – потери в фидерном тракте от выхода антенны до входа малошумящего усилителя; T_0 – температура окружающей среды [К]; F – коэффициент шума приемника.

Согласно [3, с. 62], шумовая температура антенны

$$T_a = T_{\text{ат}} + \frac{T_k}{L_a} + \alpha T_{\text{зак}}, \quad (2)$$

где $T_{\text{ат}}$ – шумовая температура атмосферы [К]; T_k – космическая шумовая температура [К]; L_a – энергия, поглощенная атмосферой; α – коэффици-

ент, учитывающий прием шумов с земли боковыми лепестками диаграммы направленности антенны; $T_{\text{зак}}$ – результирующая шумовая температура Земли, включающая её собственное излучение и отраженные от неё атмосферные и космические шумы [К].

Мощность теплового шума в полосе пропускания 1 Гц (спектральная плотность шумового радиоизлучения [Вт/Гц]) определяется через шумовую температуру следующим образом [4, с. 284]:

$$N_0 = kT, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана [Дж/К]; T – шумовая температура [К].

Затухание радиосигнала в атмосфере

Уровень мощности сигнала на входе приемной системы зависит от величины его затухания при распространении по радиотрассе.

Затухание сигнала в свободном пространстве

Потери мощности сигнала в свободном пространстве [дБ] [5, с. 2]:

$$L_{\text{пр}} = 20 \log \left(4\pi \cdot \frac{d}{\lambda} \right), \quad (4)$$

где d – расстояние от передающей до приемной антенн [м]; λ – длина волны [м].

Затухание сигнала в дожде

Потери мощности сигнала в дожде [дБ/км] [6, с. 98]:

$$\alpha_{\text{дж}} = aI^b, \quad (5)$$

где a и b – эмпирические величины (для частот 1–2 ГГц приняты 0,003 и 1 соответственно); I – интенсивность дождя [мм/ч].

Согласно [3, с. 58] длина пути сигнала в дожде:

$$l = \frac{h_{\text{д}} - h_{\text{пр}}}{\sin(\gamma)}, \quad (6)$$

где $h_{\text{д}}$ – эффективная высота дождевого слоя [км]; $h_{\text{пр}}$ – высота приемной системы над уровнем моря [км]; γ – угол места приемной системы.

Эффективная высота дождевого слоя определяется следующим образом:

$$h_{\text{д}} = \begin{cases} h_{\text{и}} & \text{при } I \leq 10 \text{ мм/ч} \\ h_{\text{и}} + \log_{10}(I/10) & \text{при } I > 10 \text{ мм/ч} \end{cases} \quad (7)$$

где $h_{\text{и}}$ – высота нулевой изотермы [км].

Высота нулевой изотермы находится согласно

$$h_{и} = \begin{cases} 4,8 & \text{при } |\Psi_c| \leq 10^\circ \\ 7,8 - 0,1 \cdot |\Psi_c| & \text{при } |\Psi_c| > 30^\circ \end{cases} \quad (8)$$

где Ψ_c – широта местоположения приемной системы.

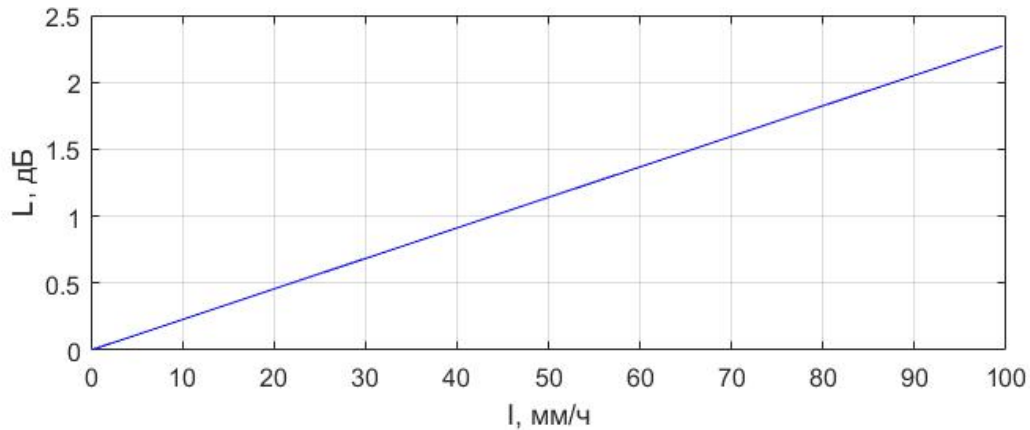


Рис. 1. Зависимость полных потерь радиосигнала в дожде от его интенсивности.
 $\Psi_c=53,9^\circ$, $h_{пр}=0,22$ км, $\gamma=24,8^\circ$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для трех спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS и GALILEO были рассчитаны соответствующие величины затухания радиосигналов при прохождении трассы «НКА – наземная приемная система». Была рассчитана мощность шумов приёмной системы (предполагалось, что система может принимать сигналы от каждой из трех СНС). Были рассчитаны SNR на входе приемного устройства для каждой из трех СНС для угла места, соответствующего г. Минску. На рисунке 2 приведена зависимость SNR от угла места НКА при прохождении радиотрассы в спокойной атмосфере. На рисунке 3 приведена зависимость SNR от интенсивности дождя при прохождении радиотрассы через слой гидрометеоров.

Расчеты показали, что минимальное необходимое SNR в спокойной атмосфере, обеспечивающее требуемую точность позиционирования, при одинаковом качестве работы составляет 45,6 дБ для GPS, 46,2 дБ для ГЛОНАСС и 50 дБ для GALILEO. При наличии сильных осадков SNR уменьшается не более чем на 4 дБ.

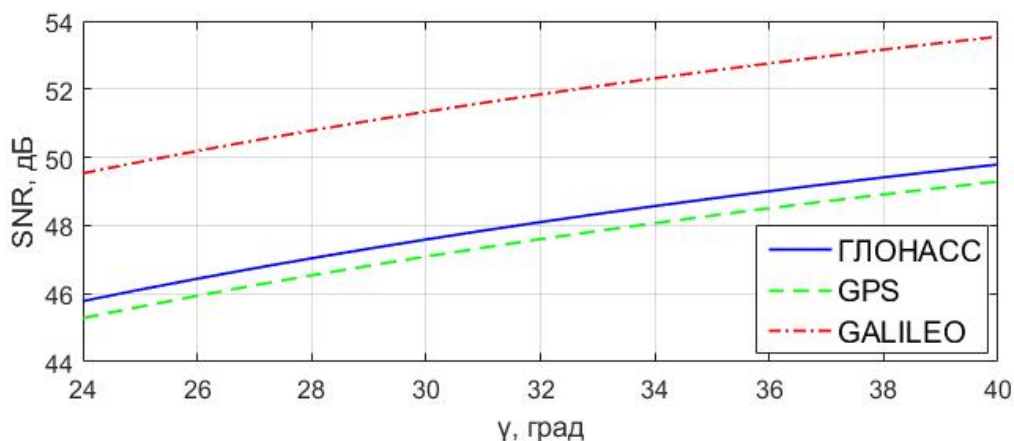


Рис. 2. Зависимость отношения сигнал/шум от угла места для спокойной атмосферы.
 $L=1,1, F=1,41, T_0=290 \text{ К}, \alpha=0,3$

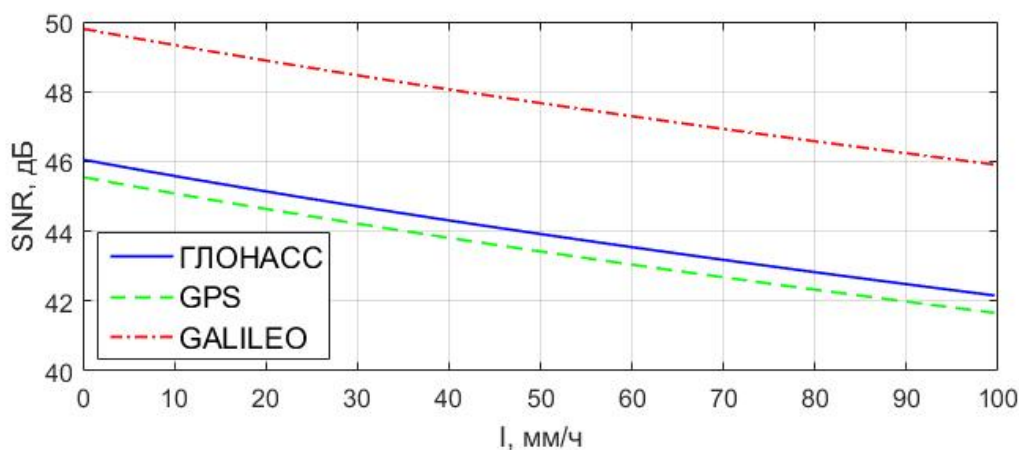


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум от интенсивности дождя. $L = 1,1,$
 $F = 1,41, T_0 = 290 \text{ К}, \alpha = 0,3, h_{\text{пр}} = 0,22 \text{ км}, \gamma = 24,8^\circ, \Psi_c = 53,9^\circ$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Braasch M. S., Van Dierendonck A. J. GPS Receiver Architectures and Measurements // Proceedings of the IEEE. 1990 V. 87. N. 1. P. 48–64.
2. Langley R.V. GPS receiver system noise // GPS World.1997. P. 40–45.
3. Камнев В. Е., Черкасов В. В., Чечин Г. В. Спутниковые сети связи: Учеб. пособие. // М.: «Альпина Паблицер». 2004. 536 с.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение; [Пер. с англ. Е.Г. Грозы и др.], 2. изд. // М.: Вильямс. 2003. 1099 с.
5. Recommendation ITU-R. P.525-4, Calculation of free-space attenuation, Int'l Telecommunication Union. 2019.
6. Кхыонг Н. В. Оценка влияния метеобразования на распространение радиоволн в X-диапазоне // ТРУДЫ МФТИ. 2020. Т. 12. № 3. С. 94–103.