

ЛУЖАНСЬКИЙ В. І.

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0002-2698-3450

e-mail: luzhanskiy56@gmail.com

КАРПОВА Л. В.

ORCID ID: 0000-0001-5015-2107

e-mail: rlesya@gmail.com

КАНЮКА М. О.

Хмельницький національний університет

ВПЛИВ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ПОТОКІВ ІНФОРМАЦІЇ В МЕРЕЖАХ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ VSAT ПРИ ВІДПОВІДНИХ СПІВВІДНОШЕННЯХ СИГНАЛ/ШУМ НА ЙМОВІРНІСТЬ БІТОВОЇ ПОМИЛКИ

У роботі наведено дослідження впливу швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT – мала супутникова наземна станція – при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на вході приймача абонентської супутникової станції на ймовірність біткової помилки. Наводяться технічні характеристики абонентських супутникових станцій, які працюють в K_u -діапазоні частот 11/14 ГГц зі штучним супутником Землі на геостаціонарній орбіті. Визначено динамічний діапазон зміни потужностей сигналу на вході приймача наземної станції супутникового зв'язку на базі VSAT при різних швидкостях передачі даних, який забезпечує задане співвідношення сигнал/шум та ймовірність бітових помилок в межах 10^{-7} – 10^{-4} для необхідної якості зв'язку.

Ключові слова: абонентська супутникова станція на базі VSAT, швидкість передачі цифрових потоків, потужність сигналу на вході приймача, співвідношення сигнал/шум, ймовірність біткової помилки.

VIKTOR LUZHANSKIY, LESIA KARPOVA, MAKSYM KANYUKA

Khmelnitskyi National University

INFLUENCE OF THE TRANSMISSION RATE OF DIGITAL INFORMATION STREAMS IN VSAT-BASED SATELLITE COMMUNICATION NETWORKS WITH APPROPRIATE SIGNAL-TO-NOISE RATIOS ON THE PROBABILITY OF BIT ERROR

Among the satellite technologies, special attention is paid to the development of satellite communication technologies based on VSAT (Very Small Aperture Terminal). Small ground station VSAT, a terminal with a very small antenna diameter (0.9 ... 3.5 m), allows the use of VSAT stations antennas. This makes it possible to significantly reduce the size and cost of ground stations, the power of their transmitters and make their use widespread. VSAT equipment makes it possible to build multiservice networks that provide all modern communication services: Internet access; telephone connection; transmission of audio and video information; reservation of existing communication channels; data collection, monitoring and remote control of industrial facilities, etc. Satellite signals, especially high-frequency bands K_u and K_a , are subject to attenuation during rain, fog, clouds. But this shortcoming is easily overcome when properly designing the network, choosing the technology and location of antennas.

The scientific article is devoted to the study of the influence of the speed of digital information transmission in satellite networks based on VSAT - a small satellite ground station, at the appropriate signal-to-noise ratio at the input of the receiver of the subscriber satellite station on the probability of bit error. The technical characteristics of subscriber satellite stations operating in the K_u -frequency band 11/14 GHz with an artificial satellite of the Earth in geostationary orbit are given. The dynamic range of signal power change at the input of the VSAT-based satellite ground receiver at different data rates is determined, which provides a given signal-to-noise ratio and bit error probability in the range of 10^{-7} - 10^{-4} for the required communication quality.

Keywords: VSAT-based terrestrial satellite station, digital data rate, signal strength at the receiver input, signal-to-noise ratio, bit error probability.

Вступ

Мережі супутникового зв'язку VSAT (Very Small Aperture Terminal) являють собою ефективний інструмент передачі інформації супутниковими каналами, дозволяючи організувати звичний інформаційний простір в регіонах з нерозвинутою інфраструктурою за відсутності високошвидкісних наземних каналів зв'язку. Перш за все, мережа супутникового зв'язку VSAT цікава державним структурам, бізнесу, деяким категоріям приватних користувачів, оскільки з її допомогою можна реалізувати повноцінну корпоративну мережу незалежно від місця розташування. Супутник, який обслуговує мережу VSAT, знаходиться на геостаціонарній орбіті на висоті 35 786 км від поверхні Землі.

VSAT дослівно переводиться як «термінал з дуже малою апертурою». Це наземні станції супутникового зв'язку, технічні характеристики яких відповідають вимогам Рекомендацій МСЕ-Р S.725-S.729.37.

Основні вимоги мережі супутникового зв'язку VSAT:

- для роботи використовуються діапазони частот, виділені для фіксованого супутникового зв'язку (14 і 6 ГГц на лінії «вгору» і 11-12 ГГц і 4 ГГц на лінії «вниз»);
- діаметр антен знаходиться в межах 0,9–3,5 м;
- швидкість передачі інформації з наземної станції на супутник складає 1,2 кбіт/с–2,048 Мбіт/с, а з супутника до земної станції 2–50 Мбіт/с;

- більшість мереж VSAT переважну частину свого робочого часу забезпечують ймовірність бітових помилок не більше 10^{-7} ;
- станції встановлюються безпосередньо у користувача, причому щільність розміщення їх на обмеженій території може бути дуже високою;
- станції можуть працювати автономно, контроль і керування роботою станцій у мережі здійснюються централізовано;
- станції можуть застосовуватися для передачі даних і телефонії в цифровому вигляді і в режимах роботи тільки на прийом (симплекс) чи на прийом/передачу (дуплекс);
- в станціях використовуються малопотужні радіопередавачі (від декількох ватів до десятків ватів) з обов'язковим обмеженням випромінюваної потужності з метою безпеки користувачів;
- мережі VSAT будуються на базі геостаціонарних супутників-ретрансляторів.

Це дозволяє максимально спростувати конструкцію абонентських терміналів і постачати їх простими фіксованими антенами без системи спостереження за супутником. Для забезпечення роботи через малогабаритні абонентські станції типу VSAT супутникові передавачі повинні мати вихідну потужність близько 40 Вт.

По усьому світі число встановлених станцій вимірюється сотнями тисяч, а число абонентів, що обслуговуються сотнями мільйонів. В Україні на сьогоднішній день вже більше 400 станцій VSAT по всій країні, які об'єднані в корпоративні системи.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Аналіз літературних джерел [1–3] показує недостатність проведених досліджень у цьому напрямку.

Метою даної роботи є дослідження впливу швидкості цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на ймовірність бітової помилки.

Виклад основного матеріалу

Визначимо потужність сигналу на вході приймача земної станції VSAT:

$$P_c = 10^{0.1 \cdot p_c} \quad (1)$$

де P_c – потужність сигналу на вході, Вт; p_c – задана потужність на вході приймача, дБ Вт.

Тривалість тактового інтервалу (тривалість одного біту) дорівнює

$$T = 1/R \quad (2)$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_b = P_c \cdot T \quad (3)$$

Потужність шумів на вході приймача можна визначити по формулі [1]:

$$P_{ш,пр} = n \cdot k \cdot \Delta f_{пр} \quad (4)$$

де n – коефіцієнт шуму приймача ($n = 10$ дБ); $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Вм/Гц · град – стала Больцмана; $T_0 = 290$ К – шумова температура в градусах Кельвіна; $\Delta f_{пр}$ – ширина смуги пропускання високочастотного тракту приймача.

Звідси одностороння спектральна щільність потужності білого шуму може бути представлена так:

$$N_0 = n \cdot k \cdot T_0 \quad (5)$$

що дозволяє записати:

$$N_0 = k \cdot T_0 + n = -204 + 10 = -194 \frac{\text{дБ} \cdot \text{Вт}}{\text{Гц}} \quad (6)$$

Останній результат можна переписати у вигляді:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}} \quad (7)$$

Відношення сигнал/шум на вході приймача знаходиться як:

$$E_b / N_0 \quad (8)$$

Ймовірність помилки розраховується:

$$P_b = Q \left(\sqrt{\frac{2 \cdot E_b}{N_0}} \right) \quad (9)$$

Визначимо ймовірність бітової помилки в системах мобільного зв'язку з фазовою маніпуляцією ФМ-2 (BPSK) для забезпечення якості прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-4} - 10^{-7} .

При швидкості передачі $R=8$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує максимальну якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} (Q(5.19)). За формулою (9) знаходимо значення $E_b = 5.36 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/8 \cdot 10^6 = 1.25 \cdot 10^{-7}$ с.

Згідно формул (3) та (1) визначаємо $p_{c.\max}$.

$$p_{c.\max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -113.6 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} (Q(3.69)) [1].

$$p_{c.\min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -116.7 \text{ дБ Вт}.$$

Визначимо ймовірність бітових помилок в межах динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача ($p_{c.\max} = -113.6$ дБВт; $p_{c.\min} = -116.7$ дБВт)

Знайдемо потужність сигналу на вході приймача

$$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-113.6)} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-114.2224)} = 3.97 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-114.3)} = 3.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-114.6)} = 3.39 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-115)} = 3.14 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-115.3)} = 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-155.7)} = 2.68 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-116)} = 2.48 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-116.3)} = 2.29 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-116.7)} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c1} = P_{c.\max} = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad P_{c10} = P_{c.\min} = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна

$$T_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{8 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_1 = 4.288 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.27 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_1 = 3.97 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_1 = 3.67 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_1 = 3.39 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_1 = 3.14 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_1 = 2.9 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_1 = 2.68 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.35 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_1 = 2.48 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_1 = 2.29 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.86 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_1 = 2.16 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 1.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.47.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{4.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.46.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.58 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.50.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.23 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.62.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.84.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.62 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.09.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.35 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.41.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.1 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.78.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.86 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.18.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.78.$$

Розраховуємо ймовірність бітової помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.36 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.19) = 1.051 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.96 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.99) = 3.019 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.58 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.8) = 7.933 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.23 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.61) = 1.013 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.92 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.44) = 4.498 \cdot 10^{-6}. \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.62 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.27) = 9.774 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.35 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.10) = 2.066 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.1 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.8) = 3.908 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.86 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.79) = 7.532 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.69) = 1.121 \cdot 10^{-4}.$$

Таблиця 1

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 8 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$0.051 \cdot 10^{-7}$	$3.019 \cdot 10^{-7}$	$7.933 \cdot 10^{-7}$	$1.013 \cdot 10^{-6}$	$4.498 \cdot 10^{-6}$	$9.774 \cdot 10^{-6}$	$3.908 \cdot 10^{-5}$	$7.532 \cdot 10^{-5}$	$1.121 \cdot 10^{-4}$
Потужність сигналу, дБВт	-113,6	-114	-114,3	-114,6	-115	-115,3	-115,7	-116	-116,3
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13.47	12.46	11.5	10.62	9.84	9.09	8.41	7.78	7.18

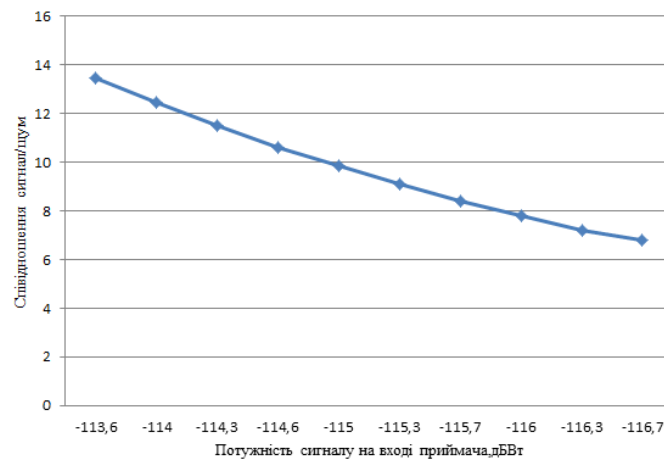


Рис. 1. Залежність співвідношення сигнал/шум від потужності сигналу на вході приймача для $R_1 = 8$ Мбіт/с

При швидкості передачі $R=24$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($p_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} ($Q(5.18)$). За формулою (9) знаходимо значення $E_b = 5.31 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Тривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/24 \cdot 10^6 = 0.416 \cdot 10^{-7}$ с.

Згідно формул (3) та (1) визначаємо $p_{c,max}$.

$$P_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 12.764 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -108.9 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} ($Q(3.67)$) [1].

$$P_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 6.44 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -111.9 \text{ дБ Вт}.$$

Визначаємо потужність сигналу на вході приймача.

$$\begin{aligned}
 P_{c1} &= 10^{0.1 \cdot (-108.9)} = 12.882 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c2} &= 10^{0.1 \cdot (-109.2)} = 12.022 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c3} &= 10^{0.1 \cdot (-109.5)} = 11.220 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c4} &= 10^{0.1 \cdot (-109.9)} = 10.232 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c5} &= 10^{0.1 \cdot (-110.2)} = 9.549 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c6} &= 10^{0.1 \cdot (-110.6)} = 8.709 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c7} &= 10^{0.1 \cdot (-110.9)} = 8.128 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c8} &= 10^{0.1 \cdot (-111.2)} = 7.585 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c9} &= 10^{0.1 \cdot (-111.6)} = 6.918 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c10} &= 10^{0.1 \cdot (-111.9)} = 6.456 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} \\
 P_{c1} &= P_{c.\max} = 12.882 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.} & P_{c10} &= P_{c.\min} = 6.456 \cdot 10^{-12} \text{ Вт.}
 \end{aligned}$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта, рівна

$$T_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{24 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта, визначається наступним чином:

$$\begin{aligned}
 E_{b1} &= P_{c1} \cdot T_2 = 8.511 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b2} &= P_{c2} \cdot T_2 = 7.888 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.93 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b3} &= P_{c3} \cdot T_2 = 7.413 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b4} &= P_{c4} \cdot T_2 = 6.918 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.32 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b5} &= P_{c5} \cdot T_2 = 6.025 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b6} &= P_{c6} \cdot T_2 = 5.888 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b7} &= P_{c7} \cdot T_2 = 5.495 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.43 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b8} &= P_{c8} \cdot T_2 = 5.011 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.13 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b9} &= P_{c9} \cdot T_2 = 4.677 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\
 E_{b10} &= P_{c10} \cdot T_2 = 4.365 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.416 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.72 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}
 \end{aligned}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача.

$$\begin{aligned}
 \frac{E_{b1}}{N_0} &= \frac{5.31 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.34. & \frac{E_{b2}}{N_0} &= \frac{4.93 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.38. \\
 \frac{E_{b3}}{N_0} &= \frac{4.63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.63. & \frac{E_{b4}}{N_0} &= \frac{4.32 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.85. \\
 \frac{E_{b5}}{N_0} &= \frac{3.76 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.44. & \frac{E_{b6}}{N_0} &= \frac{3.68 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.24. \\
 \frac{E_{b7}}{N_0} &= \frac{3.43 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.61. & \frac{E_{b8}}{N_0} &= \frac{3.13 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.86. \\
 \frac{E_{b9}}{N_0} &= \frac{2.92 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.33. & \frac{E_{b10}}{N_0} &= \frac{2.72 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.83.
 \end{aligned}$$

Розраховуємо ймовірність помилки:

$$\begin{aligned}
 P_{b1} &= Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.31 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.18) = 1.109 \cdot 10^{-8}. & P_{b2} &= Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.93 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.98) = 3.179 \cdot 10^{-7}. \\
 P_{b3} &= Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.63 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.82) = 7.547 \cdot 10^{-7}. & P_{b4} &= Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.32 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.66) = 1.581 \cdot 10^{-6}. \\
 P_{b5} &= Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.76 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.35) = 6.807 \cdot 10^{-6}. & P_{b6} &= Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.68 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.3) = 8.540 \cdot 10^{-6}.
 \end{aligned}$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.43 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.15) = 1.662 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.13 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.97) = 3.594 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.92 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.87) = 6.407 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.72 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.7) = 1.078 \cdot 10^{-4}.$$

При швидкості передачі $R_3=40$ Мбіт/с визначимо максимально допустиму потужність сигналу ($P_{c,max}$) на вході приймача, яка забезпечує якість прийому інформації в межах ймовірності бітової помилки 10^{-7} .

Знаходимо Q-функцію [1] для ймовірності помилки 10^{-7} ($Q(5.19)$). По формулі (9) знаходимо значення $E_b = 5.36 \cdot 10^{-19}$ Дж.

$$Tривалість тактового інтервалу рівний $T = 1/R = 1/40 \cdot 10^6 \text{ біт} / \text{с} = 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}.$$$

Таблиця 2

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу та співвідношення сигнал/шум на вході приймача для швидкості 24 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$1.109 \cdot 10^{-7}$	$3.179 \cdot 10^{-7}$	$7.547 \cdot 10^{-7}$	$1.581 \cdot 10^{-6}$	$6.807 \cdot 10^{-6}$	$8.540 \cdot 10^{-5}$	$1.662 \cdot 10^{-5}$	$6.407 \cdot 10^{-5}$	$1.078 \cdot 10^{-4}$
Потужність сигналу, дБВт	-108.9	-109.2	-109.5	-109.9	-110.2	-110.6	-110.9	-111.2	-111.6
Співвідношення сигнал/шум, E_b/N_0	13.34	12.38	11.63	10.85	9.44	9.24	8.61	7.86	7.33

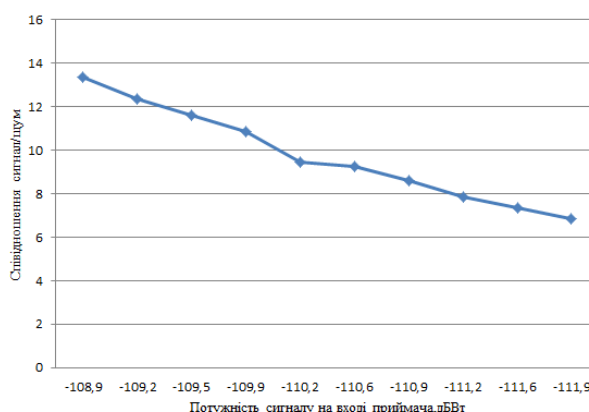


Рис. 2. Залежність співвідношення сигнал/шум від потужності сигналу на вході приймача для $R_2=24$ Мбіт/с

Згідно формул (3) та (1) визначаємо $P_{c,max}$.

$$P_{c,max} = \frac{E_b}{T} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 21.24 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -106.7 \text{ дБ Вт}.$$

Аналогічно знаходимо значення мінімально допустимої потужності на вході приймача при ймовірності бітової помилки 10^{-4} ($Q(3.68)$) [1].

$$P_{c,min} = \frac{E_b}{T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с}} = 10.8 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} = -109.6 \text{ дБ Вт}.$$

Визначаємо потужність сигналу на вході приймача.

$$P_{c1} = 10^{0.1 \cdot (-106.7)} = 21.376 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}. \quad P_{c2} = 10^{0.1 \cdot (-107)} = 19.952 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c3} = 10^{0.1 \cdot (-107.3)} = 18.620 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}. \quad P_{c4} = 10^{0.1 \cdot (-107.6)} = 17.378 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c5} = 10^{0.1 \cdot (-108)} = 15.848 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}. \quad P_{c6} = 10^{0.1 \cdot (-108.3)} = 14.791 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c7} = 10^{0.1 \cdot (-108.6)} = 13.803 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}. \quad P_{c8} = 10^{0.1 \cdot (-109)} = 12.589 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c9} = 10^{0.1 \cdot (-109.3)} = 11.641 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}. \quad P_{c10} = 10^{0.1 \cdot (-109.6)} = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

$$P_{c1} = P_{c,max} = 21.367 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}. \quad P_{c10} = P_{c,min} = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}.$$

Тривалість тактового інтервалу, тобто тривалість одного біта:

$$T_3 = \frac{1}{R_3} = \frac{1}{40 \cdot 10^6 \text{ біт/с}} = 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с.}$$

Енергія, яка витрачається на передачу одного біта визначається наступним чином:

$$E_{b1} = P_{c1} \cdot T_3 = 21.376 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b2} = P_{c2} \cdot T_3 = 19.952 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b3} = P_{c3} \cdot T_3 = 18.620 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.65 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b4} = P_{c4} \cdot T_3 = 17.378 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 4.34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b5} = P_{c5} \cdot T_3 = 15.848 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b6} = P_{c6} \cdot T_3 = 14.791 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b7} = P_{c7} \cdot T_3 = 13.803 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b8} = P_{c8} \cdot T_3 = 12.589 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 3.14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b9} = P_{c9} \cdot T_3 = 11.641 \cdot 10^{-10} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.91 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

$$E_{b10} = P_{c10} \cdot T_3 = 10.789 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot 0.25 \cdot 10^{-7} \text{ с} = 2.7 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Потужність шумів на вході приймача:

$$N_0 = 10^{-19.4} = 3.98 \cdot 10^{-20} \frac{\text{Вт}}{\text{Гц}}.$$

Знаходимо відношення сигнал/шум на вході приймача:

$$\frac{E_{b1}}{N_0} = \frac{5.36 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 13.46.$$

$$\frac{E_{b2}}{N_0} = \frac{4.98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 12.51.$$

$$\frac{E_{b3}}{N_0} = \frac{4.65 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 11.68.$$

$$\frac{E_{b4}}{N_0} = \frac{4.34 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 10.90.$$

$$\frac{E_{b5}}{N_0} = \frac{3.96 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.94.$$

$$\frac{E_{b6}}{N_0} = \frac{3.69 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 9.27.$$

$$\frac{E_{b7}}{N_0} = \frac{3.45 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 8.66.$$

$$\frac{E_{b8}}{N_0} = \frac{3.14 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.88.$$

$$\frac{E_{b9}}{N_0} = \frac{2.91 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 7.31.$$

$$\frac{E_{b10}}{N_0} = \frac{3.46 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}}{3.98 \cdot 10^{-20} \text{ Вт/Гц}} = 6.78.$$

Розраховуємо ймовірність помилки:

$$P_{b1} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 5.19 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.19) = 1.051 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b2} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.93 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.0) = 2.867 \cdot 10^{-7}.$$

$$P_{b3} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.65 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.83) = 6.827 \cdot 10^{-7}. \quad P_{b4} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 4.34 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(5.67) = 1.506 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b5} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.96 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.46) = 4.098 \cdot 10^{-6}. \quad P_{b6} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.69 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.3) = 8.163 \cdot 10^{-6}.$$

$$P_{b7} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.45 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.16) = 1.591 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b8} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 3.14 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.97) = 3.594 \cdot 10^{-5}.$$

$$P_{b9} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.91 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(4.16) = 6.673 \cdot 10^{-5}. \quad P_{b10} = Q\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 2.7 \cdot 10^{-19}}{3.98 \cdot 10^{-20}}}\right) = Q(3.68) = 1.166 \cdot 10^{-4}.$$

Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для швидкості 40 Мбіт/с

Ймовірність бітової помилки	$1.051 \cdot 10^{-7}$	$2.867 \cdot 10^{-7}$	$6.827 \cdot 10^{-7}$	$1.506 \cdot 10^{-6}$	$4.098 \cdot 10^{-6}$	$8.163 \cdot 10^{-6}$	$1.591 \cdot 10^{-5}$	$3.594 \cdot 10^{-5}$	$6.673 \cdot 10^{-5}$
Потужність сигналу, дБВт	-106.7	-107	-107.3	-107.6	-108	-108.3	-108.6	-109	-109.3
Співвідношення сигнал/шум, Еб/No	13.46	12.51	11.68	10.90	9.94	9.27	8.66	7.88	7.31

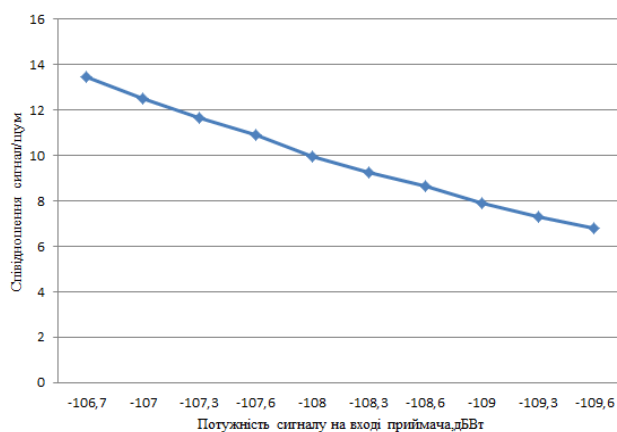


Рис. 3. Залежність значення ймовірності бітової помилки від потужності сигналу на вході приймача для $R_3=40$ Мбіт/с

Таблиця 4

Залежність динамічного діапазону потужності сигналу на вході приймача від швидкості передачі інформації в межах ймовірності помилки $10^{-7} \dots 10^{-4}$

Потужність сигналу	Швидкість передачі	
	$p_{c,max}$, дБ Вт	$p_{c,min}$, дБ Вт
8 Мбіт/с	-113.6	-116.6
24 Мбіт/с	-108.9	-111.9
40 Мбіт/с	-106.7	-109.6

Висновки

Досліджено вплив швидкості передачі цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT при відповідних співвідношеннях сигнал/шум на вході приймача абонентської супутникової станції на ймовірність бітової помилки.

1. Для забезпечення ймовірності бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4} при шумовій температурі 290К динамічний діапазон зміни потужностей на вході приймача наземної станції VSAT повинен знаходитися в межах: від -113.6 до -116.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_1 = 8$ Мбіт/с; від -108.9 до -111.9 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_2 = 24$ Мбіт/с; від -106.7 до -109.6 дБВт для швидкості передачі цифрової інформації $R_3 = 40$ Мбіт/с.

2. При збільшенні швидкості передачі цифрової інформації в мережах супутникового зв'язку на базі VSAT від 8 Мбіт/с до 40 Мбіт/с необхідно потужність сигналу на вході приймача підвищити в середньому в 5 разів (на 7дБ) для забезпечення заданої якості зв'язку(ймовірність бітових помилок від 10^{-7} до 10^{-4}).

3. Для визначення впливу швидкості цифрових потоків інформації в мережах супутникового зв'язку VSAT на ймовірність бітової помилки на вході приймача потребує подальшого дослідження підвищення співвідношення сигнал/шум з урахуванням випадання опадів, підвищення температури навколишнього середовища в місцях знаходження наземної станції VSAT.

Література

1. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – [3-е изд., перераб. и дополн.]. – Одесса : ОНАС им. А.С. Попова, 2013. – 256 с.
2. Сукачев Э.А. Сотовые сети радиосвязи с подвижными объектами : учеб. пособ. / Сукачев Э.А. – [2-е изд., испр. и доп.]. – Одесса : УГАС им. А.С. Попова, 2000. – 119 с.
3. Ратынский М.В. Основы сотовой связи / Ратынский М.В. – М. : Радио и связь, 2000. – 248 с.
4. Системы мобильной связи : учеб. пособ. для вузов / [Ипатов В.П., Орлов В.И., Самойлов И.М. и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2003. – 272 с.
5. Берлин А.Н. Сотовые системы связи : учеб. пособ. / Берлин А.Н. – М. : БИНОМ, 2009. – 360 с.

6. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра / Феер К. ; пер. с англ. ; под ред. В.И. Журавлева. – М. : Радио и связь, 2000. – 520 с.
7. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Варакин Л.Е. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.

References

1. Sukachev E.A. Sotovye seti radiosvyazi s podvizhnymi obektami : ucheb. posob. / Sukachev E.A. – [3-e izd., pererab. i dopoln.]. – Odessa : ONAS im. A.S. Popova, 2013. – 256 s.
2. Sukachev E.A. Sotovye seti radiosvyazi s podvizhnymi obektami : ucheb. posob. / Sukachev E.A. – [2-e izd., ispr. i dop.]. – Odessa : UGAS im. A.S. Popova, 2000. – 119 s.
3. Ratynskij M.V. Osnovy sotovoj svyati / Ratynskij M.V. – М. : Radio i svyaz, 2000. – 248 s.
4. Sistemy mobilnoj svyati : ucheb. posob. dlya vuzov / [Ipatov V.P., Orlov V.I., Samojlov I.M. i dr.]. – М. : Goryachaya liniya – Telekom, 2003. – 272 s.
5. Berlin A.N. Sotovye sistemy svyati : ucheb. posob. / Berlin A.N. – М. : BINOM, 2009. – 360 s.
6. Feer K. Besprovodnaya cifrovaya svyaz. Metody modulyacii i rasshireniya spektra / Feer K. ; per. s angl. ; pod red. V.I. Zhuravleva. – М. : Radio i svyaz, 2000. – 520 s.
7. Varakin L.E. Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami / Varakin L.E. – М. : Radio i svyaz, 1985. – 384 s.

Рецензія/Peer review : 23.11.2021

Надрукована/Printed :30.12.2021