

І. Горбатий

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАДІОКАНАЛІВ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ, СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ТА РАДІОРЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ ПРЯМОЇ ВИДИМОСТІ

© Горбатий І., 2012

Удосконалено математичну модель радіоканалів систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), супутникових систем зв'язку, радіорелейних систем передавання прямої видимості та інших аналогічних систем, що дає змогу підвищити точність визначення енергетичного потенціалу радіоканалів космічний апарат (КА) – наземний комплекс (НК), НК – КА або радіорелейна станція 1 – радіорелейна станція 2 (РРС 1 – РРС 2). Наведено структури радіоканалів таких систем. Показано вплив складових радіоканалів на енергетичний потенціал. Наведено результати математичного моделювання радіоканалу КА – НК для передавання даних ДЗЗ.

Ключові слова: математична модель, система дистанційного зондування Землі, супутникова система зв'язку, радіорелейна система передавання прямої видимості.

The mathematical model of radio channels of the remote sensing of Earth (RSE) systems, satellite telecommunication systems, radio-relay line-of-sight transmission systems and other similar systems was improved, that allows to promote exactness of determination of energy potential of the satellite (S) – ground station (GS), GS – S or radio-relay station 1 – radio-relay station 2 (RRS 1 – RRS 2) radio channels. The structures of radio channels of such systems were leaded. Affecting of components of radio channels on energy potential was shown. The results of mathematical modeling of S – GS radio channel for the RSE data transmission was leaded.

Key words: mathematical model, remote sensing of Earth system, satellite telecommunication system, radio-relay line-of-sight transmission system.

Вступ

Починаючи з 50-х років ХХ століття розпочались активні космічні дослідження. Однією з галузей науки та техніки, що протягом останнього часу розвивається особливо динамічно, стало ДЗЗ із космосу. Системи ДЗЗ отримують дані про Землю з космосу на основі використання властивостей електромагнітних хвиль, що випромінюють, поглинають, відбивають або розсіюють об'єкти зондування [1]. Також активно розвиваються супутникові системи зв'язку, що забезпечують передавання мовних сигналів та даних між джерелами інформації й одержувачами інформації, які знаходяться на значних відстанях [2]. Розвиваються й інші системи зв'язку на основі радіоліній, зокрема радіорелейні системи передавання прямої видимості [3]. Проектування та створення сучасних систем ДЗЗ та систем зв'язку залишається актуальним завданням, для вирішення якого зокрема необхідні математичні моделі, що адекватно описують проєктовані системи. У зв'язку з постійним зростанням вимог до таких систем необхідно вдосконалювати й засоби проєктування, зокрема математичні моделі. Це питання недостатньо висвітлене в літературі [1–6], тому потребує подальших досліджень.

Метою роботи є вдосконалення математичної моделі радіоканалів систем ДЗЗ, супутникових систем зв'язку, радіорелейних систем передавання прямої видимості та інших аналогічних систем, що дає змогу підвищити точність визначення енергетичного потенціалу та ряду інших основних параметрів радіоканалів КА – НК, НК – КА та РРС 1 – РРС 2.

1. Удосконалена математична модель радіоканалів систем ДЗЗ, супутникових систем зв'язку та радіорелейних систем передавання прямої видимості

З метою підвищення точності визначення енергетичного потенціалу та ряду інших основних параметрів радіоканалів КА – НК, НК – КА й РРС 1 – РРС 2 залежно від часу t автором удосконалено математичну модель радіоканалів систем ДЗЗ, супутникових систем зв'язку, радіорелейних систем передавання прямої видимості та інших аналогічних систем, зокрема систем зв'язку з літальними апаратами та зв'язку між КА.

Вхідними даними для вдосконаленої моделі є параметри орбіти КА, геодезичні координати НК або РРС, параметри передавального (приймального) пристрою КА, НК або РРС, характеристики середовища передавання (радіолінії) з урахуванням впливу атмосферних явищ. У процесі моделювання враховано вплив параметрів та характеристик, що найсуттєвіше впливають на точність обчислень.

У процесі вдосконалення математичної моделі внесено ряд пропозицій для підвищення точності обчислення параметрів у часі, пов'язаних із координатами орбіти КА та геодезичними координатами НК або РРС (зокрема висотою НК (РРС) над поверхнею океану). Ураховано кутову похибку наведення антени КА відносно напрямку на центр Землі. Удосконалено співвідношення для обчислення ослаблення енергії електромагнітної хвилі в кисні та парах води атмосфери, у хмарах, шарі танення кристалів льоду, дощі тумані та за рахунок сцинтиляції. Також запропоновано співвідношення для обчислення реальної та порогової чутливості приймача в цифровому телекомунікаційному каналі. Деякі вдосконалення математичної моделі розглянуті нижче.

2. Структурні схеми радіоканалів КА – НК та НК – КА

Розглянемо структурні схеми радіоканалів згаданих вище систем на прикладі радіоканалів системи ДЗЗ із космосу. До складу системи ДЗЗ із космосу входять об'єкти зондування, КА, наземний інформаційний комплекс (НІК), наземний комплекс управління й телеметричний комплекс (НКУТК), радіолінія КА – НІК для передавання даних ДЗЗ, радіолінія НКУТК – КА для передавання команд управління, радіолінія КА – НКУТК для передавання телеметричної інформації й користувачі даних ДЗЗ.

У загальному випадку радіоканал КА – НІК для передавання даних ДЗЗ із КА на НІК складається із пристрою КА для передавання даних ДЗЗ (шифратор, кодер, модулятор, передавач, фідерна лінія й поляризатор) і антени КА для передавання даних ДЗЗ на НІК, що входять до складу КА, радіолінії передавання даних ДЗЗ, а також антени НІК для приймання даних ДЗЗ із КА й пристрою НІК для приймання даних ДЗЗ (поляризатор, фідерна лінія, приймач, демодулятор, декодер й дешифратор), що входять до складу НІК [7]. Структурну схему такого радіоканалу зображено на рис. 1.

Радіоканал НКУТК – КА для передавання команд управління із НКУТК на КА складається з компонентів пристрою НКУТК для передавання команд управління на КА та приймання телеметричної інформації від КА (шифратор, кодер, модулятор, передавач, фідерна лінія 1, смуговий фільтр 1, розгалужувач і поляризатор) і антени НКУТК для передавання команд управління на КА та приймання телеметричної інформації від КА, що входять до складу НКУТК, радіолінії передавання команд управління, а також антени КА для приймання команд управління від НКУТК та передавання телеметричної інформації на НКУТК і компонентів пристрою КА для приймання команд управління від НКУТК та передавання телеметричної інформації на НКУТК (поляризатор, розгалужувач, смуговий фільтр 2, фідерна лінія 2, приймач, демодулятор, декодер і дешифратор), що входять до складу КА.

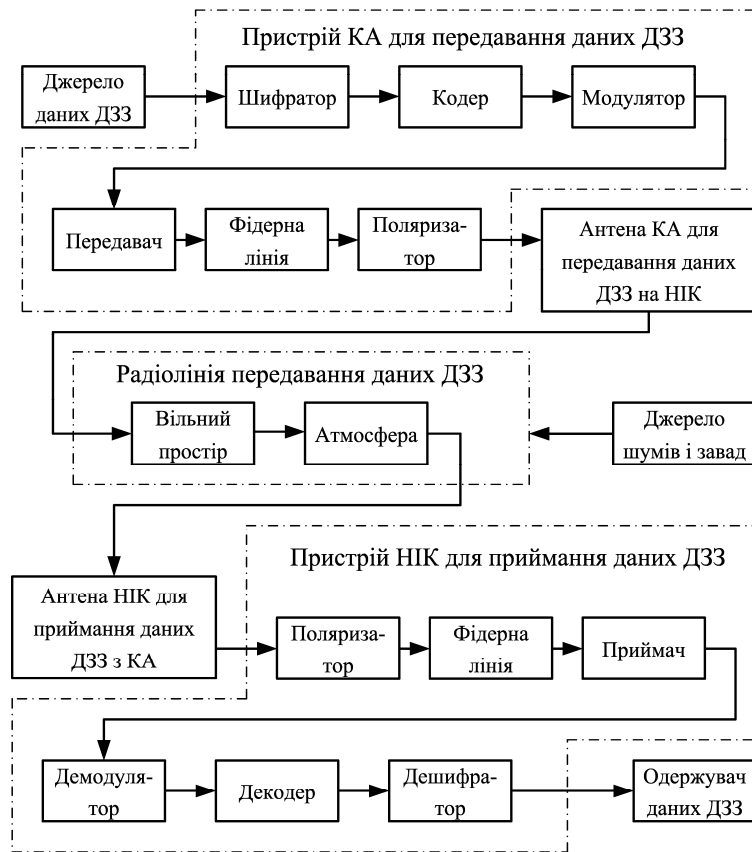


Рис. 1. Структурна схема радіоканалу КА – НІК для передавання даних ДЗЗ

Радіоканал КА – НКУТК для передавання телеметричної інформації з КА на НКУТК складається з компонентів пристрою КА для приймання команд управління від НКУТК та передавання телеметричної інформації на НКУТК (шифратор, кодер, модулятор, передавач, фідерна лінія 1, смуговий фільтр 1, розгалужувач і поляризатор) і антени КА для приймання команд управління від НКУТК та передавання телеметричної інформації на НКУТК, що входять до складу КА, радіолінії передавання телеметричної інформації, а також антени НКУТК для передавання команд управління на КА та приймання телеметричної інформації від КА й компонентів пристрою НКУТК для передавання команд управління на КА та приймання телеметричної інформації від КА (поляризатор, розгалужувач, смуговий фільтр 2, фідерна лінія 2, приймач, демодулятор, декодер і дешифратор), що входять до складу НКУТК. Структурні схеми таких радіоканалів зображено на рис. 2.

На енергетичний потенціал радіоканалу впливають коефіцієнти підсилення (КП) приймальної й передавальної антен, чутливість приймача, потужність передавача, а також величина ослаблення радіосигналу в атмосфері. Цей потенціал залежить від цілого ряду параметрів: діапазону робочих частот, дальності дії НК, швидкості передавання інформації, структури використаних сигналів, методу модуляції, методу завадостійкого кодування, заданої достовірності приймання інформації, ослаблення сигналу через похибку наведення приймальної антени, еквівалентної шумової температури приймача та ін. Слід зазначити, що шифратор і дешифратор для здійснення криптографічного захисту даних ДЗЗ не впливають на енергетичний потенціал радіоканалу, тому їх вилучено з подальшого розгляду.

Перетворення та спотворення корисного сигналу при проходженні через радіоканал КА – НІК для передавання даних ДЗЗ, радіоканал НКУТК – КА для передавання команд управління або радіоканал КА – НКУТК для передавання телеметричної інформації доцільно аналізувати за допомогою запропонованої функційної схеми, наведеної на рис. 3. Така схема дає змогу здійснити енергетичний розрахунок радіоканалу з використанням основних технічних характеристик КА, радіолінії й НК (НІК або НКУТК).

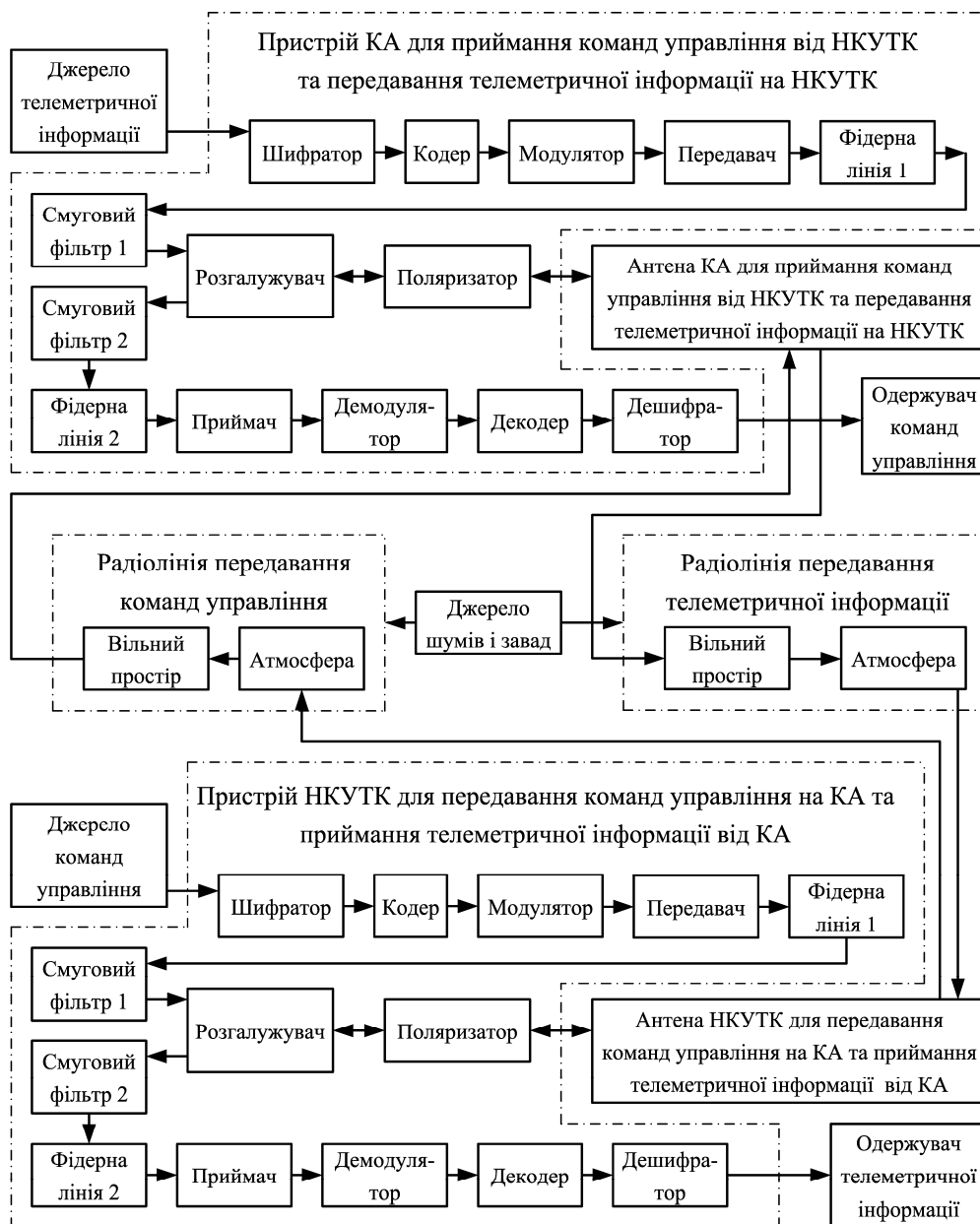


Рис. 2. Структурна схема радіоканалу НКУТК – КА для передавання команд управління й радіоканалу КА - НКУТК для передавання телеметричної інформації

3. Розрахунок енергетичного потенціалу радіоканалів систем ДЗЗ, супутникових систем зв'язку та радіорелейних систем передавання прямої видимості

Умовою надійної роботи радіоканалу є забезпечення достатнього енергетичного потенціалу (у ряді літературних джерел його називають енергетичним балансом або бюджетом радіоканалу) [2, 6], тобто виконання в будь-який момент часу t за будь-яких допустимих умов експлуатації системи ДЗЗ такого співвідношення:

$$P_{прм_{ex}}(t) \geq P_{прм}(t) + L_{техн}, \quad (1)$$

де $P_{прм_{ex}}(t)$ – потужність сигналу на вході приймача (МШП або конвертера) приймального пристрою, дБВт; $L_{техн} = 0...4$ дБ – додаткове ослаблення в радіоканалі, що виникає під час технічної реалізації системи; $P_{прм}(t)$ – реальна чутливість приймача, дБВт.

Тут деякі параметри радіоканалу є залежними від часу, що пов'язано зі зміною положення КА в часі.

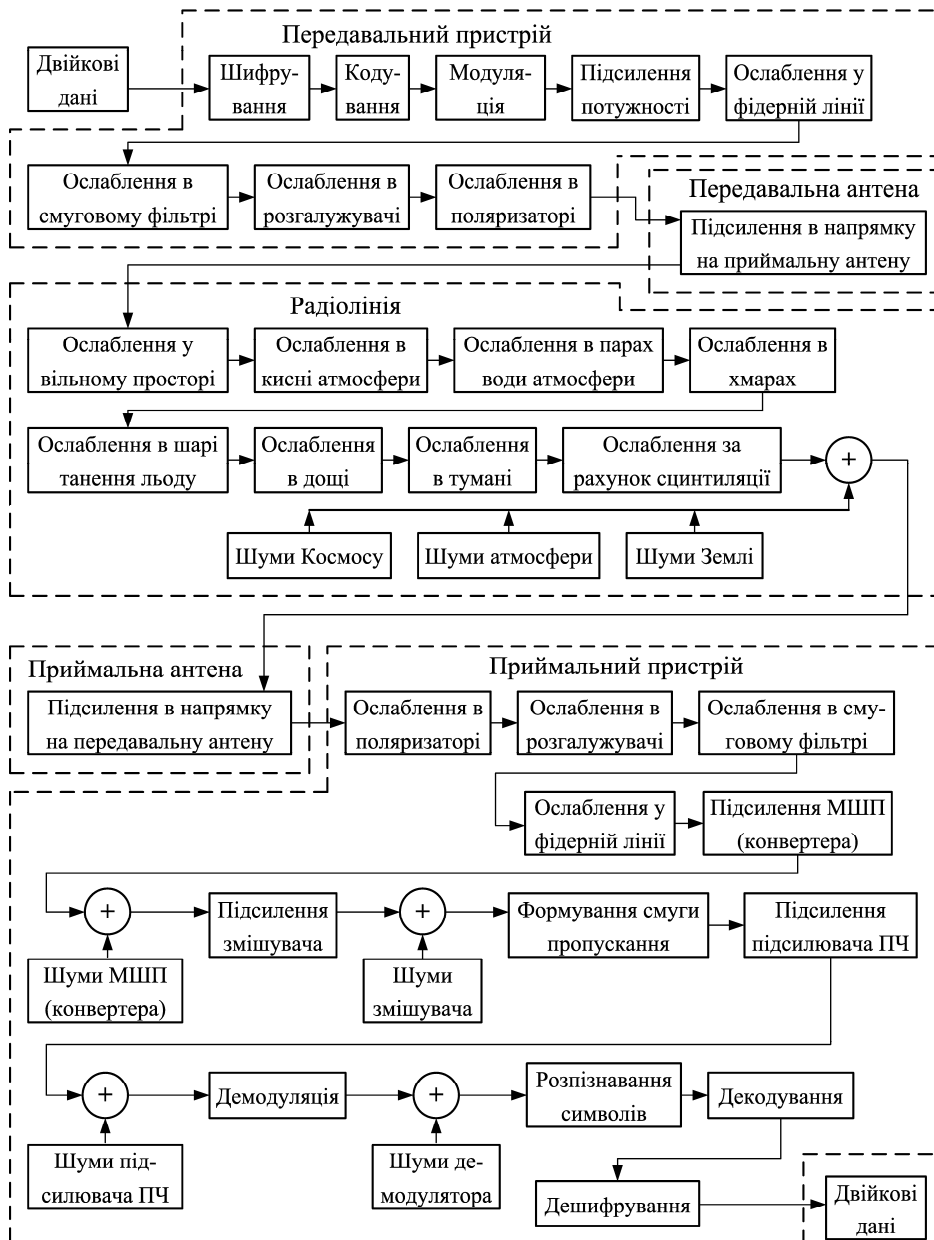


Рис. 3. Функційна схема проходження даних ДЗЗ через радіоканал КА – НІК, команд управління через радіоканал НКУТК – КА або телеметричної інформації через радіоканал КА – НКУТК

Величину

$$P_{зап}(t) = P_{прм_{вх}}(t) - L_{техн} - P_{прм}(t) \quad (2)$$

називають енергетичним запасом радіоканалу (дБ), що показує, наскільки потужність на вході приймача є більшою порівняно з мінімально допустимою для нормальної роботи, та залежить від параметрів передавального й приймального пристроїв у момент часу t так:

$$P_{зап}(t) = EIVП(t) - L_{рл}(t) + G_{А_{прм}}^e(t) - L_{техн} - P_{прм}(t), \quad (3)$$

де $EIVП(t)$ – еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність (ЕІВП), дБВт; $L_{рл}(t)$ – ослаблення сигналу в радіолінії, дБ; $G_{А_{прм}}^e(t)$ – ефективний КП приймальної антени, дБ.

Важливим параметром передавального пристрою та передавальної антени є ЕІВП, що дорівнює сумі потужності електромагнітного колювання на виході підсилювача потужності передавача й КП передавальної антени в напрямку на приймальну антену з урахуванням

ослаблення складових передавального пристрою між підсилювачем потужності передавача та передавальною антеною:

$$EIBП(t) = P_{npd} - L_{фл_{npd}} - L_{сф_{npd}} - L_{роз_{npd}} - L_{пол_{npd}} + G_{A_{npd}}(t), \quad (4)$$

де P_{npd} – потужність електромагнітного коливання на виході підсилювача потужності, дБВт; $L_{фл_{npd}}$ – ослаблення у фідерній лінії між підсилювачем потужності й смуговим фільтром; $L_{сф_{npd}}$ – ослаблення в смуговому фільтрі, дБ; $L_{роз_{npd}}$ – ослаблення в розгалужувачі, дБ; $L_{пол_{npd}}$ – ослаблення в поляризаторі, дБ; $G_{A_{npd}}(t)$ – КП передавальної антени в напрямку на приймальну антену, дБ.

Ефективний КП приймальної антени (дБ) дорівнює КП приймальної антени в напрямку на передавальну антену з урахуванням ослаблення енергії електромагнітної хвилі в складових приймального пристрою між приймальною антеною та МШП (конвертером):

$$G_{A_{nрм}}^e(t) = G_{A_{nрм}}(t) - L_{пол_{nрм}} - L_{роз_{nрм}} - L_{сф_{nрм}} - L_{фл_{nрм}}, \quad (5)$$

де $G_{A_{nрм}}(t)$ – КП приймальної антени в напрямку на передавальну антену, дБ; $L_{пол_{nрм}}$ – ослаблення в поляризаторі, дБ; $L_{роз}$ – ослаблення в розгалужувачі, дБ; $L_{сф_{nрм}}$ – ослаблення в смуговому фільтрі, дБ; $L_{фл_{nрм}}$ – ослаблення у фідерній лінії між смуговим фільтром і МШП (конвертером).

Для обчислення реальної чутливості приймача в цифровому телекомунікаційному каналі автор запропонував співвідношення, що, на відміну від широко вживаного виразу для аналогового телекомунікаційного каналу [8], урахує параметри цифрового потоку даних:

$$P_{nрм}(t) = 10 \lg \left(\frac{1}{a_{дем}} \frac{E_{\delta}}{N_0} \Big|_{P_{\delta_3}} k_B T_{KA(HK)_{nрм}}^e(t) \frac{v_{\delta} K_{зан}}{K_{код}} \right) - \Delta\beta_{код}, \quad (6)$$

де $a_{дем}$ – коефіцієнт пропорційності, що є характеристикою демодулятора, безрозмірна величина; $\frac{E_{\delta}}{N_0} \Big|_{P_{\delta_3}}$ – відношення енергії одного біта інформації до енергетичної спектральної густини білого шуму на виході демодулятора, необхідне для одержання заданої ймовірності бітової помилки P_{δ_3} при застосуванні певного виду модуляції сигналу, безрозмірна величина; $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Вт.с/К – стала Больцмана; $T_{KA(HK)_{nрм}}^e(t)$ – еквівалентна шумова температура приймального тракту КА (НК) або РРС, перерахована на вхід приймача приймального пристрою, К; v_{δ} – швидкість передавання інформації в цифровому телекомунікаційному каналі, біт/с; $K_{зан}$ – коефіцієнт запасу, що враховує необхідність розширення смуги пропускання реального приймача в зв'язку з неідеальністю смугових фільтрів, безрозмірна величина; $K_{код}$ – ступінь кодування, що є параметром застосованого завадостійкого коду, безрозмірна величина; $\Delta\beta_{код}$ – енергетичний виграш за рахунок кодування, що є параметром застосованого завадостійкого коду, дБ.

З останнього виразу за відношення потужності сигналу до потужності шуму на виході приймача $h_{вих} \Big|_{P_{\delta_3}} = 1$, що забезпечує певне допустиме задане значення ймовірності бітової помилки P_{δ_3} , у процесі розпізнавання інформації вирішуючим пристроєм при застосуванні конкретного виду модуляції та завадостійкого кодування в радіоканалі можливо одержати співвідношення для обчислення порогової чутливості приймача, що вказує на мінімальну потужність сигналу на вході приймача, за якої потужність сигналу на вході вирішуючого пристрою дорівнює потужності шуму:

$$P_{nрм,пор}(t) = 10 \lg \left(\frac{1}{a_{дем}} k_B T_{KA(HK)_{nрм}}^e(t) \frac{v_{\delta} K_{зан}}{\gamma_{мод} K_{код}} \right) - \Delta\beta_{код}, \quad (7)$$

де γ_{mod} – частотна ефективність модуляції, що є параметром застосованого виду модуляції сигналу, біт/с/Гц.

Якщо в співвідношенні (3) замінити реальну чутливість пороговою, то замість енергетичного запасу одержимо відношення потужності сигналу до потужності шуму $h_{вих}(t)$ (дБ) на виході демодулятора

$$h_{вих}(t) = EIBП(t) - L_{пл}(t) + G_{A_{нрм}}^e(t) - L_{техн} - P_{нрм_{пор}}(t), \quad (8)$$

що використовують для визначення ймовірності бітової помилки $P_b(h_{вих}(t))$ на виході вирішуючого пристрою.

Якщо додатково ввести поняття частотного програшу за рахунок кодування

$$\Delta\gamma_{код} = 10\lg(K_{код}), \quad (9)$$

вираз (6) можна подати так:

$$P_{нрм}(t) = 10\lg\left(\frac{1}{a_{дем}} \frac{E_{\delta}}{N_0} \Big|_{P_{\delta_3}} k_B T_{КА(НК)_{нрм}}^e(t) v_{\delta} K_{зан}\right) - \Delta\gamma_{код} - \Delta\beta_{код}. \quad (10)$$

Отже, останній вираз показує, як залежить реальна чутливість приймача в цифровому телекомунікаційному каналі від застосованих у системі виду модуляції та завадостійкого коду, що характеризується частотним програшем за рахунок кодування $\Delta\gamma_{код}$ та енергетичним виграшем за рахунок кодування $\Delta\beta_{код}$. Застосування завадостійкого коду забезпечує покращення енергетичної ефективності β системи, як правило, за рахунок погіршення її частотної ефективності γ , що в загальному підвищує інформаційну ефективність η системи.

4. Математичне моделювання радіоканалу КА – НІК для передавання даних ДЗЗ

Нижче наведено результати математичного моделювання радіоканалу КА – НІК для передавання даних ДЗЗ для певного моменту часу t у межах тривалості сеансу зв'язку $t_{зв}$, що здійснене з використанням удосконаленої автором математичної моделі радіоканалів систем ДЗЗ, супутникових систем зв'язку та радіорелейних систем передавання прямої видимості за допомогою ПЕОМ у такій послідовності: обчислення кута піднесення $\delta_{НК}(t)$ приймальної антени НІК та похилої дальності $R_{КА-НК}$ між КА та НК на основі відомих координат НІК та визначених координат підсупутникової точки КА; визначення оптимального діаметра $d_{АНК}$ рефлектора приймальної антени НІК; обчислення ЕІВП $EIBП(t)$ передавального пристрою та передавальної антени КА в напрямку на приймальну антену; визначення ослаблення в радіолінії $L_{пл}(t)$; обчислення ефективного КП $G_{A_{нрм}}^e(t)$ приймальної антени НІК у напрямку на передавальну антену; визначення ефективної шумової температури $T_{НК_{нрм}}^e(t)$ приймального тракту НІК, перерахованої на вхід приймача приймального пристрою; обчислення добротності $\frac{G}{T}(t)$ приймального пристрою; визначення потужності сигналу $P_{дем}(t)$ на вході демодулятора; визначення потужності шуму $P_{ш_{НК}}(t)_{дем}$ НІК, приведеної до входу демодулятора; обчислення відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході приймача $h_{вх}(t)$ та на виході демодулятора (на вході вирішуючого пристрою) $h_{вих}(t)$; визначення реальної чутливості приймача $P_{нрм}(t)$ або порогової чутливості приймача $P_{нрм_{пор}}(t)$; визначення енергетичного запасу $P_{зан}(t)$ радіоканалу; обчислення ймовірності бітової помилки $P_b(h_{вих}(t))$.

Моделювання здійснено з використанням передавальної антени КА із квазіоптимальною ДН з КП $G_{A2КА} \approx 6,3$ дБ у напрямку на НІК при куті піднесення $\delta_{НК} = 7^\circ$ приймальної антени НІК

($G_{A2KA} \approx 3,4$ дБ при $\delta_{HK} = 90^\circ$), ослабленні в атмосфері $L_{атм} = 0,884$ дБ при $\delta_{HK} = 7^\circ$ ($L_{атм} = 0,122$ дБ при $\delta_{HK} = 90^\circ$), з використанням приймальної антени НІК з діаметром рефлектора $d_{АНК} = 5,5$ м і КП $G_{АНК} \approx 51,6$ дБ в напрямку на КА, коефіцієнті шуму конвертера приймача $N_{ш\text{конв},\text{прм}} = 0,5$ дБ, КП підсилювача проміжної частоти (ПЧ) $Kp_{ПЧ,\text{прм}} = 15$ дБ за від'єданого кола зворотного зв'язку системи автоматичного регулювання підсилення (АРП), застосуванні модуляції КФМн і згорткового завадостійкого кодування зі ступенем кодування $K_{код} = 1/2$ й енергетичним вирашем за рахунок кодування $\Delta\beta_{код} = 5,1$ дБ. Результати математичного моделювання енергетичних параметрів радіоканалу КА – НІК для передавання даних ДЗЗ наведено в таблиці.

**Енергетичні параметри радіоканалу КА – НІК для передавання даних ДЗЗ
під час роботи з різними КА**

Параметр	КА	Ресурс-ДК1	TERRA	Quick Bird 2	Ikonos 2	Січ-2
ЕІВП при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБВт		15,6/ 12	15,8/ 13,0	15,6/ 11,8	15,8/ 12,9	11,2/ 8,3
Похила дальність при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, км		1858,9/ 479,66	2398,2/ 704,66	1779,9/ 449,66	2342,1/ 679,66	2314,8/ 667,66
Ослаблення енергії у вільному просторі при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБ		176,2/ 164,5	178,3/ 167,7	175,7/ 163,8	178,3/ 167,5	178,0/ 167,2
Ефективна шумова температура НІК, приведена до входу приймача приймального пристрою, при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, К		161,6/ 115,7	160,0/ 115,4	159,6/ 115,4	161,7/ 115,7	159,8/ 115,4
Добротність приймача при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБ/К		29,0/ 30,5	28,9/ 30,4	28,9/ 30,3	29,0/ 30,5	28,9/ 30,3
Потужність сигналу на вході приймача при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБВт		-110,4/ -101,5	-112,4/ -103,8	-110,1/ -101,2	-112,2/ -103,6	-116,7/ -108,1
Потужність шуму НІК, приведена до входу приймача, при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБВт		-125,0/ -126,5	-124,2/ -125,6	-120,9/ -122,3	-120,8/ -122,3	-131,1/ -132,5
Відношення потужності сигналу до потужності шуму на вході приймача при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБ		14,6/ 24,9	11,8/ 21,8	10,8/ 21,1	8,6/ 18,7	14,4/ 24,4
Шумова смуга пропускання приймача, МГц		141,6	173,0	369,1	369,1	354,3
Реальна чутливість приймача при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБВт		-116,6/ -118,0	-115,7/ -117,2	-112,5/ -113,9	-112,4/ -113,9	-122,6/ -124,0
Потужність сигналу на виході демодулятора при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБВт		-30,4/ -21,5	-32,4/ -23,8	-30,1/ -21,2	-32,2/ -23,6	-36,7/ -28,1
Потужність шуму НІК, приведена до виходу демодулятора, при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБВт		-45,0/ -46,5	-44,2/ -45,6	-40,9/ -42,3	-40,8/ -42,3	-51,1/ -52,5
Відношення потужності сигналу до потужності шуму на виході демодулятора при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБ		14,6/ 24,9	11,8/ 21,8	10,8/ 21,1	8,6/ 18,7	14,4/ 24,4
Енергетичний запас радіоканалу при забезпеченні ймовірності бітової помилки 10^{-6} при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$, дБ		6,1/ 16,5	3,4/ 13,3	2,4/ 12,7	0,2/ 10,2	5,9/ 16,0
Ймовірність бітової помилки при кутах піднесення $7^\circ/90^\circ$		$<1 \cdot 10^{-15}$ / $<1 \cdot 10^{-15}$	$<1 \cdot 10^{-15}$ / $<1 \cdot 10^{-15}$	$1,8 \cdot 10^{-10}$ / $<1 \cdot 10^{-15}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$ / $<1 \cdot 10^{-15}$	$<1 \cdot 10^{-15}$ / $<1 \cdot 10^{-15}$

На основі аналізу результатів досліджень видно, що при зв'язку НІК з усіма КА є наявний енергетичний запас радіоканалу за ймовірності бітової помилки 10^{-6} при куті піднесення в межах $7...90^\circ$, що може змінюватись у межах $0,2...16,5$ дБ. Для забезпечення нормального функціонування системи ДЗЗ у приймачі слід застосувати систему АРП із глибиною регулювання $0...40$ дБ. Потужність сигналу на виході демодулятора буде меншою порівняно з наведеною в таблиці при врахуванні ослаблення у фідерній лінії між конвертером і підсилювачем ПЧ. За наявності додаткового ослаблення в радіоканалі, що виникає під час технічної реалізації системи, у межах

$L_{техн} = 0..4$ дБ з використанням приймальної антени НІК із діаметром рефлектора $d_{АНК} = 5,5$ м можливо забезпечити надійну роботу системи ДЗЗ з усіма розглянутими КА за винятком Ікопос 2, для якого в такому випадку слід збільшити діаметр рефлектора $d_{АНК}$.

Висновки

1. Удосконалено математичну модель радіоканалів систем ДЗЗ, супутникових систем зв'язку, радіорелейних систем передавання прямої видимості та інших аналогічних систем, зокрема систем зв'язку з літальними апаратами та зв'язку між КА, що дало змогу підвищити точність визначення енергетичного потенціалу та ряду інших основних параметрів радіоканалів КА – НК, НК – КА та РРС 1 – РРС 2 залежно від часу t .

2. Наведено структурні та функційні схеми радіоканалів таких систем, враховано основні важливі складові радіоканалів, що впливають на точність обчислень.

3. Наведено результати математичного моделювання радіоканалу КА – НІК для передавання даних ДЗЗ для різних моментів часу (кутів піднесення приймальної антени НІК), що одержані з використанням удосконаленої математичної моделі.

4. Удосконалену математичну модель радіоканалів систем ДЗЗ, супутникових систем зв'язку, радіорелейних систем передавання прямої видимості та інших аналогічних систем доцільно використовувати при проектуванні сучасних високоефективних систем ДЗЗ та систем зв'язку.

1. Манойлов В.П. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації: монографія / В.П. Манойлов, В.В. Омельчук, В.В. Опанюк. – Житомир: ЖДТУ, 2008. – 384 с. 2. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: учебное пособие; ч. 1. / А.П. Дятлов. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 95 с. 3. Справочник по радиорелейной связи / Н.Н. Каменский, А.М. Модель, Б.С. Надененко [и др.]; под ред. С.В. Бородича. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.: ил. 4. Прокис Дж. Цифровая связь: [пер. с англ.] / Дж. Прокис; под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.: ил. 5. Ильченко М.Е. Телекоммуникационные системы на основе высотных аэроплатформ / М.Е. Ильченко, С.А. Кравчук. – К.: НПП «Издательство «Наукова думка» НАН України», 2008. – 580 с.: ил. 6. Седки С. Методология оптимального проектирования сетей спутниковой связи [Электронный ресурс] / С. Седки. – 2005. – Режим доступа: <http://www.ntcnvg.ru/lekcii/spis.htm>. 7. Горбатий І.В. Розробка математичної моделі радіоканалу космічний апарат-приймальна станція та її дослідження на прикладі проекту EgepSat-1 / І.В. Горбатий, В.І. Горбатий // Зб. наук. пр. (Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України). – К.: 2008. – Вип. 46. – С. 162-170. 8. Проектирование радиоприемных устройств: учебное пособие для вузов / Клич С.М., Кривенко А.С., Носикова Г.Н. [и др.]; под ред. А.П. Сиверса. – М.: Советское радио, 1976. – 488 с.