

**В. В. Павлюк, П. П. Топольницький, О. В. Франжі, С. П. Фриз**

## **СТВОРЕННЯ НАВЧАЛЬНОГО ПУНКТУ ПРИЙОМУ ІНФОРМАЦІЇ З КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГРАМНООБУМОВЛЕНОГО РАДІО**

*У статті запропоновано підходи до використання радіоприймальних пристроїв, виконаних на основі технології програмнообумовленого радіо для прийому інформації з космічного апарата (КА) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) при використанні сучасних протоколів передачі інформації. Проведено розрахунок параметрів радіоприймального тракту для прийому інформації з КА «Метеор-М № 2». Сформовано рекомендації щодо використання розробленої методики для організації пунктів прийому інформації середнього та високого розрізнення.*

**Постановка проблеми.** У теперішній час на навколосемних орбітах знаходиться близько 100 КА ДЗЗ. Для передачі цільової інформації з борту КА залежно від особливостей реалізації цільової апаратури, просторового розрізнення, кількості спектральних каналів та інших факторів використовуються різні формати передачі даних.

При створенні пункту прийому цільової інформації з КА ДЗЗ найбільшу складність становить розробка та виготовлення радіоприймального тракту. Він повинен відповідати таким вимогам: можливість роботи в заданому діапазоні частот, висока чутливість та вибірковість, великий динамічний діапазон, можливість роботи як в аналоговій, так і в цифровій радіолінії з різними типами сигналу, здійснювати його декодування, мати невеликі габарити та енергоспоживання, прийнятну вартість.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Розроблені на сьогоднішній день подібні станції мають великі розміри, велику вартість та потребують складного обслуговування, тому їх використання в навчальному процесі ускладнено. З 2001 року фахівці Житомирського військового інституту експлуатують стаціонарні пункти прийому спеціальної інформації середнього та низького розрізнення з КА серії NOAA. При цьому радіоприймальні тракти побудовані на основі радіоприймальних пристроїв (РПрП) з аналоговою обробкою сигналу [1]. Як показав досвід експлуатації, таким пристроям притаманні недоліки: низька завадозахищеність, складність виготовлення високочастотних ланцюгів та необхідність значної модернізації при зміні протоколів передачі інформації. Для усунення вказаних недоліків пропонується використовувати РПрП з цифровою обробкою. До недавнього часу альтернативи використання цифрових сигнальних процесорів у таких приймачах не було. Однак з розвитком обчислювальної техніки, особливо персональної електронно-обчислювальної машини (ПЕОМ), з потужними багатоядерними процесорами з'явилась можливість здійснювати цифрову обробку сигналу в них у реальному масштабі часу за допомогою спеціального програмного забезпечення [2]. У літературі такі приймачі отримали назву SDR (software-defined radio) приймачі, або програмнообумовленого радіо.

**Формулювання завдання дослідження.** Метою статті є дослідження доцільності створення програмнообумовлених приймальних трактів пунктів прийому цільової інформації з КА ДЗЗ із відкритими протоколами передачі даних та відомими параметрами радіолінії. Досягнення мети роботи передбачає проведення розрахунків елементів радіотракту та обґрунтування критеріїв вибору програмного забезпечення та апаратних засобів для реалізації пункту прийому.

**Виклад основного матеріалу.** Апаратна частина SDR приймача складається з пристрою попередньої селекції, аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та формувача двох квадратурних складових, які вводяться для подальшої обробки в ПЕОМ (рис. 1).



*Рис. 1. Структурна схема SDR приймача*

До складових РПрП ставляться вимоги відповідно до характеристик радіолінії того КА, з якого необхідно прийняти цільову інформацію.

У табл. 1 подано обмежений перелік КА ДЗЗ з характеристиками радіоліній, які забезпечують передачу інформації низької та середньої роздільної здатності.

*Таблиця 1*

**Перелік КА ДЗЗ з характеристиками радіоліній**

Тип КА	Протокол передачі даних	Частота несучої, МГц	Тип модуляції	Швидкість передачі даних, кодування інформації
NOAA	APT	137.100...137.950	AM/ЧМ	Аналогова радіолінія
	HRPT	1698...1707	Спліт ФМ	665.4 kbps Манчестер-код
Метеор-М N2	LRPT	137.100	QPSK	72 kbps R1/2, k=7
	HRPT	1698...1707	Спліт ФМ	665.4 kbps Манчестер-код
TERRA	DB	8212.5	OQPSK	13.125 Mbps Convolutional encoded
AQUA	DB	8160.0	SQPSK	15 Mbps NRZ-L RS encoded CCSDS bit interleaved on I and Q
NPP	HRD DB	7812.0	QPSK	15 Mbps NRZ-M Convolutional encoded I=G1, Q=inverted G2, R1/2 k=7
FY-3	HRPT	1704.5	QPSK	4.2 Mbps R3/4 CCSDS

Основними характеристиками радіолінії, що впливають на вибір РПрП із заданими параметрами, є:

- несуча частота сигналу;
- тип модуляції;

швидкість передачі даних;  
 параметри кодування інформації;  
 потужність бортового передавача;  
 параметри передавальної антени;  
 максимальна похила дальність до КА, яка визначається параметрами його орбіти.

Несуча частота сигналу повинна бути в межах робочого діапазону частот РПрП. Для розширення робочого діапазону частот можливе використання конвертора.

Тип модуляції, швидкість передачі даних та параметри кодування впливають на ширину спектра сигналу і потребують відповідної смуги обробки.

Потужність бортового передавача, параметри передавальної антени та параметри орбіти КА впливають на вимоги до коефіцієнта шуму ( $K_{ш}$ ) та коефіцієнта підсилення ( $K_p$ ) РПрП, а також на характеристики приймальної антени для забезпечення якісних характеристик отриманого зображення.

Крім того, тип модуляції (амплітудна модуляція (АМ), частотна модуляція (ЧМ), фазова модуляція (ФМ)), швидкість передачі даних та параметри кодування інформації впливають на структуру програмнообумовленого цифрового тракту, в якому відбуваються основні етапи обробки сигналу: фільтрація, демодуляція, декодування та формування отриманих даних у потрібному вигляді.

З аналізу табл. 1 видно, що для прийому інформації з різних КА структура тракту повинна відповідати характеристикам відповідної радіолінії. Але саме той факт, що радіотракт програмнообумовлений, дає змогу оперативно змінювати його структуру. Таким чином, структура програмнообумовленого тракту для прийому сигналів із зазначених в табл. 1 КА може бути такою (рис. 3).

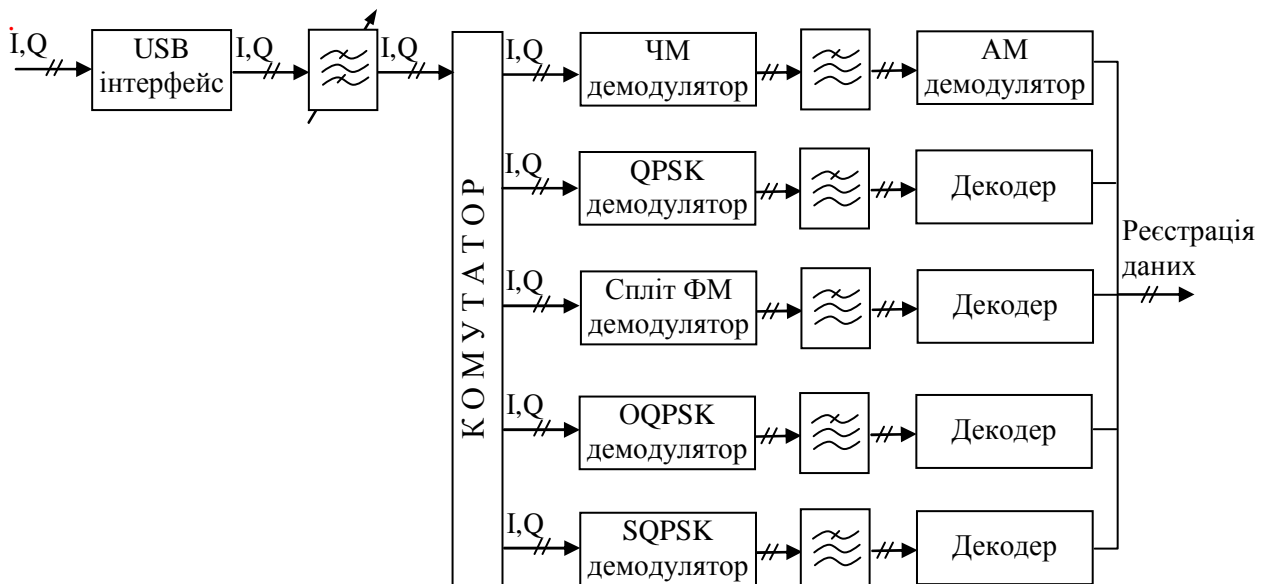


Рис. 3. Структура програмнообумовленого тракту обробки сигналів

Для прикладу проведення розрахунків оберемо радіолінію передачі даних низького розрізнення з використанням формату LRPT (Low Resolution Picture Transmission), яка встановлена на КА «Метеор–М № 2», виведеному на колову орбіту висотою близько 850 км в липні 2014 року, що успішно функціонує по теперішній час.

У цій радіолінії дані передаються на несучій частоті 137,1 МГц, потужність бортового передавача 10 Вт, коефіцієнт підсилення бортової антени під кутом 63° від надиру становить 2,2 дБ, використовується чотирирівнева відносна фазова QPSK (quadrature phase shift keying) модуляція зі швидкістю передачі даних  $R = 72$  кБіт/с та завадостійке кодування з параметрами  $R = 1/2, k = 7$ .

У результаті прийому та обробки цільової інформації отримуємо зображення земної поверхні в трьох спектральних діапазонах у смузі 2800 км з максимальною роздільною здатністю 1,1 км.

Однією з характеристик цифрової радіолінії, яка визначає якість її роботи в цілому, є величина ймовірності помилки при прийомі одного символу інформації [3]:

$$P_{\text{поме}} = 0,5 \exp(-h_0^2), \quad (1)$$

$$h_0^2 = \frac{E_c}{N_o} = \frac{P_c \cdot \tau_c}{N_o}, \quad (2)$$

де  $E_c$  – енергія сигналу на вході РПрП;

$N_o$  – спектральна щільність потужності шумів на вході приймача;

$P_c$  – потужність сигналу на вході приймача;

$\tau_c$  – інтервал часу для передачі одного інформаційного символу.

Відомо [4], що для отримання якісного зображення поверхні Землі необхідно виконати умову

$$P_{\text{поме}} \leq 10^{-7}.$$

Використовуючи вирази (1) та (2), можна визначити необхідну потужність сигналу на вході РПрП для забезпечення такої помилки:

$$P_c \geq \frac{\ln 2 P_{\text{поме}} \cdot N_o}{\tau_c}; \quad (3)$$

$$N_o = T_A \cdot K_{ш} \cdot k,$$

де  $T_A$  – шумова температура антени (для наземних станцій приймається така, що дорівнює 290 К°);

$K_{ш}$  – коефіцієнт шуму РПрП;

$k$  – стала Больцмана.

Враховуючі дані табл. 1, тривалість інформаційного символу для радіолінії, яка розглядається, становить  $\tau_c = 13,89 \cdot 10^{-6}$  с.

Як правило, для компенсації втрат у фідері антенно-фідерного пристрою (АФП) використовується антенний підсилювач (АП), який встановлюється безпосередньо на антені. Для діапазону частот 137–138 МГц можлива його технічна реалізація з параметрами  $K_{ш} \leq 1,6$  дБ та  $K_p > 30$  дБ.

Враховуючи, що цей підсилювач є першим активним елементом радіоприймального тракту, то його коефіцієнт шуму практично визначає коефіцієнт шуму всього радіоприймального тракту.

Використовуючи вираз (1), можна визначити, що для забезпечення  $P_{\text{пом}} \leq 10^{-7}$  необхідний рівень потужності сигналу на виході антени повинні бути не менше  $P_c \geq 6,4 \cdot 10^{-15}$  Вт.

Використовуючи формулу радіозв'язку, визначимо необхідний коефіцієнт підсилення приймальної антени для забезпечення такого рівня сигналу:

$$G_{np} \geq \frac{(4\pi R)^2 \cdot P_c}{P_{nep} \cdot G_{nep} \cdot \lambda^2 1/L_{втр}}, \quad (4)$$

де  $R$  – максимальна відстань до КА при проведенні сеансу зв'язку (для КА «Метеор–М № 2»  $R = 3000$  км);

$P_c$  – необхідна потужність сигналу на вході антени;

$P_{nep}$  – потужність бортового передавача;

$G_{nep}$  – коефіцієнт підсилення бортової передавальної антени;

$\lambda$  – довжина хвилі в радіолінії;

$L_{втр}$  – коефіцієнт, який характеризує втрати сигналу в радіолінії та визначається як

$$L_{втр} = L_{АФП} + L_{атм} + L_n,$$

де  $L_{АФП}$  – втрати в антені, узгоджуючих, з'єднуючих елементах та у фідері;

$L_{атм}$  – втрати в атмосфері Землі;

$L_n$  – втрати, які характеризуються нерівномірністю діаграми спрямованості антени (для неспрямованих антен).

У зв'язку з тим, що коефіцієнт підсилення антенного підсилювача взято на рівні  $K_p > 30$  дБ, що на кілька порядків більше, ніж затухання у фідері, а також за умови якісного виготовлення антени, узгоджуючих елементів і з'єднань, загальні втрати в АФП можна звести до 2 дБ.

Втрати в атмосфері Землі під час сильного дощу, снігу, навіть за наявності грозових хмар у діапазоні 137–138 МГц можуть досягати до 3 дБ. Втрати, пов'язані з нерівномірністю характеристики діаграми спрямованості антени, можуть також становити до 3 дБ [4].

Виходячи з цього та використовуючи вираз (4), коефіцієнт підсилення приймальної антени становить  $G_{np} \geq 0,72$  (–1.4 дБ).

Розрахований коефіцієнт підсилювання зі значним запасом може забезпечити антена з діаграмою спрямованості у вигляді верхньої півкулі. Використовуючи два взаємно перпендикулярних напівхвильових вібратори, розташованих у горизонтальній площині з рефлектором, можна отримати саме таку діаграму спрямованості і коефіцієнт підсилення до 2 дБ.

Виходячи з того, що в радіолінії використовується колова поляризація електромагнітної хвилі, необхідно при підключенні вібраторів забезпечити зсув фаз сигналів між ними на  $\lambda/4$ . Крім того, при з'єднанні двох напівхвильових вібраторів паралельно їх загальний опір становить приблизно 37 Ом, а для узгодження зі стандартним значенням вхідного опору антенного підсилювача (75 Ом) необхідно використовувати узгоджуючий пристрій. Наприклад,  $\lambda/4$  – трансформатор з коаксіального кабелю з хвильовим опором:

$$R_{\lambda/4} = \sqrt{r_1 \cdot r_2}, \tag{5}$$

де  $r_1$  – опір двох паралельно з'єднаних вібраторів;

$r_2$  – вхідний опір підсилювача.

Використовуючи співвідношення (5), визначимо  $R_{\lambda/4} \approx 50$  Ом.

Для корегування характеристик діаграми спрямованості антени можна розташувати рефлектор на відстані від  $\lambda/4$  до  $\lambda/2$  від вібраторів, що забезпечить невеликий провал характеристики під кутом  $90^\circ$  і за рахунок цього збільшення коефіцієнта підсилення антени на малих кутах. Це потрібно для кращого прийому сигналу, коли КА знаходиться на малих кутах місця при проведенні сеансу зв'язку.

Таким чином, визначено склад і характеристики елементів пункту прийому спеціальної інформації в діапазоні частот 137–138 МГц сигналів у форматі LRPT. Можливий варіант структурної схеми пункту прийому зображений на рис. 2



*Рис. 2. Структурна схема пункту прийому цільової інформації з КА Д33*

Наступним кроком є визначення типу SDR приймача серед тих, що представлені на ринку радіоелектронної продукції (табл. 2). При цьому бажано, щоб його ціна була мінімальною при забезпеченні таких вимог, як:

діапазон робочих частот повинен забезпечити прийом сигналів у смузі частот 137–138 МГц;

смуга обробки сигналу повинна перевищувати його ширину спектра, яка становить 72 кГц;

приймач повинен забезпечувати безперервну передачу відліків двох квадратурних складових прийнятого сигналу в ПЕОМ, використовуючи один з інтерфейсів, для зручності бажано USB.

*Таблиця 2*

**Основні характеристики SDR приймачів**

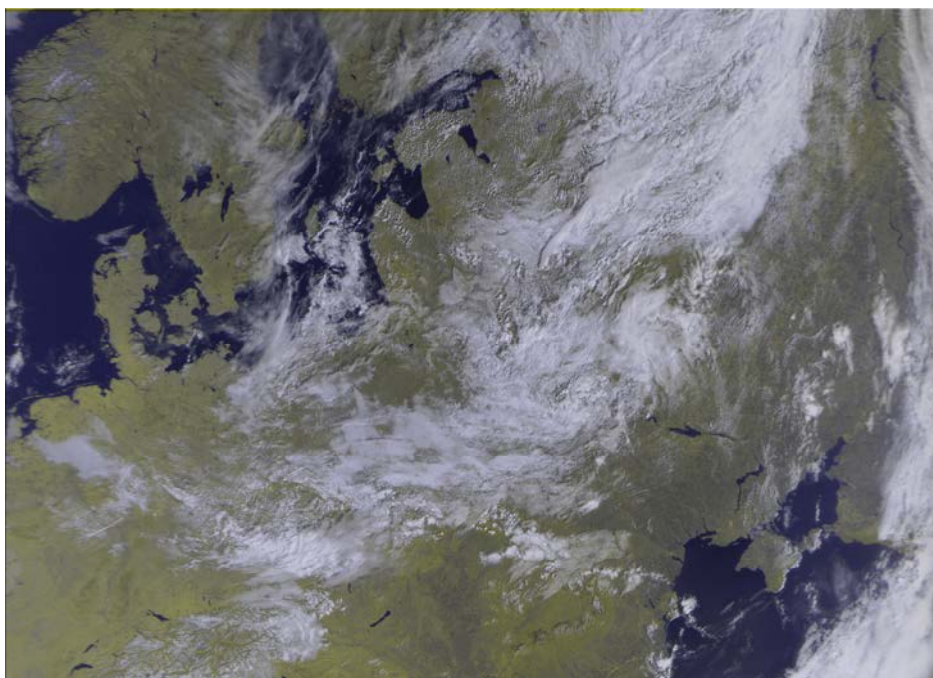
Найменування приладу	Діапазон частот, що приймається, МГц	Смуга частот, що підлягає обробці, МГц	Хост-інтерфейс	Сумісність з операційними системами	Базова ціна, \$
BladeRF	300...3800	40	USB 3.0	Windows, Linux	420
ELAD FDM-S1	0,02...200	61,44	USB 2.0	Windows	369
ELAD FDM-S2	0,009...160	122,88	USB 2.0	Windows	525
FLAX-6700R	0,01...73, 135...165	245,76MSPS	Ethernet	Windows, Linux	6399
Noctar	0,1...4000	200	PCI Express 4	Linux	2500
Realtek RTL2832U R820T	24...1766	3,2	USB 2.0	Windows, Linux	10
HackRF ONE	1...6000	20	USB 2.0	Windows, Linux	299

Виходячи з викладених вимог та аналізу табл. 2, доцільно обрати SDR РПрП на основі тюнера R820T та багатофункціональної мікросхеми RTL2832, до складу якої входить АЦП, формувач квадратурних складових сигналу, інтерфейс вводу даних USB – 2.0. Також дана мікросхема забезпечує управління тюнером R820T.

Як видно, характеристики цього приймача повністю відповідають поставленим вимогам з великим запасом, а його ціна є прийнятною для створення навчального пункту прийому цільової інформації.

З використанням проведеного аналізу на кафедрі геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова розроблено та впроваджено у навчальний процес пункт прийому спеціальної інформації з КА ДЗЗ низького розрізнення.

Протягом року за допомогою розробленого пункту проведено більше 300 сеансів прийому спеціальної інформації. При цьому використання SDR технології порівняно з аналоговою системою дозволило суттєво покращити якість отриманих зображень поверхні Землі.



*Рис. 3. Зображення, отримане на розробленому пункті прийому цільової інформації*

З використанням поданої методики передбачається розробка пунктів прийому спеціальної інформації для прийому зображення середнього та високого розрізнення в діапазонах 1,7 та 8,2 ГГц.

**Висновки.** У статті обґрунтовано склад пункту прийому цільової інформації та запропоновано структуру програмнообумовленого радіоприймального тракту.

Запропонована методика розрахунків параметрів радіолінії може бути використана для розробки пунктів прийому спеціальної інформації, щоб приймати зображення середнього та високого розрізнення в діапазонах 1,7 та 8,2 ГГц.

Використання цифрової обробки сигналу на основі SDR РПрП доцільне та дає можливість створення навчального пункту прийому цільової інформації, при цьому якість отриманих зображень покращується.

Практичні заняття з використанням розглянутих засобів дозволять покращити навички курсантів з експлуатації сучасних цифрових засобів прийому та обробки інформації.

### **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Дистанционное зондирование Земли из космоса: получение и использование информации: монография; под общ. ред. д.воен.н., проф. С. П. Мосова. – Днепропетровск: Стилус, 2012. – 320 с.
2. Ричард Лайонс. Цифровая обработка сигналов / Ричард Лайонс. – [2-е изд.] ; пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.: ил.
3. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Бернанд. – [2-е изд.] ; пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ.
4. Парфенюк В. Г. Основи побудови систем управління космічними апаратами. Ч. III. Особливості побудови і функціонування командних радіоліній командно-вимірювальних систем КВК: конспект лекцій / В. Г. Парфенюк, П. П. Топольницький. – Житомир: ЖВІРЕ, 2003. – 144 с.: іл.

Подано 05.10.2015

**В. В. Павлюк, П. П. Топольницький, А. В. Франжи, С. П. Фриз**

#### **СОЗДАНИЕ УЧЕБНОГО ПУНКТА ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ С КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАМНООБУСЛОВЛЕННОГО РАДИО**

*В статье предложены подходы использования радиоприемных устройств, построенных на основе технологии программнообусловленного радио для приема информации с космических аппаратов дистанционного зондирования Земли при использовании современных протоколов передачи информации. Проведен расчет параметров радиоприемного тракта для приема информации с космического аппарата «Метеор-М № 2». Сформулированы рекомендации по использованию разработанной методики для организации пунктов приема информации среднего и высокого разрешения.*

**V. V. Pavlyuk, P. P. Topolnytsky, O. V. Franzhy, S. P. Fryz**

#### **THE CREATION OF THE TRAINING CENTER FOR RECEPTION INFORMATION FOR THE SPACE AIRCRAFT DISTANCE PROBE OF THE EARTH.FOR USAGE OF SOFTWARE DEFINED RADIO TECHNOLOGY**

*The article proposes the methods of using radio-receiving stations which are constructed on the basis of software defined radio for reception of information from space aircraft distance probe of the Earth with usage of modern protocols of transmission information. The calculations of parameters of radio routes for reception information for space aircraft "Meteor-M № 2". The recommendations are formed for the usage of worked out methods for radio-receiving stations of middle and high resolution reception.*