

УНІВЕРСАЛЬНИЙ ДЕМОДУЛЯТОР СИГНАЛІВ СИСТЕМИ ПРИЙОМУ ІНФОРМАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Запропонована функціональна схема та приведена практична реалізація універсального демодулятора підвищеної точності і завадостійкості цифрових сигналів системи прийому інформації КА ДЗЗ

Ключові слова: космічний апарат, дистанційне зондування Землі, приймальний тракт, демодулятор, квадратурна модуляція, цифровий синтезатор, цифрова обробка сигналів

R.P. HOPTINSKIY, A.A.TARANCHUK, S.K. PIDCHENKO

Khmelnitskiy national university

UNIVERSAL DEMODULATOR OF SIGNALS RECEPTION SYSTEM OF INFORMATION SPACECRAFT OF REMOTE SENSING OF EARTH

Offered functional diagram and the brought practical realization over of universal demodulator of high accuracy and noise immunity digital signals of the system of reception information of remote sensing of Earth

Keywords: spacecraft, remote sensing of Earth, receiving channel, demodulator, quadrature modulation, digital synthesizer, digital signal processing

Вступ

Міжнародна конфігурація супутників, які використовуються для вивчення стану атмосфери і поверхні Землі [1], на теперішній час, включає велику кількість геостационарних супутників різних відомств і країн (Meteosat, MSG, GOES, GMS, GOMS, COMS, INSAT), полярно-орбітальних супутників (Metop, METEOR 3M, FY-1/3, NPOESS і інш.), науково-дослідних супутників (ENVISAT/ERS-2, Meteor-3M No.1, SPOT-5, TERRA, Aqua, TRMM, Quicksat, Jason-1, Ocean series і інш.) (рис.1). Створення космічних засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), як продукту найсучасніших високих технологій, надає можливість оперативного отримання даних глобального масштабу з високою просторовою, спектральною та часовою розрізненістю. Спостерігається швидкий прогрес в області підвищення технічного рівня космічних апаратів і скорочення витрат на їх створення та експлуатацію. Це забезпечується за рахунок використання нових конструкційних матеріалів і методів проектування, мінімізації масогабаритних характеристик, розробки уніфікованих орбітальних платформ, "інтелектуалізації" бортових функцій на основі сучасних комп'ютерних засобів і технологій, перспективних можливостей формування багатосупутникових "кластерних" космічних систем із різнотипних КА ДЗЗ [1].

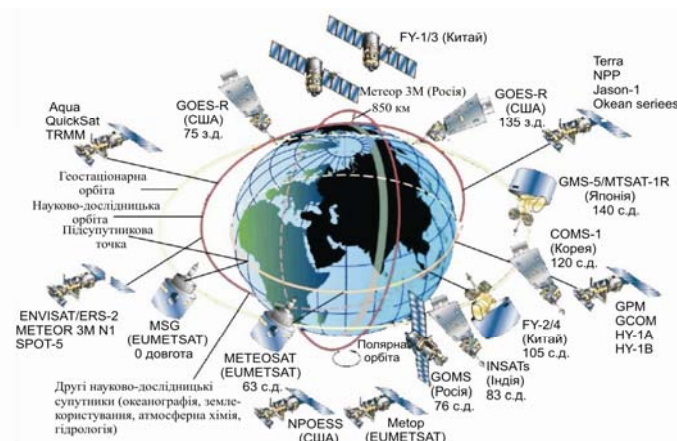


Рис. 1. Супутникова система спостережень

Однією із головних проблем при прийомі інформації ДЗЗ різноманітних космічних апаратів (КА), що передають інформацію з різною швидкістю є забезпечення якісного її прийому наземними приймальними станціями. З появою великої кількості нових космічних апаратів систем спостережень виникає необхідність удосконалення апаратури наземних приймальних станцій ДЗЗ, а саме створення універсальних демодуляторів приймального тракту для прийому і обробки спеціальної інформації сучасних КА.

Метою роботи є підвищення точності і завадостійкості демодулятора цифрових сигналів системи прийому інформації КА ДЗЗ та забезпечення його універсальності.

1. Огляд існуючих пристроїв прийому і обробки спеціальної інформації наземних станцій

Демодулятори для прийому інформації ДЗЗ, які розроблені до теперішнього часу, мають обмежене функціональне призначення, так як створювались для прийому інформації конкретних КА, що пов'язано з використанням елементної бази, що не передбачала можливість зміни параметрів прийому інформації. Порівняльні характеристики різних станцій прийому Центрі прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля (ЦПОСІ та КНП) і їх можливості прийому інформації перспективних КА ДЗЗ після модернізації демодулятора приймального тракту наведені в таблиці 1 [2].

Таблиця 1

№ з/п	Назва станції прийому інформації	Забезпечення прийому інформації КА	Зовнішній вигляд станції (антени)	Можливості прийому інформації КА після модернізації демодулятора
1	ППП-1.7	Січ, NOAA, Ресурс-04, MeteoSat-6,7, Orb-View-2 в форматі даних HRPT		МЕТОР, FY-1/3, FY-2/4
2	ЕОСКАН-ПТ	TERRA (X діапазон)	 	AQUA, SUOMI NPP і інші
3	ПС-8.2	МЕТЕОР-3М (прибор МСУ-Э), СІЧ-1М, EgyptSat-1	 	СІЧ-2
4	УНСПІ-8.2	Серія СІЧ, EgyptSat-1	 	СІЧ-2 EnviSat (прилади Meris, Asar) і інші

Наприклад, демодулятори приймача Ц300М станції прийому ППП 1.7 і УНСПІ-8.2 виробництва ALCATEL BELL SPACE (рис. 2,а,б), що використовуються в ЦПОСІ та КНП (м. Дунаївці, Україна) забезпечують прийом інформації зі швидкостями 665 Кбіт/с та 50 Мбіт/с, відповідно, і на теперішній час потребують модернізації, так як неспроможні забезпечити прийом інформації перспективних КА, швидкість передачі інформації яких сягає від 5 до до 320 Мбіт/с. До недоліків цих систем відноситься неможливість їх мобільного переналаштування, що суперечить сучасним вимогам до наземної апаратури наземних станцій ДЗЗ.



а)



б)

Рис. 2. Демодулятори станцій ДЗЗ ЦПОСІ та КНП: демодулятор приймача Ц300М станції ППП 1.7 (а); демодулятор ALCATEL BELL SPACE станції УНСПІ-8.2 (б)



а)



б)

Рис. 3. Демодулятори закордонних виробників: Alcatel 9910 OMNISAT (а) фірм Kongsberg spacetec (б)

На сучасні приймальних станціях наземних систем ДЗЗ використовують як аналогову так і цифрову елементну базу для створення квадратурних демодуляторів приймального тракту.

Відомі квадратурні демодулятори, що запропоновані в роботах [3-5] і використовують аналогові компоненти для побудови деяких своїх вузлів мають певні недоліки до яких відносяться:

- наявність похибок обробки сигналів через низьку стабільності реалізованих на аналогових компонентах кіл формування квадратурних опорних сигналів під впливом зовнішніх дестабілізуючих факторів, зокрема температури;

- низька точність та завадостійкість демодуляції сигналів із квадратурною модуляцією, що обумовлено неможливістю забезпечення високої стабільності та квадратурної точності опорних сигналів демодулятора через використання фазообертача на аналогових компонентах та генератора радіочастотних коливань з низькою температурною стабільністю.

Відомий демодулятор цифрових частотно-модульованих сигналів [3], який містить синфазний та квадратурний канали, кожен з яких складається із змішувача, фільтра нижніх частот та обмежувача, які працюють в робочій смузі частот, а всі елементи схеми за обмежувачами побудовані на цифрових елементах. Недоліком даного пристрою є похибки демодуляції сигналів, обумовлені порушенням ортогональності опорних коливань та їх частотної неузгодженості з вхідним сигналом.

Зроблений в роботі аналіз класичних методів побудови фазомодульованих демодуляторів [3-5] показав, що вони пов'язані із достатньо складними апаратними рішеннями і потребують ретельного налагодження. При цьому поява програмованих логічних інтегральних схем дозволяє реалізувати складні цифрові алгоритми роботи в межах одного компактного корпусу мікросхеми [3].

2. Структура універсального демодулятора QPSK сигналів

Виходячи з технічних характеристик станцій прийому інформації, які розташовані на території України та згідно технічних характеристик КА ДЗЗ демодулятор повинен задовольняти наступним вимогам [2]:

- вхідна частота 720 МГц;
- мінімальний рівень вхідного сигналу при якому можливий прийом інформації з похибками, не більш як $1 \cdot 10^{-6}$ при С/Ш 10 дБ (-24) дБм;
- швидкість прийому інформації до 100 Мбіт/с.

Структура розробленого демодулятора QPSK сигналів приймального тракту системи прийому і обробки інформації КА дистанційного зондування Землі наведена на рис. 4.

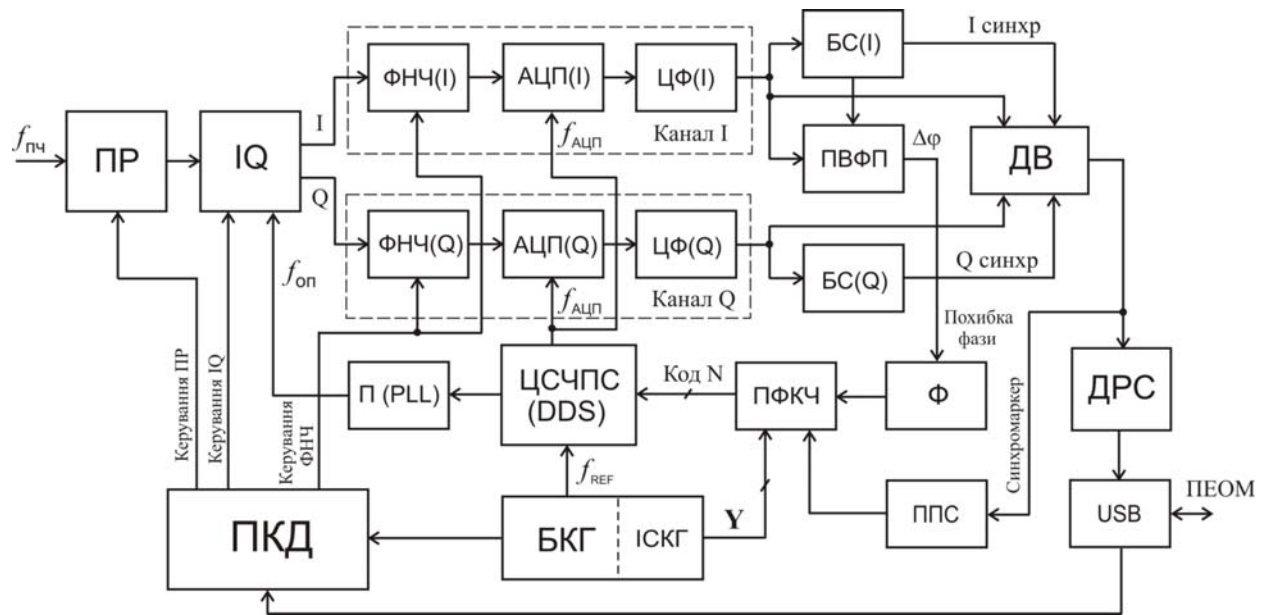


Рис. 4. Структура універсального демодулятора QPSK сигналів:

ПР – підсилювач радіочастоти; IQ – демодулятор квадратурних складових; ФНЧ – фільтр нижніх частот; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЦФ – цифровий фільтр; БС – бітовий синхронізатор; ДВ – декодер Вітербі; ПВФП – пристрій визначення фазової похибки; ЦСЧПС – цифровий синтезатор частоти прямого синтезу; ПФКЧ – пристрій формування коду частоти; Ф – фільтр; П – помножувач; ДРС – детектор Ріда-Соломона; ППС – пристрій пошуку синхромаркера; ПКД – пристрій керування демодулятором; БКГ – багаточастотний кварцовий генератор; ІСКГ – ідентифікатор стану кварцового генератора

Носійна частота сигналу із супутникового ретранслятора 8,2 ГГц після прийому, підсилення та конвертування (перенесення за спектром) утворює сигнал проміжної частоти f_{ix} 720 МГц, який надходить на вхідний підсилювач радіочастоти (ПР) з системою автоматичного регулювання підсилення. Після підсилення прийнятого сигналу КА ДЗЗ в IQ-демодуляторі (IQ) здійснюється виділення квадратурних складових інформаційного сигналу: синфазної I (0°) та квадратурної Q (90°). Кожен із каналів обробки квадратурних складових мають ідентичну структуру та забезпечують з високою точністю фільтрацію і підсилення сигналів з мінімальними розбіжностями між каналами (рис. 5).

Типова око-діаграма сигналу КА ДЗЗ на вході квадратурного демодулятора наведена на рис. 5.

Квадратурні складові поступають на активні фільтри (ФНЧ) із змінним коефіцієнтом підсилення, який регулюється програмно. Далі IQ-сигнали поступають на високошвидкісні аналого-цифрові

перетворювачі, де I та Q складові перетворюється в цифровий вихідний сигнал з високою частотою дискретизації. Подальша цифрова обробка прийнятої інформації здійснюється в мікросхемі універсальної ПЛІС Altera CYCLONE III, де відбувається інкапсуляція інформації: внутрішнє декодування (перфорований згортковий код), зворотне зовнішнє перемішування та декодування за жорстким алгоритмом Вітербі (ДВ), який вважається ефективним у каналах з AWGN та зовнішнє декодування за алгоритмом Ріда-Соломона (ДРВ). Декодер Вітербі дозволяє виправляти одиночні помилки в q -х символах. В окремих ситуаціях, при виникненні пакетних помилок деякі пакети q -х символів можуть бути неправильно декодовані. Для виправлення цих помилок в схемі використовується зовнішній декодер Ріда – Соломона спільно із зворотнім перемішувачем. Таким чином, досягається необхідна надійність прийому інформації КА ДЗЗ [3].

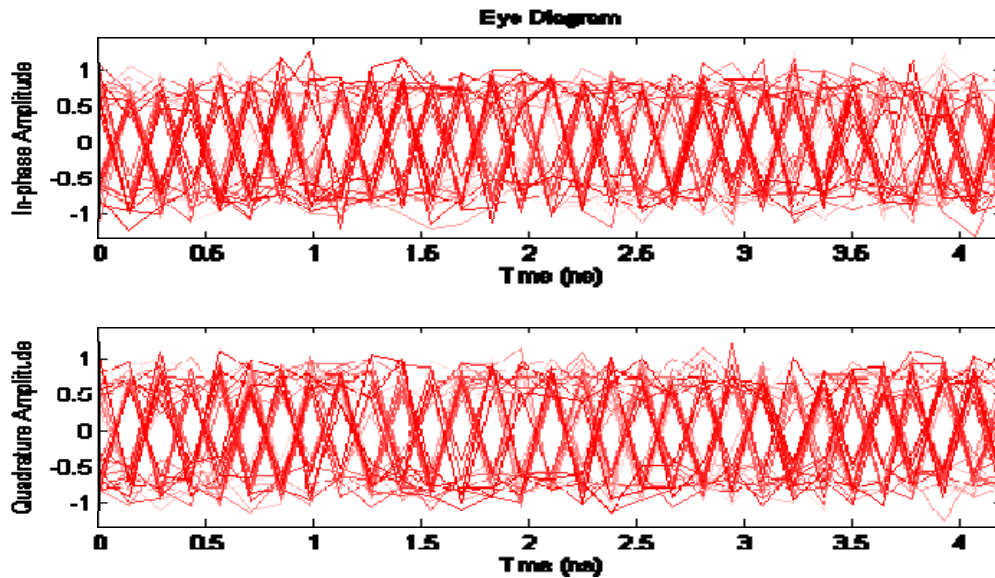


Рис. 5. Типова око-діаграма сигналу КА ДЗЗ на вході квадратурного демодулятора

Основними елементами ФАПЧ є пристрій визначення фазової похибки (ПВФП), фільтр (Φ) та цифровий синтезатор частоти прямого синтезу (ЦСЧПС) з помножувачем частоти (Π). Для підвищення ефективності роботи ФАПЧ як в режимі захоплення, так і в режимі слідкування використаний опорний тактовий генератор на базі багаточастотного кварцового генератора (БКГ) з ідентифікатором стану кварцового генератора (ІСКГ). В даному генераторі реалізований багаточастотно-алгоритмічний метод забезпечення технічної інваріантності п'єзрезонансних пристроїв, що дозволяє суттєво підвищити (до одного – двох порядків) стабільність генерування опорної частоти f_{REF} [6-9].

Розглянемо особливості компенсації температурної нестабільності кварцового генератора в режимі двочастотного збудження кварцового резонатора. В даному випадку на виході БКГ формуються коливання опорної моди кварцового резонатора (КР) f_{REF} та термочутливої (допоміжної) моди коливань f_T . Залежності власних резонансних частот КР для малих відхилень $\Delta T = T - T_0$ від номінальної температури T_0 представляється як

$$f_{REF}(T) = f_{REF}^0 + a_{1T}\Delta T; \quad f_T = f_T^0 + a_{2T}\Delta T, \quad (1)$$

де f_{REF}^0, f_T^0 – номінальні значення частот на виході БКГ за температури $T = T_0$, які входять до вектора параметрів спостереження \mathbf{Y} ; a_{1T}, a_{2T} – коефіцієнти термочутливості. Пристроєм формування коду частоти (ПФКЧ) формується коливання різницевої частоти

$$F(T) = F_0 + \Delta F(T) = \left[f_{REF}^0 - \frac{k_1}{k_2} f_T^0 \right] + \left[a_{1T} - \frac{k_1}{k_2} a_{2T} \right] \Delta T, \quad (2)$$

де $\frac{k_1}{k_2}$ – коефіцієнт дробово-раціонального перетворення частоти f_T , який вибирається із умови

$f_{REF}^0 \approx \frac{k_1}{k_2} f_T^0$. Коливання різницевої частоти F використовується для ідентифікації теплового стану

двочастотного КР та компенсації його температурної нестабільності. На основі (2) ПФКЧ визначається значення коректуючого коду $N(T)$, який забезпечує компенсацію уходів частоти f_{OUT} на виході ЦСЧПС із-за температурних уходів частоти опорного коливання $f_{REF}(T)$:

$$N(T) = N_0(f_{OUT}, f_{REF}^0) + \Delta N(\Delta F(T)), \quad (3)$$

де $N_0(f_{OUT}, f_{REF}^0) = \frac{f_{OUT} \cdot 2^m}{f_{REF}^0}$ – номінальне значення коректуючого коду для температури $T = T_0$;

m – розрядність керуючого слова $N(T)$.

Після фільтрації дані з I та Q бітових синхронізаторів надходять на декодер Вітербі, далі сформований бітовий потік декодується декодером Ріда-Соломона (проходить корекцію бітових помилок). Звіт про помилки, сформований декодером Вітербі (BER), аналізується пристроєм пошуку синхромаркера (ППС), після чого видається поправка для підлаштування синтезатора частоти ЦСЧПС (здійснюється АПЧ). Після корекції помилок бітовий потік поступає на USB контролер і далі на ПЕОМ, де здійснюється подальша обробка інформації. Послідовний USB інтерфейс також дозволяє здійснювати завантаження програмного забезпечення ПЛІС та моніторинг стану демодулятора.

Результат використання завадостійких каскадних кодових конструкцій при декодуванні сигналу, отриманий шляхом моделювання в середовищі MATLAB/SIMULINK представлений на рис. 6,7. Як видно з рис. 6,7 каскадні кодові конструкції достатньо ефективні під час прийому інформації в системах ДЗЗ. Так як роздільна здатність систем ДЗЗ обмежена, кожний «вибитий» піксель містить важливу інформацію про Земну поверхню та перешкоджає отриманню дійсної інформації про об'єкти які знаходяться на поверхні Землі. Відповідно до даних представлених у [10], при заданому значенні ймовірності похибки BER=10⁻⁶ (англ. Bit Error Rate – BER), на мільйон переданих символів лише один з них може бути невірним.

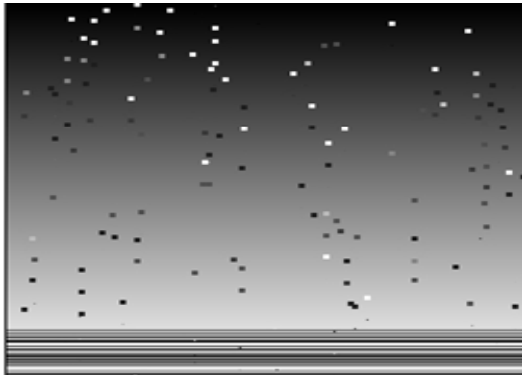
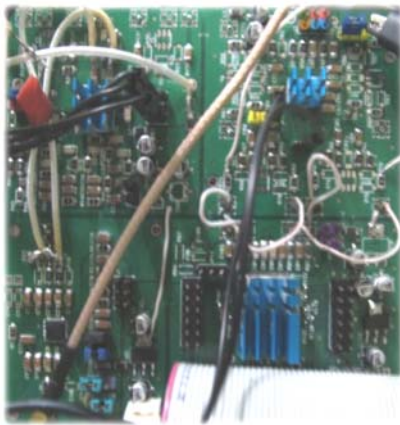


Рис. 6. Результат декодування інформації декодером Вітербі

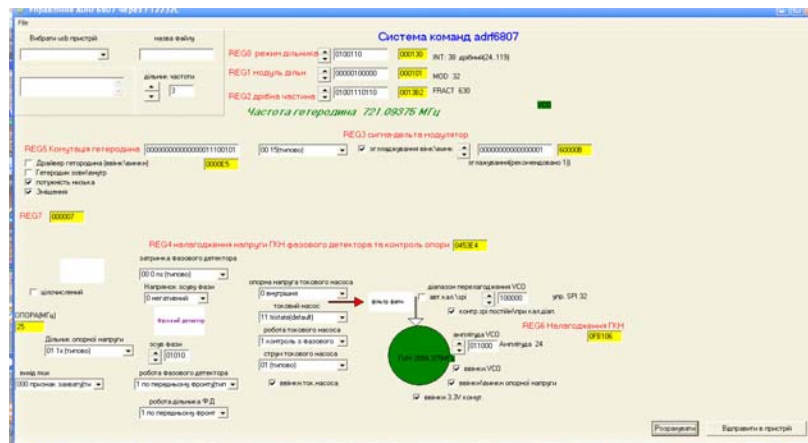


Рис. 7. Результат декодування інформації каскадними кодовими конструкціями

На рис. 8 наведені конструктивне виконання розробленого квадратурного демодулятора (рис. 8,а) та програмний інтерфейс управління його складовими (рис. 8,б).



а)



б)

Рис. 8. Конструктивне виконання та інтерфейсу управління демодулятором (б)

Розроблений демодулятор працює у діапазоні 720 МГц, забезпечуючи роботу із сигналами QPSK - модуляції та має широкий динамічний діапазон вхідних високочастотних коливань. Його особливістю є використання в колі ФАПЧ високостабільного цифрового синтезатора частоти прямого синтезу з термо- і вібраційною компенсацією нестабільності вихідної частоти, за рахунок чого забезпечується висока точність демодуляції сигналів КА.

Використання сучасних алгоритмів цифрової обробки квадратурних сигналів та використання для їх реалізації програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) дозволяє значно підвищити ефективність роботи станцій ДЗЗ та зробити їх універсальними, за рахунок можливості швидкої зміни їх параметрів у

відповідності до різноманітних параметрів радіоліній перспективних космічних апаратів. Завдяки можливості програмного налаштування мікросхеми ПЛІС демодулятора, забезпечується швидкість приймання даних КА ДЗЗ в межах від 10 до 500 Мбіт/с.

Висновки

Запропонований в роботі демодулятор забезпечує високу точність демодуляції сигналів із квадратурною модуляцією, за рахунок використання в колі ФАПЧ високостабільного цифрового синтезатора частоти прямого синтезу з термо- і вібраційною компенсацією нестабільності вихідної частоти. Розроблений універсальний демодулятор зібраний на сучасній елементній базі і забезпечує якісний прийом інформації існуючих КА ДЗЗ. Завдяки можливості програмного налаштування мікросхеми ПЛІС, що входить у структуру розробленого демодулятора, забезпечується швидкість приймання даних КА ДЗЗ в межах від 10 до 500 Мбіт/с. Використання завадостійкого каскадного кодування при демодуляції цифрових сигналів КА ДЗЗ, дозволило скоротити час захвату супутникового сигналу в два рази та зменшити похибки демодуляції на 20%.

Використання запропонованого універсального квадратурного демодулятора підвищеної точності і завадостійкості цифрових сигналів в існуючих наземних станціях супутникової інформації ДЗЗ, які знаходяться на території України, надасть змогу розширити їх функціональні можливості і забезпечити прийом інформації сучасних і перспективних космічних апаратів.

Література

1. Тимофеев Ю. М. Глобальная система мониторинга параметров атмосферы и поверхности : [уч.-метод. пособие] / Ю. М. Тимофеев. – СПб. – 2009. – 129 с.
2. Центр прийому і обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://dzz.gov.ua/CPOSI/> – назва з екрану.
3. Patent 4651107 Unites States, IPK H03D 3/00. Demodulator for digital FM signals / Yoshihiko Akaiwa. Assignee: NEC Corporation, Japan – № 687575 ; Filed Dec. 28, 1984 ; Date of Patent Mar. 17, 1987. – 14 p.: fig.
4. Патент 2216874 С2 Российской Федерация, МПК⁷ Н 04 L 27/34. Квадратурный модулятор и демодулятор / Кауфман Р., Апарин В.; заявитель и патентообладатель Квэлкомм Инкорпорейтед (US). – № 2000120619/09 ; заявл. 06.01.1999 ; опубл. 20.11.2003. – 27 с.: ил.
5. Patent 6795485 B2 Unites States, IPK H04B 1/69. Integrated QPSK/FSK demodulator / Michael Perkins. Assignee: Share Wave, Inc. (US) – № 09/729814 ; Filed Dec. 4, 2000 ; Date of Patent Sep. 21, 2004. – 7 p.: fig.
6. Підченко С. К. Теорія і реалізаційні основи інваріантних багаточастотних п'єзореzonансних пристроїв та систем / С. К. Підченко. – Хмельницький, ХНУ, 2014. – 400 с.
7. Патент на корисну модель № 86668. Україна, МПК H03L9/00. Пристрій генерування / Підченко С. К., Таранчук А. А., Стецюк В.І. // № u201307653; Заявник і власник ХНУ. Заявл. 17.06.2013; Опубл. 10.01.2014, бюл. № 1.
8. Підченко С.К. Віброкомпенсація нестабільності частоти кварцових генераторів в режимі багаточастотного збудження п'єзореzonатора / С.К Підченко, А.А Таранчук, В.І. Стецюк, Р.П. Хоптинський // Вісник НТУУ «КПІ». Серія - Радіотехніка. Радіоапаратобудування, 2014. -№ 57. С- 104-112.
9. Таранчук А.А. Квадратурний демодулятор OFDM систем з цифровою компенсацією температурної нестабільності генератора опорних сигналів / А.А Таранчук, С.К Підченко, Р.П Хоптинський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. ВОТТП, 2014. - № 2 -С. 80-85.
10. CCSDS 130.1-G-1. TM Synchronization and Channel Coding. – Washington, DC, USA, June 2006. – 89 p.

References

1. Timofeev Yu. M. Globalnaya sistema monitoringa parametrov atmosfery i poverhnosti : [uch.-metod. posobie] / Yu. M. Timofeev. – SPb. – 2009. – 129 s.
2. Tsentri priyomu i obrobki spetsialnoyi informatsiyi ta kontrolyu navigatsynogo polya. [Elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: <http://dzz.gov.ua/CPOSI/> – nazva z ekranu.
3. Patent 4651107 Unites States, IPK H03D 3/00. Demodulator for digital FM signals / Yoshihiko Akaiwa. Assignee: NEC Corporation, Japan – № 687575 ; Filed Dec. 28, 1984 ; Date of Patent Mar. 17, 1987. – 14 p.: fig.
4. Patent 2216874 S2 Rossiyskaya Federatsiya, MPK⁷ H 04 L 27/34. Kvadraturnyy modulyator i demodulyator / Kaufman R., Aparin V.; zayavitel i patentoobladatel Kvelkomm Inkorporeyted (US). – № 2000120619/09 ; zayavl. 06.01.1999 ; opubl. 20.11.2003. – 27 s.: il.
5. Patent 6795485 B2 Unites States, IPK H04B 1/69. Integrated QPSK/FSK demodulator / Michael Perkins. Assignee: Share Wave, Inc. (US) – № 09/729814 ; Filed Dec. 4, 2000 ; Date of Patent Sep. 21, 2004. – 7 p.: fig.
6. Pidchenko S. K. Teoriya i realizatsyni osnovi Invarlantnih bagatochastotnih p'Ezorezonansnih pristroyiv ta sistem / S. K. Pidchenko. – Hmelniyskiy, HNU, 2014. – 400 s.
7. Patent na korisnu model № 86668. UkraYina, MPK N03L9/00. Pristrly generuvannya / Pidchenko S. K., Taranchuk A. A., Stetsyuk V.I. // № u201307653; Zayavnik i vlasnik HNU. Zayavl. 17.06.2013; Opubl. 10.01.2014, byul. № 1.
8. Pidchenko S.K. VibrokompensatsIya nestabllnostI chastoti kvartsovih generatorlv v rezhimI bagatochastotnogo zbudzhennya p'Ezorezonatora / С.К Pidchenko, А.А Taranchuk, V.I. Stetsyuk, R.P. Hoptinskiy // Vlsnik NTUU «KPI». SerIya - Radlotehnika. Radioaparotobuduvannya, 2014. - № 57. S- 104-112.

9. Taranchuk A.A. Kvadraturniy demodulyator OFDM sistem z tsifrovoyu kompensatsiEyu temperaturnoYi nestabilnostI generatora opornih signallv / A.A Taranchuk, S.K Pidchenko, R.P Hoptinskiy // Vimlryuvalna ta obchislyuvalna tehnika v tehnologIchnih protsesah. VOTTP, 2014. - № 2 -S. 80-85.

10. CCSDS 130.1-G-1. TM Synchronization and Channel Coding. – Washington, DC, USA, June 2006. – 89 p.

Рецензія/Peer review : 3.3.2015 р. Надрукована/Printed :10.4.2015 р.
Рецензент: д.т.н. Параска Г.Б.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису
<http://vestnik.ho.com.ua/rules/>

Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 9 від 29.03.2015 р.

Підп. до друку 17.04.2015 р. Ум.друк.арк. 18,26 Обл.-вид.арк. 22,65
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63