

В. В. ЧМІЛЬ

Україна, м. Київ, Науково-виробниче підприємство «Сатурн»

E-mail: chmil_vladislav@ukr.net

КОНТРОЛЬ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ НВЧ-КАНАЛІВ ПРИЙМАННЯ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА НЕПРЯМИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Обґрунтовано доцільність і можливість оцінки працездатності НВЧ-каналів систем прийняття телеметричної інформації за непрямими параметрами. Описано принципи побудови системи контролю параметрів інформаційного каналу НВЧ-приймача за непрямими параметрами на прикладі її практичної реалізації на радіоастрономічній приймальній системі НВЧ-діапазону пункту приймання телеметричної інформації радіотелескопа РТ-32 С, Х, К Центру космічних досліджень та зв'язку ДКАУ.

Ключові слова: НВЧ-канал, контроль параметрів, непрямі параметри, телеметрія.

Головною задачею при прийманні телеметричної інформації від космічних об'єктів є забезпечення надійності роботи систем, в тому числі систем управління, навіть при виникненні часткової відмови їхніх окремих складових. У зв'язку з цим, важливим є контроль технічного стану систем пункту прийняття інформації, таких як радіоастрономічна приймальна система (РПС), системи частотно-часового забезпечення, зв'язку, накопичення та передачі даних, управління антенним комплексом, енергозабезпечення, підсистеми криогенного охолодження, забезпечення вакуумної складової. Наведені в [1] фундаментальні принципи та вимоги до надійності їх функціонування є актуальними й зараз.

Переважна останнім часом тенденція інтеграції функцій розробленої радіоелектронної апаратури з одночасним зменшенням масогабаритних характеристик призводить до її ускладнення та збільшення числа елементів в одиниці об'єму, внаслідок чого стає все важче виявляти несправності окремих компонентів радіоелектронної апаратури без переривання режиму її функціонування. Особливо актуальною така проблема є для апаратури НВЧ-діапазону в гібридно-інтегральному та монолітному виконанні. Таке виконання істотно підвищує їхню довговічність, але водночас ускладнює контроль працездатності цих виробів.

Неможливість визначення в процесі функціонування стану елементів складного електронного багатофункціонального НВЧ-пристрою, наприклад приймальної системи радіоастрономічного телескопа, знижує коефіцієнт готовності, а це ускладнює виконання поставленого завдання в процесі його експлуатації. Крім того, важливим фактором

тут є й витрати на обслуговування радіоелектронної апаратури.

Радіоастрономічні приймальні системи НВЧ-діапазону, як правило, розташовуються безпосередньо поблизу дзеркала антени, тобто знаходяться поза полем дії операторів. Основні їхні особливості повною мірою розглянуті та проаналізовані в [2]. Необхідно зазначити, що традиційні способи контролю НВЧ-параметрів таких систем, запропоновані в [1], потребують застосування громіздкої вимірювальної апаратури, а головне — не забезпечують надійну роботу у складних кліматичних умовах, що в більшості випадків є неприйнятним.

Розв'язати зазначену проблему можна за допомогою методів контролю за непрямими параметрами. З відкритих інформаційних джерел відомі деякі методи контролю працездатності апаратури складних систем, наприклад [3], але їх складно адаптувати до використання для систем НВЧ-діапазону. Крім того, відсутні математичні моделі контролю на базі непрямой інформації щодо працездатності та критерії оцінки ефективності систем вбудованого контролю й управління параметрами РПС, що дозволяють проводити комплексну оптимізацію структурних схем з метою підвищення часу напрацювання на відмову в процесі експлуатації.

В цій роботі пропонується ефективна методика контролю працездатності складної системи НВЧ-діапазону за непрямими параметрами, особливості якої розглядатимуться на прикладі радіоастрономічної приймальної системи НВЧ-діапазону пункту приймання телеметричної інформації радіотелескопа РТ-32 С, Х, К [4] Центру космічних досліджень та зв'язку ДКАУ в м. Золочів Львівської області.

Принципи побудови системи контролю РПС радіотелескопа та формування переліку непрямих параметрів

Типову структурну схему РПС пункту приймання телеметричної інформації з багатоканальною радіоастрономічною приймальною системою наведено на **рис. 1**. У більшості випадків у таких приймальних НВЧ-пристроях особливо важливими параметрами, що регламентуються, є вхідна чутливість (температура шуму $T_{ш}$) і коефіцієнт посилення $G_{п}$ [1]. Істотне значення має також нерівномірність ΔG коефіцієнта посилення. Допустимим є відхилення температури шуму до 30%, час відновлення у разі виходу блоків з ладу — 3 години.

До числа функціональних блоків РПС, що потребують обов'язкового контролю параметрів для забезпечення працездатності, слід віднести такі:

- криоелектронний приймальний блок (КПБ);

- блоки перетворення частоти С-, Х- і К-діапазонів (БПЧ-С, Х-, К);
- блоки гетеродинів (БГ);
- блок комутації (БК).

Інформаційний сигнал в такій системі проходить ланцюгами блоків: КПБ С, К — БПЧ-С, -К — БК; ТМШП-Х — БПЧ-Х — БК (ТМШП — термоохолоджувальний малошумлячий підсилювач).

Актуальним завданням є оснащення РПС автоматичною системою контролю працездатності [5, 6], структурна схема якої приведена на **рис. 2**. Слід зазначити, що до кожного блоку, що входить до ланцюжка інформаційного каналу цієї схеми, оснащено платою контролю й управління, яка забезпечує вимірювання застabilізованих непрямих параметрів і передачу результатів на верхній рівень управління для ухвалення рішень. При цьому під непрямыми параметрами слід розуміти такі, від яких залежать основні параметри системи, що забезпечують темпера-

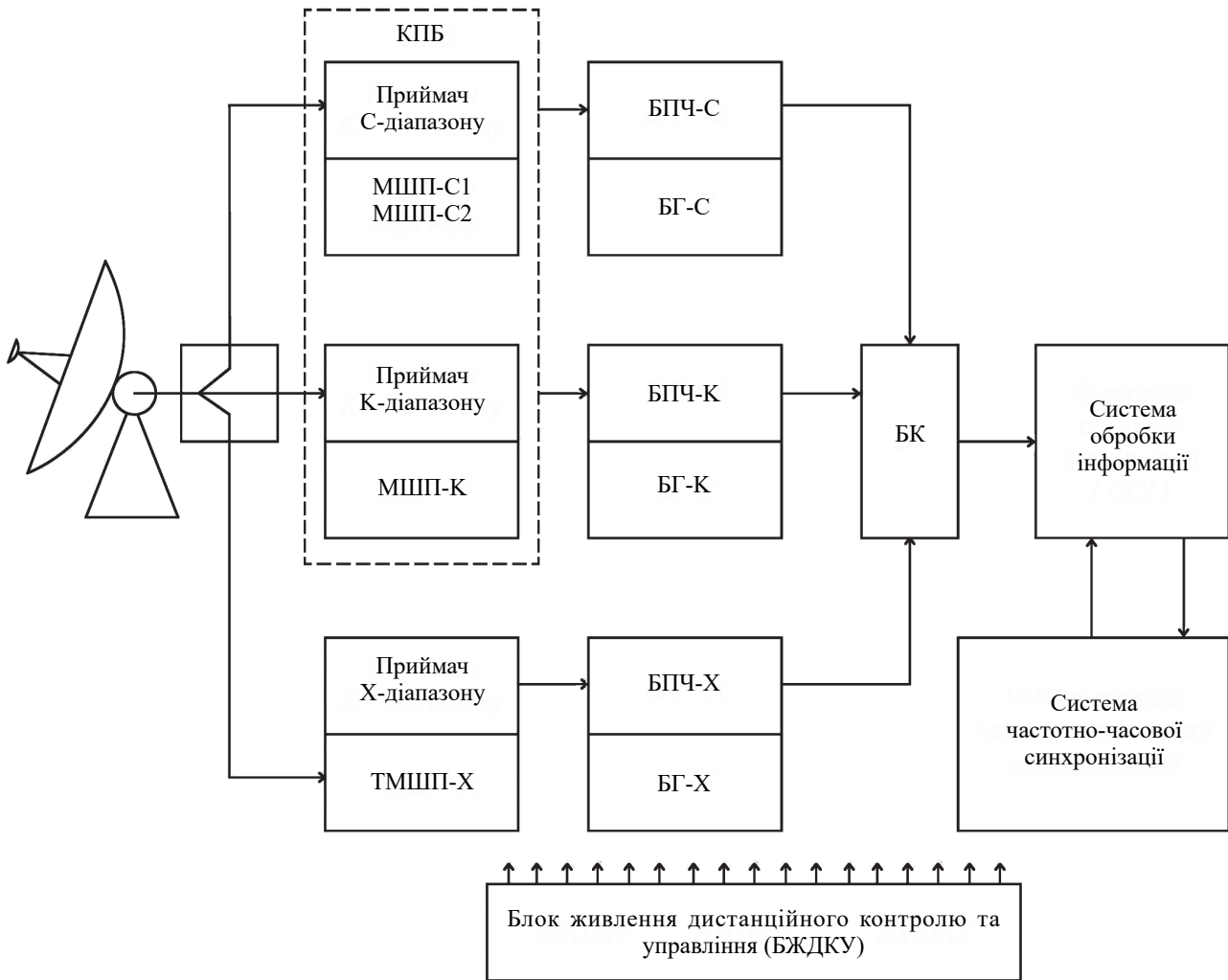


Рис. 1. Типова структурна схема РПС пункту приймання телеметричної інформації

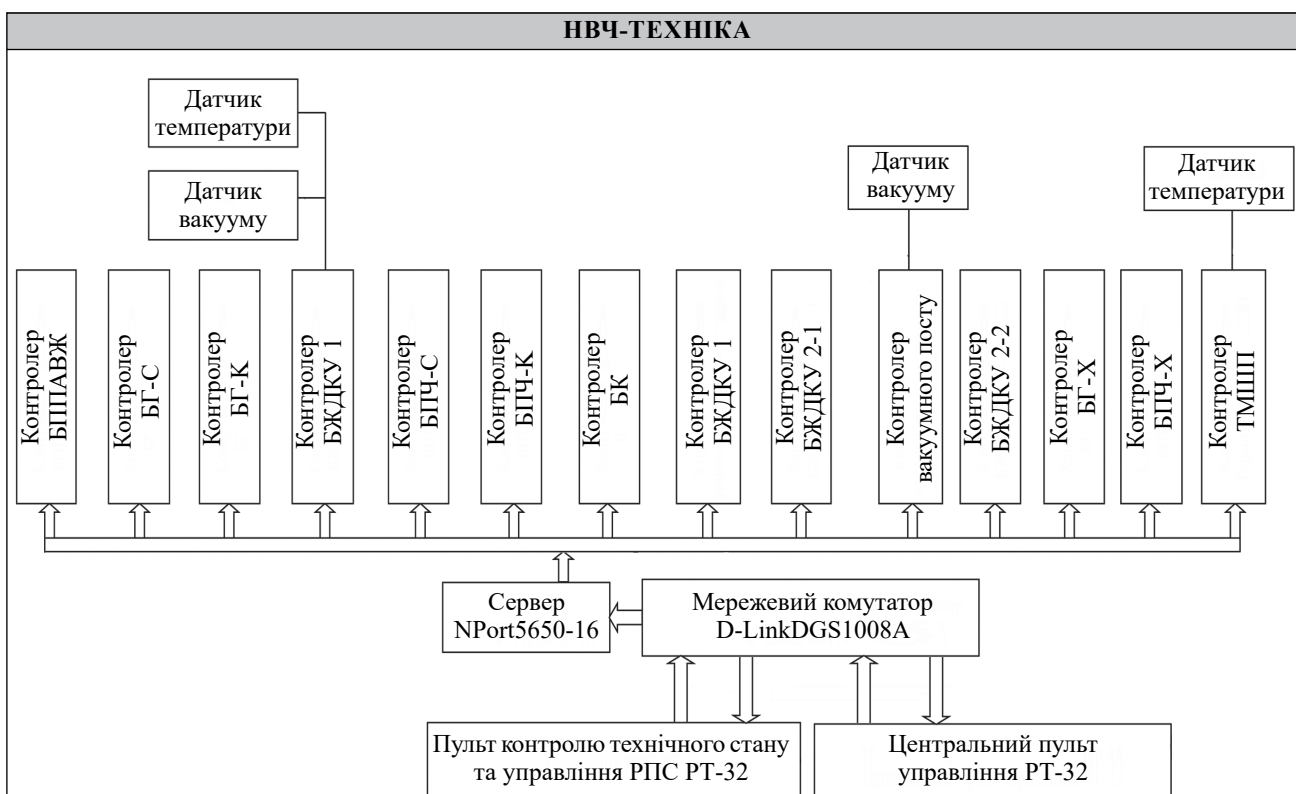


Рис. 2. Структурна схема розподіленої (інформаційної) системи контролю працездатності

турний режим, напругу живлення елементів мікросхем, частотний діапазон тощо.

Практична реалізація контролю працездатності трьохканальної РПС радіотелескопа

В таблиці для прикладу наведено деякі з 60 непрямих параметрів, які суттєво впливають на роботу каналів прийняття телеметричної інформації.

Відповідальність за наявність поточної інформації про стан непрямих параметрів, використовуваних для оцінювання працездатності приймальної системи, практично несе контролер. При цьому для ста-

білізації цих параметрів застосовується стабілізація збурювальних чинників (фізичної температури вузлів, рівня напруги живлення). На рис. 3 показано загальний вигляд контролера блоку перетворення частоти К-діапазону (БПЧ-К).

Плата контролера БПЧ-К призначається для дистанційного управління та контролю основних вузлів БПЧ-К. При цьому основні функції системи діагностики, контролю та управління є такими:

- вимірювання температури термостата БПЧ-К;
- вимірювання температури корпусу БПЧ-К;

Непрямий параметр	Номінальне значення	Залежний основний параметр
КПБ		
Температура криостату	15 К	$T_{ш}, G, \Delta G$
Тиск в криостаті	$1 \cdot 10^{-3}$ Па	Напруга живлення вакуумметра
БЖДКУ		
Напруга живлення МШП-С1	4 В	$T_{ш}, G$ каналу лівої поляризації С-діапазону
Напруга живлення МШП-С2	4 В	$T_{ш}, G$ каналу правої поляризації С-діапазону

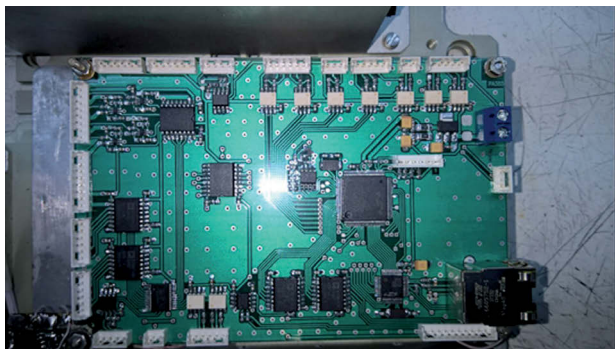


Рис. 3. Загальний вигляд контролера БПЧ-К

- вимірювання струму споживання термобатарей;
- контроль напруги вторинних джерел живлення;
- контроль вихідної потужності та інших основних параметрів синтезаторів і гетеродина;
- управління частотою синтезаторів;
- регулювання коефіцієнта передачі кожного каналу БПЧ-К;
- приймання команд управління та передача інформації про стан параметрів БПЧ-К у відповідь на запит від сервера центрального пульта управління по інтерфейсу ETHERNET або RS-485.

Контролер управління БПЧ-К складається з таких функціональних вузлів:

- мікроконтролер C8051F120;
- контролер ETHERNET CP2201;
- гальванічні розв'язки для контролю параметрів;
- драйвер шини SPI для управління атенюаторами;
- драйвер шини I²C/SMBus для управління перестроюваною частотою синтезаторів;
- зовнішня пам'ять з електричним записом та стиранням інформації (EEPROM);
- стабілізатор напруги;
- інтерфейс послідовного каналу зв'язку RS-485.

Мікроконтролер C8051F120 виконує всі функції управління та контролю згідно з програмою, записаною в його резидентній пам'яті. Високопродуктивне процесорне ядро мікроконтролера має конвеєрну архітектуру. FLASH-пам'ять мікроконтролера складає 128 Кбайт, оперативна — 8448 байт.

Мікроконтролер має апаратно реалізовані послідовні інтерфейси I²C/SMBus, SPI та два універсальні асинхронні приймачі-передавачі, що дозволяє підключати широкий набір периферійних приладів.

До складу мікроконтролера входить вісім 8-бітових портів вводу/виводу, які дозволяють організувати роботу по паралельній шині з зовнішньою пам'яттю та іншими мікроконтролерами.

Для організації обміну між мікроконтролером C8051F120 та шиною ETHERNET використано однокристалний ETHERNET-контролер CP2201 (DD1) фірми Silabs.

ETHERNET- контролер CP2201 має наступні властивості:

- інтеграція IEEE 802.3 MAC та 10 BASE-T PHY;
- повністю сумісний з мережами 100/1000 BASE-T;
- повний дуплекс або полудуплекс з автовизначенням;
- автоматичне визначення полярності та виправлення помилок;
- повторна передача в разі колізій;
- генерація CRC-коду;
- підтримка ширококомовної MAC-адресації.

Послідовний канал приймання команд управління і даних від персонального комп'ютера має інтерфейс RS-485 на мікросхемі ADM483AR, вихід якого підключено на вхід RXD-мікроконтролера.

Інформацію про виконання команд та про стан параметрів приймального комплексу мікроконтролер видає через послідовний порт TXD і вихідний буфер інтерфейсу RS-485 до каналу передачі зі швидкістю 115200 біт/с.

Зовнішня пам'ять (EEPROM) на мікросхемі AT24C16C-SSHM-D використовується для зберігання табличних даних, а також різних змінних, які використовуються під час роботи програми управління та контролю контролера управління БПЧ-К. Обмін даними між зовнішньою пам'яттю і мікроконтролером виконується з використанням шини I²C/SMBus. За допомогою шини I²C/SMBus зчитуються цифрові значення температури термобатарей та корпусу блока БПЧ-К, а також струму термобатарей. Для виміру температури використовуються мікросхеми FDT7420, струму термобатарей — мікросхема SI8901.

Приклад оцінки залежності основних параметрів РПС радіотелескопа від непрямих параметрів

Розглянемо у загальному вигляді залежності основних параметрів від непрямих на прикладі нерівномірності коефіцієнта підсилення $\Delta G = G_p - G_{ном}$ (G_p , $G_{ном}$ — реальне та номінальне значення параметра відповідно).

Представимо ΔG у вигляді

$$\Delta G = f(Z_1; Z_2; \dots; Z_i; \dots; Z_n), \quad (1)$$

де Z_i — відмінність i -го параметра ($i = 1, \dots, n$) еквівалентної електричної схеми малошумлячих підсилювачів від ідеального значення у робочому діапазоні частот.

Отримати інформацію про G безперервно в усьому діапазоні надзвичайно важко практично. Про функцію (1) можна говорити лише як про набір з m дискретних точок $\{\Delta G\} = \{\Delta G_1; \Delta G_2; \dots; \Delta G_j; \dots; \Delta G_m\}$, які відповідають частотам з певного набору $\omega_n \leq \omega_1; \omega_2 \dots; \omega_j \dots; \omega_m \leq \omega_n$ (ω_n та ω_n — нижня та верхня граничні частоти діапазону).

У цьому разі вираз (1) буде мати вигляд

$$\Delta G_j = f_j(Z_1; Z_2; \dots; Z_i \dots Z_n), \quad (2)$$

де $j = 1, 2, \dots, m$.

Вираз (2) являє собою систему номінальних рівнянь, які можна лінеаризувати в деякій точці $Z_0 = \{Z_{01}; Z_{02}; \dots Z_{0n}\}$, що характеризує набір ідеальних значень параметрів схеми в усьому діапазоні робочих частот. Тоді стан основних параметрів можна представити у вигляді системи рівнянь типу:

$$\begin{aligned} \Delta G_1 &= \Delta G_1(z_0) + a_{11} d_1 + a_{12} d_2 + \dots + a_{1i} d_i + \dots + a_{1n} d_n; \\ \Delta G_2 &= \Delta G_2(z_0) + a_{21} d_1 + a_{22} d_2 + \dots + a_{2i} d_i + \dots + a_{2n} d_n; \\ &\dots \\ \Delta G_j &= \Delta G_j(z_0) + a_{j1} d_1 + a_{j2} d_2 + \dots + a_{ji} d_i + \dots + a_{jn} d_n; \\ &\dots \\ \Delta G_m &= \Delta G_m(z_0) + a_{m1} d_1 + a_{m2} d_2 + \dots + a_{mi} d_i + \dots + a_{mn} d_n, \end{aligned} \quad (3)$$

де d_i — різниця між реальним та ідеальним значеннями i -го параметра, $d_i = z_i - z_0$;

$\Delta G_j(z_0)$ — значення функції ΔG_j в точці z_0 ;

a_{ji} — коефіцієнти, що враховують міру впливу непрямого параметра на основний параметр НВЧ-підсилювача (в загальному вигляді є похідною від функцій, що характеризують залежність основного параметра від непрямого).

Аналіз результатів вимірювань показує, що функції, які характеризують залежність основних параметрів від непрямих, у більшості випадків є лінійними або легко можуть апроксимуватися чисельно, що дозволяє зробити машинний аналіз достовірності такого виду контролю, застосувавши метод імітаційного моделювання [7, 8].

Висновки

Запропонована методика контролю та оцінювання стану працездатності складної радіоелектронної системи та основних її характеристик безпосередньо у робочому режимі за допомогою непрямих параме-

трів пройшла експериментальну апробацію та використовується на новому радіотелескопі РТ-32, створеному замість втрачених Україною внаслідок анексії Криму РТ-22 (у Сімеїзі) та РТ-70 (у Євпаторії). Це дозволяє рекомендувати таку методику для використання на складних радіоелектронних системах та системах іншого призначення.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. *Телескопы и радиометры*. Москва, Наука, 1973, 476 с.
2. Глушеченко Э. Н., Пилипенко А. М., Слонин Э. В. и др. Особенности конструктивно-технологических решений приемной системы малых радиотелескопов. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2016, №2–3, с. 21–25. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2016.2-3.21>
3. Пустоваров В. В., Коломийцев О. В., Сачук І. І. та ін. *Мобільна суміщена інформаційно-вимірювальна система. Патент України на корисну модель № 102676*, 2015, бюл. № 21.
4. Антюфеев А. В., Королев А. М., Патока А. Н. и др. Создание радиотелескопа РТ-32 на базе антенной системы MARK-4В. 2. Оценка возможности проведения спектральных наблюдений радиоастрономических объектов. *Радиофизика и радиоастрономия*, 2019, т. 24, № 3, с. 163–183. <https://doi.org/10.15407/rpra24.03.163>
5. Патов О. Б., Скрасанов В. Н., Иванов Д. В. та ін. Криогенний приймальний фокальний блок для телескопів радіоінтерферометричного комплексу нового покоління. *Радиофизика і радиоастрономия*, 2014, т. 19, № 1.
6. Пилипенко О. М., Сундучков І. К., Чміль В. В. та ін. Радиометрический приемный комплекс и пути снижения вносимой им погрешности в радиометрические измерения. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, 2015, №5–6, с. 14–21. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2015.5-6.14>
7. Данилевич С. Б., Колесніков С. С., Пальчук Ю. А. Застосування імітаційного моделювання при атестації методик контролю і випробувань. *Вимірювальна техніка*, 2011, №7, с. 70–73.
8. Сундучков І. К., Чміль В. В. Оптимізація структури побудови перетворювального каналу Ка-діапазону з метою мінімізації флуктуаційної похибки НВЧ-каналу радіоприймальної системи малих радіотелескопів. *Тези доповідей 15-ї Української конференції з космічних досліджень*, Україна, м. Одеса, 2015, с. 173.

Дата надходження рукопису до редакції 20.11 2021 р.

MONITORING THE EFFICIENCY OF MICROWAVE CHANNELS FOR RECEIVING TELEMETRY INFORMATION USING INDIRECT CRITERIA

The paper presents an analysis of existing methods of controlling the efficiency of multipart radio engineering systems and their individual components. The authors consider the situations when traditional methods do not allow controlling the efficiency of the system in operational mode. The study substantiates the practicability and possibility of estimating the efficiency of microwave channels for receiving telemetry information from artificial space objects according to indirect criteria.

The principle of forming a list of indirect control criteria is demonstrated on the example of the functional diagram of the radio receiver system of the RT-32 C, X, K radio telescope. The study formulates the principles of creating a system designed to control the parameters of the information channel of such a microwave radio receiver system by controlling indirect parameters which correspond to the chosen criteria and the list of the basic parameters. A list of indirect parameters affecting the performance of the entire system by controlling the characteristics of its main parameters has been created. The paper carefully considers the problems that arise when equipping the radio receiver system with built-in tools for controlling and managing the indirect parameters. A system of nominal equations is designed for estimating the state of the basic parameters of the components of the radio receiver system. Each of the indirect parameters is codified in digital form. An example of a block diagram of a distributed control and management system for complex radio devices is presented.

The authors determine acceptable deviations for the indirect parameters relative to the nominal values of the direct parameters for controlling the state of both individual devices and the whole multipart system. It is proposed to implement a control and management system of a complex system by using a specialized controller-based circuit board built into each functional device of the radio receiver system. One possible version of such board, its design and all functional units are considered in detail.

The proposed methods of controlling and managing the state of a multipart radio-technical system when receiving telemetric information directly in the working mode has been successfully approved during a series of radio astronomical studies on RT-32 C, X, K radio telescope at the Space Researches and Communications Center of the State Space Agency of Ukraine.

Keywords: microwave channel, parameter control, indirect parameters, telemetry.

REFERENCES

1. Yesepkina N. A., Korol'kov D. V., Pariyskiy Yu. N. *Teleskopy i Radiometry* [Telescopes and radiometers]. Moscow, Nauka, 1973, 476 p. (Rus)
2. Glushechenko E. M., Pylypenko O. M., Slonin E. V. et al. Features of structural and technological solutions for receiving system of small radio telescopes. *Tekhnologiya i Konstruirovani v Elektronnoi Apparature*, 2016, no. 2–3, pp. 21–25. (Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2016.2-3.21>
3. Pustovarov V. V., Kolomyitsev O. V., Sachuk I. I. et al. [Mobile combined information and measurement system]. *Patent of Ukraine №102676*, 2015, bull. 21. (Ukr)
4. Antyufeyev A. V., Korolev A. M., Patoka A. N. et al. [Creation of the RT-32 radio telescope based on the MARK-4B antenna system. 2. Evaluation of the possibility of conducting spectral observations of radio astronomical objects]. *Radiofizika i Radioastronomiya*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 163–183. (Rus) <https://doi.org/10.15407/rpra24.03.163>
5. Ipatov O. B., Skresanov V. N., Ivanov D. V. et al. [Cryogenic receiving focal unit for telescopes of the new generation radio interferometric complex]. *Radiofizyka i Radioastronomiya*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 81–96. (Ukr)
6. Pylypenko A. M., Sunduchkov I. K., Chmil V. V., Chmil V. M., Yatsyk P. O. [Radiometric receiving complex and ways to reduce the radiometric measurements error]. *Tekhnologiya i Konstruirovani v Elektronnoi Apparature*, 2015, no. 5–6, pp. 14–21. (Rus) <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2015.5-6.14>
7. Danylevych S. B., Kolyesnikov S. S., Pal'chuk YU. A. [Application of simulation modeling in certification of control and testing techniques]. *Vymiryuval'na Tekhnika*, 2011, no. 7, pp. 70–73. (Ukr)
8. Sunduchkov I. K., Chmil' V. V. [Optimization of the structure of the Ka-band conversion channel to minimize the functional error of the microwave channel of the radio reception system of small radio telescopes]. *Proceedings of the 15th Ukrainian Conference on Space Research*, Ukraine, Odesa, 2015, pp. 173 (Ukr)

Опис статті для цитування:

Чміль В. В. Контроль працездатності НВЧ-каналів приймання телеметричної інформації за непрямими критеріями. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2021, № 5–6, с. 20–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.20>

Cite the article as:

Chmil V. V. Monitoring the efficiency of microwave channels for receiving telemetry information using indirect criteria. *Tekhnologiya i Konstruirovani v Elektronnoi Apparature*, 2021, no. 5–6, pp. 20–25. <http://dx.doi.org/10.15222/TKEA2021.5-6.20>