

Зайченко В. В. Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова

## МОДЕЛЬ ТРОПОСФЕРНОГО КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ З ПОВТОРНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ІНФОРМАЦІЇ У ДВУХ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНАХ

*В статті розглянута система контролю та діагностики з імітатором багатопроменевого каналу зв'язку для мобільної цифрової тропосферно-радіорелейної станції. Знайдені системні функції багатопроменевих каналів зв'язку з повторною передачею інформації на декількох частотах за допомогою еліптичних інтегралів і еліптичних функцій. Показано, що системні функції можуть бути представлені через тета-функцію та повні еліптичні інтеграли першого роду.*

**Ключові слова:** тропосферний зв'язок, багатопроменевий канал, тропосферно-радіорелейна станція, інтерференція, еліптична функція, еліптичний інтеграл, тета-функція.

Zaichenko V. V. O. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications

## MODEL OF THE TROPOSPHERE CHANNEL OF COMMUNICATION WITH REPRODUCTION OF INFORMATION IN TWO FREQUENCY BANDS

*The article is discusses the monitoring and diagnostics system with the simulator of the multipath channel for the mobile digital troposcatter-radiorelay station. The specificity of such a digital combined telecommunication microwave system: manifestation of a single system control and diagnostics for both components of the station; congestion to the multipath-beam simulator of a fading channel with the storage at the warehouse control system and diagnostics; single frequency former for both components of the station. At the digital combined telecommunication microwave station there is space diversity reception. Parameter monitoring in possession and diagnostic of the control panel of a mobile digital telecommunication microwave system. In the article, the main functions of the control and diagnostics of such a digital combined telecommunication microwave system, the main task of awakening the multipath simulator with wired ones. In the article shows the modeling of the multipath channels is equipped with system functions. The mathematical apparatus of statistical analysis for the system functions must be accelerated by a large number of specific practical problems, the frequency-selective fading and interference. In the article there are system functions of multipath channels and channels that can be retransmitted with information on the several frequencies by elliptic functions and elliptic integrals. This science-based result is widespread on channels that can be retransmitted with information on the several frequencies. System functions have the logarithmic singular points. It is shown that the system functions can be represented through a theta-functions and elliptic integrals. Elliptic functions Jacobi can be twisted through a theta-function.*

**Keywords:** troposcatter communication, multipath channel, troposcatter-radiorelay station, interference, multipath-beam simulator, elliptic function, elliptic integral, theta-function.

Зайченко В. В. Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова

## МОДЕЛЬ ТРОПОСФЕРНОГО КАНАЛА СВЯЗИ С ПОВТОРНОЙ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ДВУХ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ

*В статье рассмотрена система контроля и диагностики с имитатором многолучевого канала связи для мобильной цифровой тропосферной-радиорелейной станции. Найденны системные функции многолучевых каналов связи с повторной передачей информации на нескольких частотах с помощью эллиптических интегралов и эллиптических функций. Показано, что системные функции могут быть представлены через тета-функцию и полные эллиптические интегралы первого рода.*

© Зайченко В. В. 2019

*Ключевые слова:* тропосферный связь, многолучевой канал, тропосферно-радиорелейная станция, интерференция, эллиптическая функция, эллиптический интеграл, тета-функция.

## Вступ

У статті набуло подальшого розвитку науково-технічне рішення щодо розробки системи контролю та діагностики (СКД) з імітатором багатопроменевого каналу зв'язку для мобільної цифрової тропосферно-радіорелейної станції (МЦТрРРС). Перспективність створення та використання в Україні МЦТрРРС обґрунтовано в роботах [1-3]. Про доцільність використання мобільних цифрових тропосферних та радіорелейних систем неодноразово відзначалось на щорічних міжнародних конференціях MILCOM [4-6]. При моделюванні багатопромених каналів зв'язку використовують апарат системних функцій [7]. Для реальних каналів зв'язку системні функції, як правило, нестационарні і для їх опису адекватним математичним апаратом є статистичний аналіз. Однак застосування цього математичного апарату ускладнює вирішення великого числа конкретних практичних завдань. Це ускладнення посилюється, коли доводиться боротися не тільки з частотно-селективними завмираннями, але і з зосередженими завадами сучасними способами, як наприклад, повторна передача однієї і тієї ж інформації на декількох частотах, що відповідають різним інтервалам частот.

**Метою статті** – є представлення системних функцій багатопромених каналів зв'язку з повторною передачею інформації на декількох частотах за допомогою еліптичних інтегралів і еліптичних функцій.

## Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз бібліографічних джерел про системи (пристрої) управління та контролю показав, що найбільш близькими за методом вирішення подібних завдань є дослідження, проведені в [5, 8, 9]. Огляд систем керування сучасних мобільних радіотехнічних систем різного призначення [10-12] показав, що в такій постановці сформульована науково-технічна задача з одночасним моделюванням процесів управління та контролю не розв'язувалась.

## Постановка завдання

Особливістю даного науково-технічного рішення є:

- наявність єдиної СКД для обох компонент станції;
- застосування імітатору багатопроменевого каналу з завмираннями у складі системи контролю та діагностики;
- єдине частотоформування для обох компонент станції.

При створенні комбінованої станції НВЧ діапазону враховувалася специфіка функціонування лінії загоризонтного зв'язку. В основі побудови ліній загоризонтного зв'язку лежать два механізми поширення радіохвиль [1]:

- на інтервалах 50-80 км – дифракційне поширення радіохвиль;
- на інтервалах більше 80 км – розсіювання радіохвиль на неоднорідностях тропосфери.

З огляду на науково-технічний потенціал України, що залишився, виробництво таких станцій може бути освоєно вітчизняною промисловістю при тому в декількох конструктивних варіантах (рис. 1) [6, 13].

Особливістю ліній загоризонтного зв'язку є те, що на них застосовується рознесений прийом сигналів. У даній станції застосовується просторово рознесений прийом. Станція також має систему адаптації по частоті і систему адаптації по потужності.

Система адаптації по частоті передбачає вибір оптимальної частоти. В основі такого способу є постійний аналіз частот на прийомі, що входять в робочу смугу і визначення найбільш оптимальної з них. Ця частота має максимальний коефіцієнт передачі тропосферного сигналу і передавач протягом короткого тимчасового інтервалу перебудовується на неї.



Рис.1. Мобільна цифрова тропосферно-радіорелейна станція у розгорнутому положенні (конструктивний варіант) [3]

Система адаптації по потужності передбачає автоматичне регулювання потужності (АРП) передавача. На приймальній стороні вимірюється відношення сигнал/(шум + завада) і достовірність інформації, що приймається. Ці дані обробляються і приймається рішення про зміну потужності передавача.

Для зниження (збільшення) співвідношення сигнал/шум і достовірності прийнятої інформації формується сигнал на збільшення (зменшення) потужності передавача кореспондента, яка приймається приймачем зворотного каналу і надходить на формувач сигналу управління для зміни потужності передавача.

Контроль параметрів обладнання та моніторинг траси поширення радіохвиль такою мобільною цифровою комбінованою радіотехнічною системи НВЧ діапазону здійснюється з єдиної системи контролю та діагностики (виносний та стаціонарний пульти управління).

Основні функції контролю та діагностики наступні:

- контроль за системою адаптивного регулювання потужності передавача з контролем вихідної потужності НВЧ в розкритті випромінювача;
- контроль за системою адаптації по частоті з моніторингом траси поширення радіохвиль;
- перевірка по «малому кільцю» станції (автономний контроль) з перемиканням роботи станції на еквівалент антени;
- перевірка по «великому кільцю» станції з використанням імітатору багатопроменевого каналу з завмираннями;
- сигналізація і контроль працездатності станції, індикація про загальний стан справності апаратури (сигнал «Аварія»);
- юстування антен, контроль їх положення по азимуту і по куту місця;
- контроль рівня випромінювання в антенах;

- контроль за управлінням опорно-поворотним пристроєм антен тропосферної частини станції;
- контроль вхідної потужності на вході приймача НВЧ і на вході демодулятора модему;
- контроль працездатності всіх частин станції;
- контроль втрати достовірності інформації, що передається;
- контроль рівня АРП приймального тракту;
- контроль встановлених швидкостей роботи станції;
- контроль роботи системи ТУ-ТС;
- контроль здійснення переходу на резервні хвилі у випадку необхідності;
- контроль за станом бортової електромережі;
- контроль за передачею службової інформації про встановлення зв'язку;
- контроль ведення службового зв'язку по двом службовим каналам (СК-1, СК-2).

Для виконання контролю працездатності системи необхідно щоб у складі СКД систем зв'язку НВЧ діапазону налічувався імітатор багатопробеневого каналу зв'язку з завмираннями. У цьому випадку можливий контроль працездатності по «великому кільцю», що особливо необхідно для комбінованих системи зв'язку НВЧ діапазону. Це також необхідно для інших комбінованих радіотехнічних систем, наприклад тих, що суміщують радіолокаційне та радіонавігаційне обладнання. Також слід відмітити, що у цьому випадку можлива діагностика середовища поширення радіохвиль, тому і можливо створення єдиної СКД для цифрових комбінованих радіотехнічних систем.

До основних завдань побудови імітатора багатопробеневого каналу з завмираннями відносяться: розробка математичного опису каналу, вибір розробка структурної схеми імітатора, що відповідає прийнятій моделі каналу, апаратно-програмна реалізація прийнятої структурної схеми. Критерієм ефективності прийнятих при цьому теоретичних і технічних рішень є забезпечення максимальної адекватності імітатора і каналу, що моделюється. Це пояснюється тим, що реальне скорочення термінів розробки і виробництва радіотехнічної системи за рахунок застосування імітатора можливе лише при високій достовірності результатів досліджень, отриманих з його допомогою.

При моделюванні багатопробневих каналів зв'язку досліджують апарат системних функцій [7]. Для реальних каналів зв'язку системні функції, як правило, не стаціонарні і для їх опису адекватним математичним апаратом є статистичний аналіз. Однак застосування цього математичного апарату ускладнює вирішення великого числа конкретних практичних завдань. Це ускладнення посилюється, коли доводиться боротися не тільки з частотно-селективними завмираннями, але і з зосередженими завадами сучасними способами, як наприклад, повторна передача однієї і тієї ж інформації на декількох частотах, що відповідають різним інтервалам частот. Тому необхідно представити системні функції багатопробневих каналів зв'язку з повторною передачею інформації на декількох частотах за допомогою еліптичних інтегралів і еліптичних функцій.

### Результати дослідження

Нехай повторна передача здійснюється в інтервалах частот  $[a_1, b_1], [a_2, b_2], \dots [a_n, b_n]$ . У комплексній площині  $\tilde{\omega}$  введемо раціональні функції  $R(\tilde{\omega})$  і  $P(\tilde{\omega})$ :

$$R(\tilde{\omega}) = \tilde{\omega}(\tilde{\omega} - a_1)(\tilde{\omega} - b_1)\dots(\tilde{\omega} - b_n),$$

$$P(\tilde{\omega}) = (\tilde{\omega} - a_1)(\tilde{\omega} - a_1)\dots(\tilde{\omega} - a_n).$$

Системні функції можна записати в комплексній площині у наступному вигляді:

$$Q_1(\xi, \tilde{\omega}) = \cos(\xi\sqrt{\tilde{\omega}}) + j \frac{\sqrt{R(\tilde{\omega})}}{P(\tilde{\omega})} \frac{\sin(\xi\sqrt{\tilde{\omega}})}{\sqrt{\tilde{\omega}}}, \quad (1)$$

$$Q_2(\xi, \tilde{\omega}) = \cos(\xi\sqrt{\tilde{\omega}}) - j \frac{\sqrt{R(\tilde{\omega})} \sin(\xi\sqrt{\tilde{\omega}})}{P(\tilde{\omega}) \sqrt{\tilde{\omega}}}. \quad (2)$$

Системні функції не є цілими, але мають по одному кореню в кожному інтервалі частот. Якщо функції  $\ln Q_1(\xi, \tilde{\omega})$  і  $\ln Q_2(\xi, \tilde{\omega})$  мають простий полюс в точці, то логарифмічними особливими точками з від'ємними відніманнями відрахуваннями є тільки точки  $\tilde{\omega} = \infty$ . Тому, число нулів цих функцій дорівнює  $n$ , і всі лежать по одному в кожному із зазначених вище інтервалів. Ці властивості виправдовують введення такого представлення системних функцій і вказують на апарат еліптичних інтегралів і еліптичних функцій, яким необхідно скористатися [14].

Якщо функції  $Q_1(\xi, \tilde{\omega})$  і  $Q_2(\xi, \tilde{\omega})$  в (1, 2) є раціональними від  $\xi$  і  $\tilde{\omega}$ , де  $\tilde{\omega}$  є многочленом третьої або четвертої ступеня від  $\xi$ , то  $\int Q_1(\xi, \tilde{\omega}) d\xi$  і  $\int Q_2(\xi, \tilde{\omega}) d\xi$  називаються еліптичними. Як відомо, еліптичні інтеграли в загальному випадку не виражаються через елементарні функції [14].

Розглянутий випадок передачі і прийому інформації на декількох частотах по суті є частотно-рознесеним прийомом, який впроваджено в деякі системи тропосферного зв'язку, наприклад, [15]. Частотно-рознесений прийом один із способів боротьби з завмираннями сигналу і зосередженими завадами. Найбільш поширеним способом боротьби з завмираннями в системах тропосферного зв'язку є просторово рознесений прийом, наприклад [1]. В цьому випадку тропосферна станція має, як правило, дві антени, що працюють на передачу і прийом, але випромінювання і прийом сигналу здійснюється у своїх підсмугах частот в кожному на одній частоті. Для каналів зв'язку таких систем тропосферного зв'язку явний вид системної функції спрощується. Якщо прийняти  $a_1 = k^2$  ( $0 < k < 1$ ) і  $b_1 = 1$ , то за допомогою конформного відображення:

$$\tilde{\omega} = \frac{1}{sn^2(u, k)}, \quad \frac{du}{d\tilde{\omega}} = -\frac{1}{2\sqrt{\tilde{\omega}(\tilde{\omega} - k^2)(\tilde{\omega} - 1)}} \quad (3)$$

комплексна площина відображається на прямокутник. У виразі (3)  $sn$  є еліптичною функцією Якобі.

Тепер системна функція може бути представлена через еліптичні функції і еліптичні інтеграли:

$$Q(\xi, \tilde{\omega}) = \frac{\Theta(0)\Theta(u - j\xi)}{\Theta(u)\Theta(j\xi)} e^{j\xi K'/K}, \quad (4)$$

де  $\Theta$  – тета-функція;  $K'/K$  – повні еліптичні інтеграли першого роду.

Важливо відзначити, що в (4) для окремого випадку системна функція виражається через тета-функцію. Це пояснюється тим, що кожна з еліптичних функцій Якобі може бути виражена як відношення двох тета-функцій [13].

### Висновки

На закінчення відзначимо, що канал зв'язку з частотно-селективними завмираннями і схильний до зосереджених перешкод може мати місце і на радіорелейних лініях зв'язку, а не тільки тропосферних. У роботах [1-3] показана перспективність створення комбінованих засобів зв'язку, наприклад мобільних цифрових тропосферно-радіорелейних станцій. Тому, математичний опис багатопроблемних каналів зв'язку за допомогою системних функцій, що мають явний вигляд і виражених через еліптичні функції і еліптичні інтеграли актуально також при побудові мережі зв'язку на комбінованих станціях радіозв'язку.

**Список використаної літератури**

1. Почерняев В. М. Мобільна цифрова станція НВЧ діапазону подвійного призначення / В.М. Почерняев, В.С. Повхліб // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова. – 2014. – № 2. – С. 76-82.
2. Почерняев В. Н. Состояние и направления развития мобильных цифровых радиорелейных систем / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Системи озброєння і військова техніка. – 2018. – №1(53). – С. 183-188.
3. Почерняев В. Н. Состояние и направления развития мобильных цифровых тропосферных систем связи / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Системи озброєння і військова техніка. – 2018. – №2(54). – С. 51-59.
4. Bastos Luis. Tactical troposcatter applications in challenging climate zones / Luis Bastos, Hermann Wietgreffe // Military communications conference (MILCOM), 29 Oct.-1 Nov. 2012, Orlando, FL, USA. – P.1-6.
5. Bastos Luis. A Geographical Analysis of Highly Deployable Troposcatter Systems Performance / Luis Bastos, Hermann Wietgreffe // IEEE Military communications conference (MILCOM), 18-20 Nov. 2013, San Diego, CA, USA. – P. 661- 667.
6. Bastos Luis. Highly-deployable troposcatter systems in support of NATO expeditionary operations / Luis Bastos, Hermann Wietgreffe // Military communications conference (MILCOM), 7-10 Nov. 2011, Baltimore, MD, USA. – P. 2042-2049.
7. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам – М.: Радио и связь, 1982. — 304 с.
8. Ayedi Mariem. Efficient nodes identification based on embedded signaling using the fast Walsh Hadamard transform in multi-sources multi-relays systems / Mariem Ayedi, Noura Sellami, Mohamed Siala // International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), 11-13 May 2016, Yasmine Hammamet, Tunisia. – P. 1-5.
9. Соколов А.В. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / Под ред. А.В. Соколова. – М.: Радиотехника, 2003.- 512 с.
10. Zhang Wei. STC-GFDM systems with Walsh-Hadamard transform / Wei Zhang, Zhimin Zhang, Jipeng Jia, Lin Qi // IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT), 20-22 Aug. 2016, Harbin, China. – P. 162-165.
11. Duong Quang. Walsh-Hadamard precoded circular filterbank multicarrier communications / Quang Duong, Ha H. Nguyen // International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom), 9-11 Jan. 2017, Da Nang, Vietnam. – P. 193-198.
12. Klapper A. Arithmetic Correlations and Walsh Transforms / Andrew Klapper, Mark Goresky // IEEE Transactions on Information Theory. – Jan. 2012. – Vol.58, Issue 1. – P. 479-492.
13. Pochernyaev V.N. Analysis of the frequency parameters of the new combined microwave radio system / V.N. Pochernyaev, V.S. Povhleb // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (May 29 – June 2, 2017) – Kyiv, 2017.
14. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М.Абрамовица, И.Стиган – М.: Наука, 1979. — 832 с.
15. Малогабаритная помехозащищенная станция загоризонтной связи / Р. Н. Муха, В.В. Серов, Т.Г. Тараканова, А.В. Шевыр'єв // Успехи современной радиоэлектроники. - 2014. - № 2. - С. 11-16

**References**

1. Pochernyaev V. M., Povkhlib V.S. Dual-purpose mobile digital microwave. *Scientific works of the ONAC named after A.S. Popov* 2 (2014), 76-82.
2. Pochernyaev V. N., Povkhlib V.S. Status and directions of development of mobile digital radio relay systems, *Weapons systems and military equipment* 1(53) (2018), 183-188.

3. Pocherniaiev V. N., Povkhliv V.S. Status and directions of development of mobile digital tropospheric communication systems *Weapons systems and military equipment* 2(54) (2018), 51-59.
4. Bastos Luis, Wietgreffe Hermann, Tactical troposcatter applications in challenging climate zones, *MILCOM 2012 – 2012 IEEE Military Communications Conference*, 29 Oct.-1 Nov. (2012), Orlando, FL, USA, 1-6.
5. Bastos Luis, Wietgreffe Hermann. A Geographical Analysis of Highly Deployable Troposcatter Systems Performance *IEEE Military communications conference (MILCOM)*, 18-20 Nov. (2013), San Diego, CA, USA, 661- 667.
6. Bastos Luis, Wietgreffe Hermann. Highly-deployable troposcatter systems in support of NATO expeditionary operations *Military communications conference (MILCOM)*, 7-10 Nov. (2011), Baltimore, MD, USA, 2042-2049.
7. Kloviskyi D.D. *Transmission of discrete messages by radio*, Radio and communication, (1982).
8. Ayedi Mariem. Sellami Noura, Siala Mohamed. Efficient nodes identification based on embedded signaling using the fast Walsh Hadamard transform in multi-sources multi-relays systems. *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 11-13 May (2016), Yasmine Hammamet, Tunisia, 1-5.
9. Sokolov A.V. *Promising radar issues. Collective monograph*, Radiotechnics (2003).
10. Zhang Wei, Zhimin Zhang, Jia Jipeng, Qi Lin. STC-GFDM systems with Walsh-Hadamard transform, *IEEE International Conference on Electronic Information and Communication Technology (ICEICT)*, 20-22 Aug. (2016), Harbin, China, 162-165.
11. Duong Quang, Nguyen Ha H. Walsh-Hadamard precoded circular filterbank multicarrier communications. *International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*, 9-11 Jan. (2017), Da Nang, Vietnam. 193-198.
12. Klapper Andrew, Goresky Mark. Arithmetic Correlations and Walsh Transforms. *IEEE Transactions on Information Theory*, (2012), Vol.58, Issue 1, 479-492.
13. Pochernyaev V.N. Povhleb V.S. Analysis of the frequency parameters of the new combined microwave radio system. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, May 29 – June 2 (2017).
14. Abramovyts M., Styhan Y. Directory of special functions with formulas, graphs and mathematical tables, Science (1979).
15. Mukha R. N., Serov V.V., Tarakanova T.H., Shevyrvov A.V. Small-scale noise immunity station with horizontal communication, *The successes of modern radio electronics* 2 (2014) 11-16.

**Автор статті (Author of the article)**

Зайченко Валентин Вікторович - аспірант (Zaichenko Valentyn Viktorovych – postgraduate student). Phone: +380 (66) 287 86 71. E-mail: big-valtan@bigmir.net.

Дата надходження  
в редакцію: 10.04.2019 р.

Рецензент:  
д.т.н., професор Беркман Л.Н.  
*Державний університет телекомунікацій, Київ*