

## ANALYSIS OF THE SYNCHRONISM ENTERING PROCESS ROBUSTNESS IN UAV'S RADIO CONTROL LINE WITH FHSS

**Roma O. M.** – Dr. Sc., Senior Researcher, Head of the Chair of the Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Vasylenko S. V.** – PhD, Head of the Research Laboratory of the Research Center of the Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Peleshok Ye. V.** – PhD, Deputy Head of the Research Center of the Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Honenko S. V.** – Postgraduate student of the scientific and organizational department of the Research Center of the Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Nikolayenko B. A.** – PhD, Senior Lecturer at the Department of the Institute of Special Communications and Information Protection of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The experience of joined forces operation in the east of the country has shown that in the process of completing tasks, an unmanned aerial vehicle (UAV) is forced to operate in a rather difficult environment. The most significant is the problem of ensuring the transfer of command commands between the aircraft and the ground control post in the face of powerful intentional interference by the enemy.

The work as a UAV control channel proposes the use of frequency-hopping spread spectrum (FHSS). When constructing the UAV control line with the FHSS, the main consideration should be given to the process of entering synchronism as the primary one in relation to the process of transmitting control commands.

Within this problem, it is necessary to evaluate the noise immunity of the process of entering into the synchronism of the UAV control line with the FHSS in the conditions of powerful intentional interference of the enemy.

**Objective.** The purpose of the article is to analyze the noise immunity of the process of entering into the synchronism of the UAV radio control line with the FHSS in the conditions of the powerful intentional interference of the enemy.

**Methods.** In the work, on the basis of the developed simulation model (SM) of the process of entering into synchronism of the UAV control line with the FHSS, a number of experiments and estimation of the noise immunity of the process of entering into the synchronism of the UAV control line with the FHSS under conditions of powerful intentional interference.

**Results.** Using the developed SM, the dependence of the probability of true and false occurrence in the synchronism of the UAV control line with the FHSS for one cycle, one sub-cycle and one frequency position of transmission from different values of the signal-to-noise ratio at the affected and unaffected frequency of entry for different values characterizing interference. The simulation results are presented as graphs.

**Conclusions.** Comparison of the simulation results with the analytical ones confirms the adequacy of the synthesized mathematical model of the process of entering into the synchronism of the UAV control line with the FHSS and allows to determine the optimal parameters of the algorithm of entering the synchronization that will be satisfied.

**KEYWORDS:** broadband signals, frequency-hopping spread spectrum (FHSS), noise immunity, synchronism, simulation model, unmanned aerial vehicle (UAV).

### ABBREVIATIONS

AWGN is an additive white Gaussian noise;  
BPSK is a binary phase-shift keying;  
UAV is an unmanned aerial vehicle;  
SM is a simulation model;  
FHSS is a frequency-hopping spread spectrum;  
EW is an electronic warfare.

### NOMENCLATURE

$f_1, \dots, f_{k-1}, f_k$  is a set of synchronism entering frequencies;

$f_{rec}$  is a receiver frequency positions;

$f_{tr}$  is a transmitter frequency positions;

$k$  is the number of frequencies of transmitter synchronism entering in one sub-cycle;

$l$  is the number of sub-cycles of transmitter synchronism entering in one cycle of occurrence;

$m_{sf}$  is a synchro-frame length;

$m_{si}$  is a length of the block of service information in synchro-frame;

$m_{st}$  is a synchro-tag length;

$m_{tr}$  is the threshold number of bits with synchro-tag length  $m_{st}$ , that can be accepted incorrectly;

$N_{f.e.}$  is the number of synchro-sequences that lead to the false synchronism entering;

$r$  is the number of repetitions of  $s$  bits each,  
 $r=1, 3, 5 \dots$ ;

$s$  is the number of bits used to encode service information;

$t_c$  is a duration of one frequency transmission cycle;

$t_{sc}$  is a duration of one frequency transmission sub-cycle;

$t_{w.t.rec.}$  is the length of time the receiver is operating at the same frequency position;

$t_{w.t.tr}$  is the length of time the transmitter is operating at the same frequency position;

$P_{af}$  is the probability of frequency affection;

$P_{b_r}$  is the probability of one bit correct receiving with  $r$ -multiple repetition;

$P_{c.s.f.}$  is the probability of correct synchronism entering for one frequency position;

$P_{c.s.c.}$  is the probability of correct synchronism entering for one transmission cycle;

$P_{er}$  is the probability of erroneous reception;

$P_{er.s.}$  is the probability of erroneous synchronism entering;

$P_{f.s.}$  is the probability of false synchronism entering;

$P_{f.sc.}$  is a probability of false synchronism entering for one transmission sub-cycle;

$P_{f.s.c.}$  is a probability of false synchronism entering for one transmission cycle;

$P_{f.s.f.}$  is a probability of false synchronism entering for one frequency position;

$P_{s.r.}$  is a probabilities of synchronism entering for one register check;

$P_{s.i.}$  is the probability of the service information block correct receiving;

$P_{s.sc.}$  is a probability of correct synchronism entering for one transmission sub-cycle;

$R_b$  is a bit rate of information transmission in the radio channel;

$SNR_+$  is a signal-to-noise ratio at the erroneous frequencies of entering;

$SNR_-$  is a signal-to-noise ratio at the non-erroneous frequencies of entering;

$t_{t.t.}$  is a reconfiguration time for transmitter;

$t_{sc}$  is the time length of one sub-cycle transmission of frequencies entering synchronism;

$t_{w.t.}$  is the length of time the transmitter is operating at the same frequency, taking into account the time for reconfiguration.

## INTRODUCTION

Currently, no one is surprised by the attention paid to unmanned aviation in the world. The effectiveness of the

© Roma O. M., Vasylenko S. V., Peleshok Ye. V., Honenko S. V., Nikolayenko B. A., 2020  
DOI 10.15588/1607-3274-2020-2-2

UAVs usage for military purposes has been repeatedly proven because it can significantly reduce material costs and avoid risks connected to crew life [1–2]. Including modern UAVs are capable of invisible reconnaissance of enemy objects and targets, strike aerial and artillery strikes against enemy targets, carry out radio reconnaissance and electronic warfare (EW).

In the course of the operation of the joint forces in the east of the country, the military encountered a number of problems with the use of UAVs in service with the Armed Forces of Ukraine, as these aircraft are morally outdated and unable to withstand modern electronic warfare capable of detecting and suppressing signals in real time [3–5].

One of the methods of increasing the noise immunity of the UAV control line in complex electronic conditions is the use of broadband signals.

Comparisons of different methods of generating broadband signals confirm that with respect to the optimal (for each method) interference, the noise immunity of these signals is the same and acceptable for the construction of a UAV control channel [6].

In the work as a UAV control channel proposed the use of broadband signals with the FHSS.

When constructing the UAV control line with the FHSS, the main consideration should be given to the process of entering synchronism, as the primary one in relation to the process of transmission of control commands. This statement is also explained by the decrease in the number of frequencies and the speed of their tuning during the phase of synchronization, which greatly facilitates the work of the enemy.

Therefore, the noise immunity analysis of the process of entering into synchronism of the UAV control line with the FHSS in the conditions of influence of a powerful deliberate interference of the enemy is an urgent scientific task.

**The object of the study** is the process of entering into synchronization of the UAV control line with the FHSS.

**The subject of the study** is the subsystem of the UAV control line with the FHSS entering into the synchronism.

**The purpose of the work** is to analyze the noise immunity of the process of entering into synchronism of the UAV control line with the FHSS in the conditions of the powerful intentional interference of the enemy.

To achieve this goal, a number of partial problems should be solved, for instance:

– using the technique of noise immunity estimation of algorithms of the entering into synchronism process in the radio link with the FHSS [7] and the synthesized mathematical model of the process of entering into the synchronism of the radio control line of the UAV with the FHSS [8] using the computer simulation environment Matlab R2017a with the Simulink extension package UAV control lines with FHSS;

– to set parameters of elements of SM and to carry out modeling;

- to evaluate the obtained simulation results by built graphical dependencies;
- to evaluate the noise immunity of the process of entering into synchronization of the UAV control line with the FHSS.

### 1 PROBLEM STATEMENT

Since the concept of “noise immunity” implies the ability of the radio communication system to withstand the effects of intentional interference, the probability of entering the synchronism of the UAV control line with the FHSS is selected as an indicator of the noise immunity of the UAV control line ( $P_{c.s.c.}$ ).

The main requirement related to the UAV control line with FHSS is the need for guaranteed synchronization within the allotted time ( $P_{c.s.c.} \geq 0.99$ ).

The calculations are carried out for a typical bit rate of information transmission in the radio channel  $R_b = 19,2$  kbps, which is sufficient for the transmission of the commands required for manual control of the UAV [9]. A communication channel is a channel that is as close to real as possible, that is, when the probability of a false reception is within  $P_{er} \in [0; 0.2]$ ;

Limitations and assumptions:

1. As a limitation, we take the diagram of a typical algorithm for entering the synchronism in a radio link with the FHSS (Fig. 1).

2. When calculating the probability of entering synchronism ( $P_{c.s.c.}$ ) such characteristics of the radio line with the FHSS, as the physical properties of the radio wave propagation medium, the type of signal, the modulation and demodulation method, the signal processing method on the transmitter, the power of the transmitter, the range of radio frequencies, directional

antenna characteristics, etc. are not taken into account, as they affect the  $P_{er}$  in some way which is already taken into account in the output.

3. We will assume that the interpreter in his strategy for the suppression of the radio line with the FHSS does not take into account the peculiarities of the algorithm of entering into synchronism, that is, it interrupts, normally distributed throughout the frequency range of the radio with the FHSS, or concentrated in separate parts of the radio  $P_{af} \in [0; 0.4]$ .

### 2 REVIEW OF THE LITERATURE

A great amount of studies are devoted to the question of the properties disclosure of FHSS method and the technique of forming the FHSS signals under the conditions of intentional and unintentional interference [10–14]. These papers detail the advantages and disadvantages of this method, the basic mathematical models of the radio communication system with FHSS, and analyze the noise immunity of this method. Also, in [15–16], methods for finding signals from the FHSS were proposed, and the condition of the radio channel was evaluated.

However, the scientific results presented in publications [10–16] when considering the issue of finding a complex signal from the FHSS do not pay sufficient attention to the noise immunity of the synchronization process.

The analysis of works [17–18] showed that at the stage of the search for a complex signal from the FHSS the noise immunity of the radio line is characterized by the noise protection of the algorithm of synchronism entering.

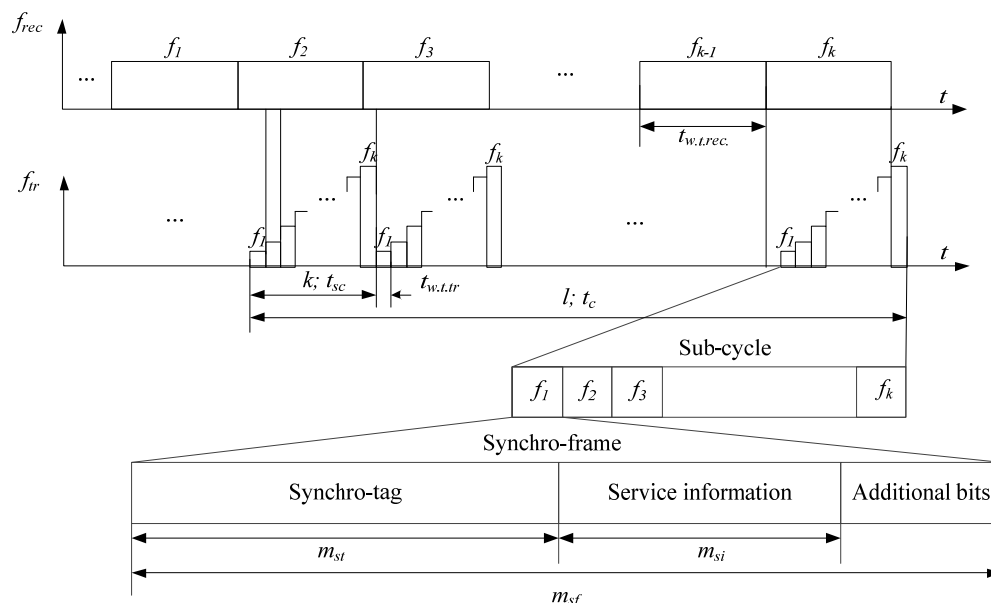


Figure 1 – Diagram of the synchronism entering typical process in the radio link with the FHSS

### 3 MATERIALS AND METHODS

On the basis of the known technique for noise immunity estimation of the synchronism entering algorithm in the radio link with the FHSS [7], a mathematical model of the process of entering into the synchronism of the radio control line of the UAV with the FHSS has been synthesized.

In it, the probability of entering into synchronism for one cycle ( $P_{c.s.c.}$ ) is used as an indicator of estimation of the noise immunity of the entering into synchronism process of the UAV control line with the FHSS.

According to the probabilities multiplication law  $P_{c.s.c.}$  is equal to the product of probabilities of non-affectation of frequency of entry into the transmitter synchronism (coinciding with the frequency of entry into the synchronism of the receiver), correct reception of the synchro-frame (if the event of “non-affectation of frequency” really took place):

$$P_{c.s.c.} = (1 - P_{af})(1 - P_{er.s.})P_{s.r.}P_{s.i.}$$

We find the probability  $P_{er.s.}$  as follows. At the frequency of synchronism occurrence synchro-frame is transmitted, and contains a synchro-tag length  $m_{st}$ . Of these, only those that differ from the expected number of bits, which do not exceed  $m_{tr}$ , result in false entry into synchronism. The total number of sequences that lead to an erroneous occurrence of synchronism  $N_{f.e.}$  is equal to:

$$N_{f.e.} = \sum_{i=0}^{m_{tr}} C_{m_{st}}^i,$$

where  $C_{m_{st}}^i$  – number of combinations from  $m_{st}$  to  $i$ .

Considering that the occurrence of any of the false sequences is equal, then the probability of an erroneous reception of the synchro-tag in one cycle is equal to:

$$P_{er.s.} = \sum_{i=1}^l C_{m_{st}}^i P_{er.s.}^i (1 - P_{er.s.})^{l-i}.$$

The probability of synchronism entering with one check of registers  $P_{s.r.}$  is equivalent to the probability of receiving a sequence of  $m_{st}$  bits with an erroneous number of bits not greater than  $m_{tr}$  and calculated by the equation:

$$P_{s.r.} = \sum_i^{m_{tr}} C_{m_{tr}}^i P_{er.s.}^i (1 - P_{er.s.})^{m_{tr}-i}.$$

To calculate the probability of receiving service information  $P_{s.i.}$ , the encoding parameters of the service information block (number of bits used for encoding service information and the number of their repetitions) must be taken into account.

It is believed that the interpreter in his strategy for the suppression of radio lines with FHSS does not take into account the peculiarities of the algorithm of entering synchronism, that is, interferes with, evenly distributed throughout the frequency range of radio with the FHSS, or concentrated in its separate parts of range affecting the working frequencies of radio line with  $P_{af}$  probability.

Taking the limitation from above, the probability of one bit correct receiving with  $r$  – repetition is equal to:

$$P_{b_r} = \sum_{i=\frac{r+1}{2}}^r C_r^i (1 - P_{er})^i P_{er}^{r-i}.$$

In this case, the probability of receiving service information is equal to:

$$P_{s.i.} = P_{b_r}^s.$$

Using the synthesized mathematical model, the choice of optimal, by the criterion of maximum noise immunity, parameters of the algorithm of entering into the synchronism of the UAV control line with the FHSS [8]:

- the number of frequencies occurrence of transmitter synchronism in one occurrence sub-cycle of  $k = 10$ ;
- number of sub-cycles of occurrence of transmitter synchronism in one cycle of occurrence  $l = 6$ ;
- the length of time the transmitter is found at the same frequency, taking into account the time for tuning  $t_{w.t.} = 10$  ms;
- the length of time the transmitter tuning from one frequency to another  $t_{t.t.} = 1$  ms;
- the length of one sub-cycle transmission time for entry into synchronism frequencies  $t_{sc} = 100$  ms;
- synchro-frame length  $m_{sf} = 172$  bits;
- synchro-tag length  $m_{st} = 126$  bits;
- the encoding of the information contained in the timing is accomplished by two Kasami sequences of 63 bits each;
- length of the service information synchro-frame block  $m_{si} = 46$  bits;
- the encoding of the service information block is carried out by means of 11-fold majority coding;
- the threshold number of bits in synchro-tag  $m_{st} = 126$  bits, which is allowed to accept incorrectly  $m_{tr} = 21$  bits.

#### 4 EXPERIMENTS

We keep the following limitations and assumptions that apply to the SM:

- the signal reception is coherent with the BPSK;
- a regular AWGN channel is used as the link;
- the Bernoulli random binary generator is used as a deliberate interference simulator;
- check of registers is carried out synchronously with adjustment (hop) of working frequency;
- to obtain reliable test results (cycle transfer), repeat at least  $10^6$  times.

Based on the calculated parameters of the algorithm of entry, as well as the restrictions and assumptions that are advanced to the subsystem of entry into synchronism, a block diagram of the process of entering into synchronism of the UAV control line with the FHSS was constructed (Fig. 2).

It consists of:

- a simulator of a radio station transmitter with FHSS;

- a powerful intentional interference simulator (AWGN radio channel);

- a simulator of a radio transceiver with a FHSS that receives a signal against the background of a powerful intentional interference;

- a device for estimating the statistics obtained in the simulation process.

Based on the constructed block diagram and with the help of standard blocks of the Simulink batch extension library, the SM of the process of entering into synchronization in the UAV control line with the FHSS was constructed (Fig. 3).

The procedure for conducting a model experiment:

- at the input of the simulator of the receiver comes formed on the simulator transmitter synchro-frame;
- transmission is carried out at predetermined fixed frequencies of entry;
- the entry is considered successful if the synchro-frame is received and the accepted Kasami sequence matches its own.

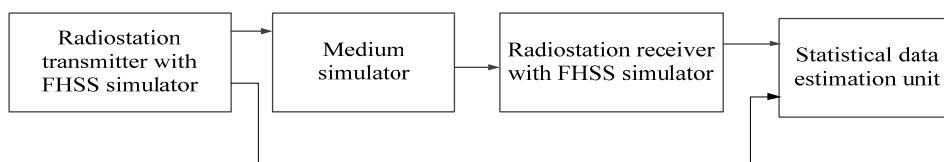


Figure 2 – Block diagram of the SM of entering into synchronism process in the UAV control line with the FHSS

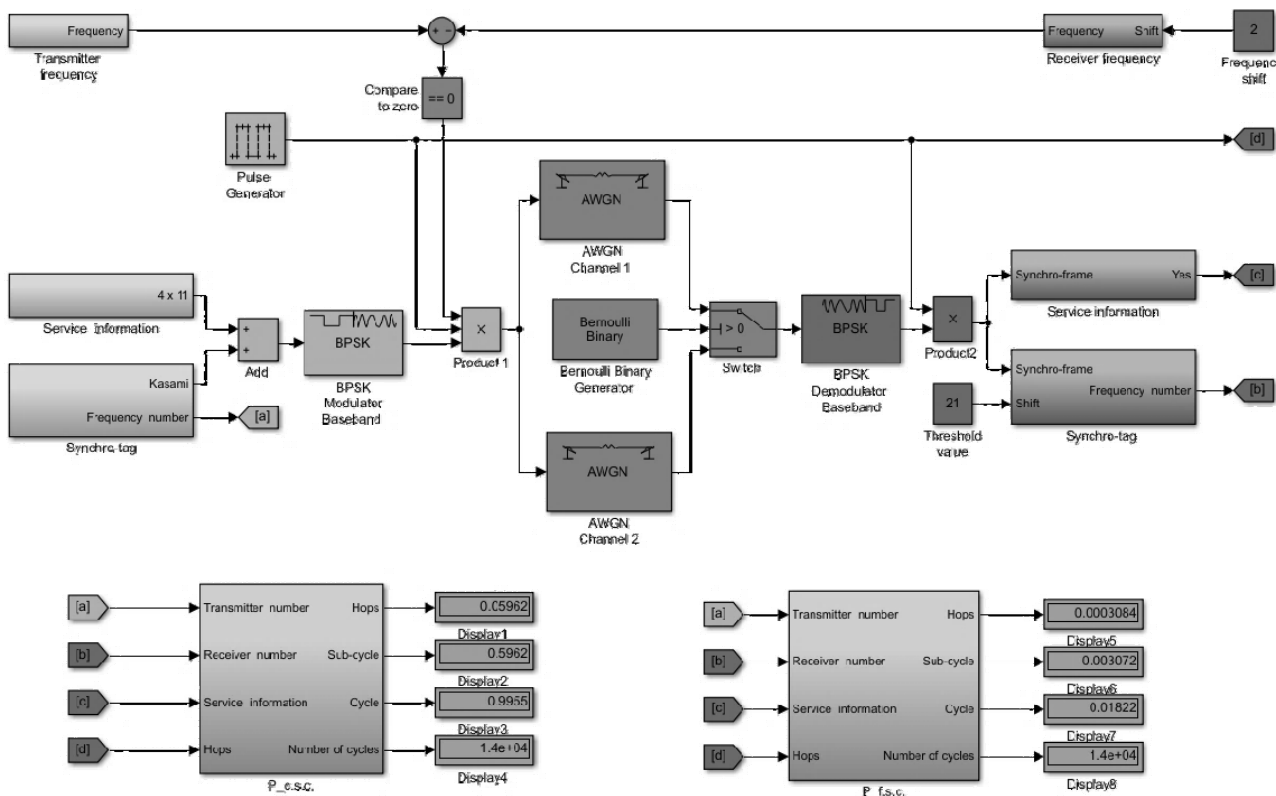


Figure 3 – Structural diagram of the SM of entering into synchronism process in the UAV control line with the FHSS

The developed SM simulated the transmission of a synchro-frame consisting of a synchro-tag and a service information block. That is, two Kasami sequences are formed at the input of the transmitter, containing information about the frequency number and sub-cycle number of the transmitter (timing), and a block of service information encoded by majority coding (meander). The generated timing block and the service information block are combined into the timing frame and leads to the input of the BPSK modulator.

After modulation, the generated synchro-frame is transmitted to the AWGN channel, where it is exposed to the deliberate interference of the enemy. Bernoulli Binary Generator is used to simulate the impact of the enemy. Since the technique [7] assumes that not all frequencies of synchronism are affected by deliberate interference, two AWGN channels are used to simulate the propagation medium. If the frequency is not affected, the signal passes through a channel with a significant noise level (AWGN Channel 1). If an accidental interference has occurred, the switch (Switch) switches to another line (AWGN Channel 2), where the signal power is much higher than the noise power.

The received signal from the transmitter, using the BPSK demodulator, is demodulated and multiplied by a common (previously known to both users) pseudorandom sequence. After that, the synchronization frame and the block of service information are separated. The decision to enter synchronization on the receiving side is made on the basis of a comparison of the obtained Kasami sequences with their own. For estimation of statistics in SM are used:

- synchronism probability estimation unit ( $P_{s.r.}$ );
- block of estimation of probability of false occurrence in synchronism ( $P_{f.s.}$ ) (synchronization by noise).

The statistical estimation units analyze the probabilities of correct and false entry into the synchronism of the UAV control line with the FHSS for one frequency position ( $P_{c.s.f.}$ ,  $P_{f.s.f.}$ ), sub-cycle ( $P_{s.sc.}$ ,  $P_{f.s.c.}$ ) and cycle of ( $P_{c.s.c.}$ ,  $P_{f.s.c.}$ ) transmission.

## 5 RESULTS

Lets analyze the dependence of the probability of true ( $P_{c.s.c.}$ ) and false ( $P_{f.s.c.}$ ) entry into the synchronism of the UAV control line with the FHSS for one cycle of transmission from different values of the signal-to-noise ratio of the affected ( $SNR_+$ ) and unaffected occurrence frequencies ( $SNR_-$ ). The values of ( $SNR_+$ ) and ( $SNR_-$ ) are set at the beginning of the experiment in AWGN Channel 1 and AWGN Channel 2. The simulation results are presented in the form of graphs of the dependence of  $P_{c.s.c.}$  and  $P_{f.s.c.}$  for fixed values  $SNR_- = 0$  dB,  $P_{af} = 0.4$  and different values  $SNR_+$  (Fig. 4, 5).

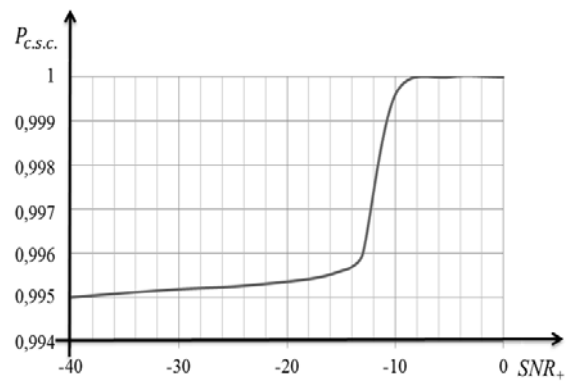


Figure 4 – Dependence graph  $P_{c.s.c.}$  for  $SNR_- = 0$  dB,  $P_{af} = 0.4$  and different values of  $SNR_+$

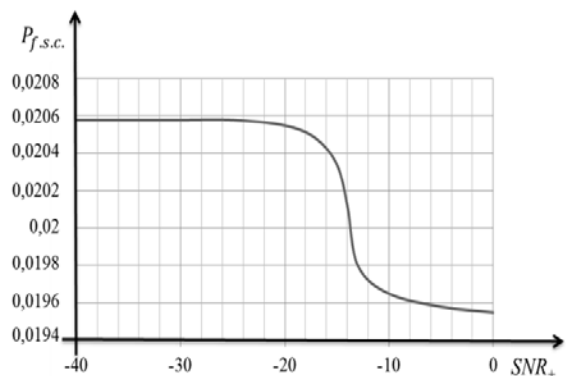


Figure 5 – Dependence graph  $P_{f.s.c.}$  for  $SNR_- = 0$  dB,  $P_{af} = 0.4$  and different values  $SNR_+$

From Fig. 4 we see that the probability of entering synchronism even at significant values of the signal-to-noise ratio at the affected frequencies is quite high and at  $SNR_+ = -10$  dB approaches 1 ( $P_{c.s.c.} = 0.9997$ ). If this value is reduced to  $SNR_+ = -40$  dB, the probability of entering synchronism decreases ( $P_{c.s.c.} = 0.995$ ), but it nevertheless satisfies the requirements set.

The probability of a false entry into synchronism, for the same signal-to-noise ratio at the affected frequencies is not significant and is  $P_{f.s.c.} = 0.01965$  (Fig. 5).

Similar calculations of  $P_{c.s.c.}$  and  $P_{f.s.c.}$  are performed for fixed values of  $SNR_+ = -15$  dB and  $SNR_+ = -20$  dB,  $P_{af} = 0.4$  and different values of  $SNR_-$ . The simulation results are presented as graphs in Figs. 6, 7.

As the UAV control line is forced to operate in complex radioelectronic conditions, it is also advisable to consider the dependences  $P_{c.s.c.}$  and  $P_{f.s.c.}$  on the values characterizing the interference situation ( $P_{af}$ ). The simulation results are presented as graphs (Fig. 8, 9).

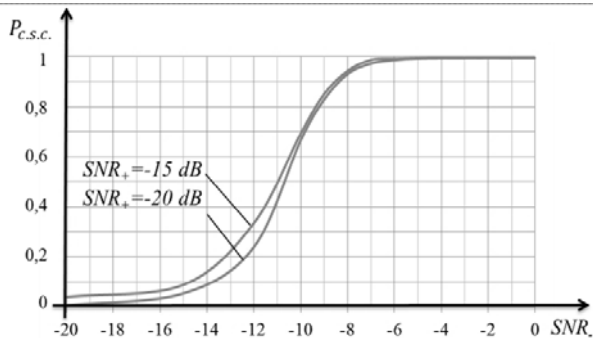


Figure 6 – Dependence graph  $P_{c.s.c.}$  for  $SNR_+ = -15$  dB,  $SNR_+ = -20$  dB,  $P_{af} = 0.4$  and different values  $SNR_-$

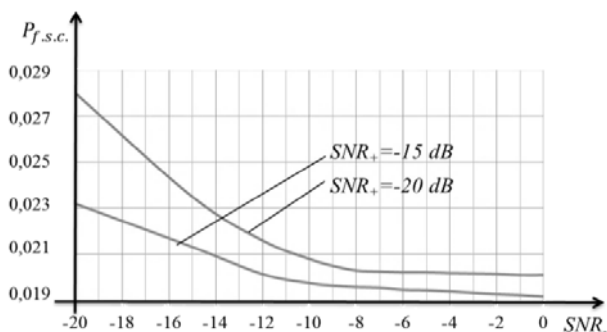


Figure 7 – Dependence graph  $P_{f.s.c.}$  for  $SNR_+ = -15$  dB,  $SNR_+ = -20$  dB,  $P_{af} = 0.4$  and different values of  $SNR_-$

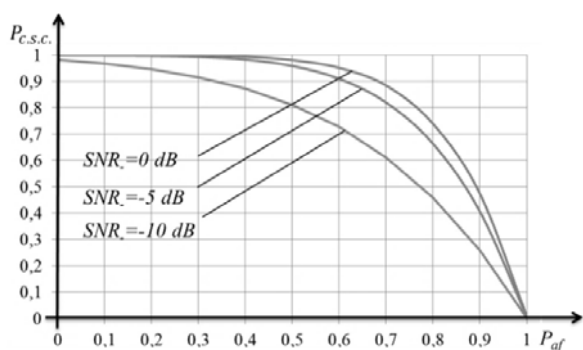


Figure 8 – Dependence graph  $P_{c.s.c.}$  for different values  $P_{af}$  for  $SNR_+ = -20$  dB,  $SNR_- = 0; -5; -10$  dB

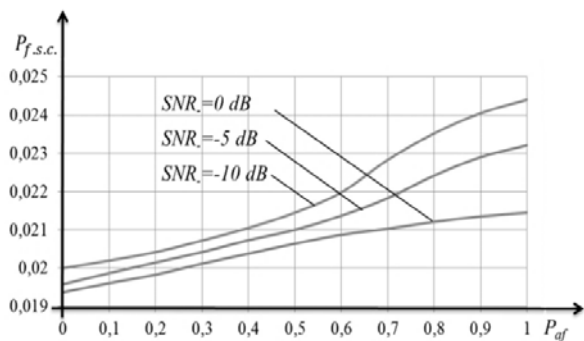


Figure 9 – Dependence graph  $P_{f.s.c.}$  from different values  $P_{af}$  for  $SNR_+ = -20$  dB,  $SNR_- = 0; -5; -10$  dB

From the graphs on Fig. 8 we see that the probability of entering synchronism at the values of the signal-to-noise ratio at the affected  $SNR_+ = -20$  dB and not affected frequencies  $SNR_- = -5$  dB at the probability of frequency affection  $P_{af} = 0.4$  approaches 1, which satisfies the set requirements.

Increasing the probability of affection to  $P_{af} = 0.6$  and decreasing the signal-to-noise ratio at unaffected frequencies to  $SNR_- = -10$  dB, the probability of entering synchronism decreases and equals  $P_{c.s.c.} = 0.7$ . The probability of false synchronization (Fig. 9), for the cases considered above, are insignificant and are in the range  $P_{f.s.c.} = [0.0195; 0.0245]$ .

## 6 DISCUSSION

Since conducting a large range of studies of the noise immunity of the process of entering into the synchronism of the UAV control line with the FHSS requires considerable time and money expenses, in order to optimize this process in the analysis, it is proposed to use the developed process of entering into the synchronism of the UAV radio control line. This SM allows you to select the necessary parameters of the algorithm to enter synchronism to achieve the maximum level of noise immunity of the process of entering synchronism.

The developed SM is unified and can be used in the development or upgrading of known radio communications with the FHSS.

## 7 CONCLUSIONS

Developed, using the Matlab R2017a Simulink computer simulation environment, a simulation model of the process of entering UAV control synchronization with FHSS allows:

- to check the performance of the synthesized mathematical model of the process of entering into synchronization of the UAV control line with the FHSS;
- to conduct a series of experiments for different values of the interfering environment in which the UAV is forced to operate;
- to evaluate the noise immunity of the process of entering into synchronization of the UAV control line with the FHSS.

**Scientific novelty of the obtained results.** As a result of the conducted studies, an adequate estimation of the noise immunity of the process of entering into synchronism of the UAV control line with the FHSS in difficult radio electronic conditions was made.

**The practical value** of the obtained results lies in the possibility of conducting a wide range of studies of the noise immunity of the process of entering the synchronization of the radio link with the FHSS in order to select the optimal parameters of the algorithm of occurrence from the point of view of the maximum noise immunity.

## REFERENCES

1. Kozera C. Military use of unmanned aerial vehicles a historical study, *Safety & Defense*, 2018, Vol. 4 (1), pp. 17–21. DOI: 10.37105/sd.4.
2. Udeanu, Gheorghe & Dobrescu, Alexandra & Oltean, Mihaela Unmanned aerial vehicle in military operations, *Scientific research and education in the air force*, 2016, Vol. 18, pp. 199–206. DOI: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.26.
3. Yasechko M. N., Ochurenko A. V., Kovalchuk A. A., Maksyuta D. V. Sovremennye radiotekhnicheskie sredstva bor'by s bespilotnymi letatel'nymi apparatami v zone provedeniya ATO, *Collection of scientific works of Kharkiv University to the Swedes*, 2015, No. 3 (44), pp. 54–57.
4. Maklashov V., Piganov M. Method of unification of electronic warfare means, *Reliability & Quality of Complex Systems*, 2019. DOI: 10.21685/2307-4205-2019-3-3.
5. Yerohin V. V., Roma O. M., Vasylenko S. V., Bezdrabko D. E. Matematychna model' perehopennja odynychnogo strybka sygnalu peredavacha z PPRCh, *Bulletin of NTUU "KPI" Series Radio Engineering, Radio Engineering*, 2016, Issue 64, pp. 75–85. DOI: 10.20535/RADAP.2016.64.75-85.
6. Bilenko A. P., Volkov L. N. Sravnenie pomohozashhishhennosti radiolinij s shirokopolosnymi signalami, *Radio engineering*, 1986, No. 4, pp. 19–21.
7. Mischenko V. G., Erokhin V. F. Metodyka ocinky zavadozahyshhenosti alorytmiv vkhodzhennja v synhronizm radiolinij' z psevdovypadkovym perelashtuvannjam radiochastoty, *Information Protection*, 2001, No. 2, pp. 32–59.
8. Roma O. M., Vasilenko S. V. Vybir parametriv alorytmu vkhodzhennja v synhronizm radiolinij' upravlinnja bezpilotnym lital'nym aparatom z psevdovypadkovym perenalashtuvannjam robochoi' chastoty, *Collection of scientific works of the Military Institute of Kyiv National Taras Shevchenko University*, 2016, No. 54, pp. 71–78.
9. Roma O. M., Vasilenko S. V. Osnovy pobudovy zavadozahyshhenoi' radiolinij' upravlinnja bezpilotnym lital'nym aparatom, *Collection of scientific works of the Military Institute of Kyiv National Taras Shevchenko University*, 2015, No. 49, pp. 97–104.
10. Chudnov A. M. Ob adaptivnyh algoritmah psevdosluchajnogo pereklyuchenija rabochih chastot radiolinij v uslovijah sluchajnyh i prednamerennyh pomoh, *Zhurnal radioelektroniki*, 2015, No. 4.
11. Nahorniuk O. A. Metod avtomatichnogo vyznachennja chasovyh parametriv radiosygnaliv iz psevdovypadkovym perestrojuvannjam robochoi' chastoty na foni vuz'kosmugovyh pereshkod, *Zbirnyk naukovykh prats ZhVI*, 2018, No. 15, pp. 53–64.
12. Fernández de Gorostiza, Berzosa J., Mabe J., Cortiñas R. A Method for Dynamically Selecting the Best Frequency Hopping Technique in Industrial Wireless Sensor Network Applications, *Sensors*, 2018, Vol. 18, Issue 2, pp. 657. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18020657>.
13. Krivenko O. V. Metodyka formuvannja sygnalu v radiozasobah z PPRCh v umovah vplyvu navmysnyh shumovyh zavud, *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, 2017, No. 1, pp. 132–135.
14. Gurski T. G., Krivenko O. V. Metodyka formuvannja sygnalu v radiozasobah z PPRCh pry peredachi movy v umovah vplyvu zavud u vidpovid', *Systemy upravlinnja, navihatsiyi ta zviazku*, 2017, No. 2, pp. 179–184.
15. Lei Z., Yang P., Zheng L. Detection and Frequency Estimation of Frequency Hopping Spread Spectrum Signals Based on Channelized Modulated Wideband Converters, *Electronics*, 2018, Vol. 7, Issue 9, P. 170. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7090170>.
16. Kanaa A., Sha'ameri A. A robust parameter estimation of FHSS signals using time–frequency analysis in a non-cooperative environment, *Physical Communication*, 2018, Vol. 26, pp. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2017.10.013>.
17. Berezyuk M. V. Zavadozahyshhenist' synhronizacii' radiolinij' z PPRCh ta fiksovanyh naborom chastot vkhodzhennja. Priority directions for the development of telecommunication systems and special-purpose networks, *Collection of materials IV scientific conference*. Kyiv, VITI NTUU "KPI", 2007, P. 58.
18. Piskun S. G. Zavadozahyshhenist' typovyh alorytmiv vkhodzhennja v synhronizm linij i system zv'jazku z psevdovypadkovym perelashtuvannjam robochoi' chastoty, *Priority directions for the development of telecommunication systems and special-purpose networks : Collection of materials V scientific conference*. Kyiv, VITI NTUU "KPI", 2010, P. 203.

Received 24.03.2020.  
Accepted 09.06.2020.

УДК 621.396.1

## АНАЛІЗ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ ПРОЦЕСУ ВХОДЖЕННЯ В СИНХРОНІЗМ РАДІОЛІНІЇ УПРАВЛІННЯ БПЛА З ППРЧ

**Рома О. М.** – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Василенко С. В.** – канд. техн. наук, начальник науково-дослідної лабораторії науково-дослідного центру Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Пелешок Є. В.** – канд. техн. наук, заступник начальника науково-дослідного центру Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Гоненко С. В.** – аспірант науково-організаційного відділу науково-дослідного центру Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.



**Ніколаєнко Б. А.** – канд. техн. наук, старший викладач кафедри Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Досвід проведення операцій об'єднаних сил на сході країни показав, що у процесі виконання завдань безпілотний літальний апарат (БПЛА) змушений працювати у досить складній завадовій обстановці. Найбільш суттєвою є проблема забезпечення передачі команд управління між літальним апаратом та наземним пунктом управління в умовах дії потужних навмисних завад противника.

У роботі в якості каналу управління БПЛА пропонується використання широкопоздовжових сигналів з псевдовипадковим переналаштуванням робочої частоти (ППРЧ).

При побудові радіолінії управління БПЛА з ППРЧ основну увагу необхідно приділити процесу входження в синхронізм, як первинному по відношенню до процесу передачі команд управління.

В межах зазначеної проблеми необхідно провести оцінку завадозахищеності процесу входження в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ в умовах дії потужних навмисних завад противника.

**Метою** статті є аналіз завадозахищеності процесу входження в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ в умовах впливу потужної навмисної завади противника.

**Методи.** У роботі, на основі розробленої імітаційної моделі (ІМ) процесу входження в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ, проведено низку експериментів та оцінено завадозахищеність процесу входження в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ в умовах впливу потужної навмисної завади.

**Результати.** За допомогою розробленої ІМ проведено аналіз залежності ймовірності вірного та хибного входження в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ за один цикл, один підцикл та одну частотну позицію передачі від різних значень відношення потужності сигнал/шум на уражених та неуражених частотах входження для різних значень, що характеризують завадову обстановку.

Результати моделювання представлені у вигляді графіків.

**Висновки.** Порівняння результатів моделювання з аналітичними, підтверджує адекватність синтезованої математичної моделі процесу входження в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ та дозволяє визначити оптимальні, за критерієм максимальної завадозахищеності, параметри алгоритму входження в синхронізм, що будуть задовольняти поставлені вимоги до радіолінії управління БПЛА з ППРЧ.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** широкопоздовжові сигнали, псевдовипадкове переналаштування робочої частоти (ППРЧ), завадозахищеність, входження в синхронізм, імітаційна модель, безпілотний літальний апарат (БПЛА).

УДК 621.396.1

#### АНАЛИЗ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ПРОЦЕССУ ВХОЖДЕНИЯ В СИНХРОНИЗМ РАДИОЛИНИИ УПРАВЛЕНИЯ БПЛА С ППРЧ

**Рома А. Н.** – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заведующий кафедрой Института специальной связи и защиты информации Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Василенко С. В.** – канд. техн. наук, начальник научно-исследовательской лаборатории научно-исследовательского центра Института специальной связи и защиты информации Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Пелешок Е. В.** – канд. техн. наук, заместитель начальника научно-исследовательского центра Института специальной связи и защиты информации Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Гоненко С. В.** – аспирант научно-организационного отдела научно-исследовательского центра Института специальной связи и защиты информации Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Николаенко Б. А.** – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры Института специальной связи и защиты информации Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

#### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Опыт проведения операций объединенных сил на востоке страны показал, что в процессе выполнения заданий беспилотный летательный аппарат (БПЛА) вынужден работать в достаточно сложной помеховой обстановке. Наиболее существенной является проблема обеспечения передачи команд управления между летательным аппаратом и наземным пунктом управления в условиях действия мощных умышленных помех противника.

В работе в качестве канала управления БПЛА предлагается использование широкополосных сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

При построении радиолинии управления БПЛА с ППРЧ основное внимание необходимо уделить процессу входжения в синхронизм, как первичному по отношению к процессу передачи команд управления.

В рамках указанной проблемы необходимо провести оценку помехозащищенности процесса входжения в синхронизм радиолинии управления БПЛА с ППРЧ в условиях действия мощных умышленных помех противника.

**Целью** статьи является анализ помехозащищенности процесса входжения в синхронизм радиолинии управления БПЛА с ППРЧ в условиях воздействия мощной преднамеренной помехи противника.

**Методи.** В роботі на основі розробленої імітаційної моделі (ІМ) процесу входу в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ, проведено ряд експериментів і оцінено помехозахищеність процесу входу в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ в умовах впливу потужної преднамеренної помехи.

**Результати.** С допомогою розробленої ІМ проведено аналіз залежності ймовірності верного і неверного входу в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ за один цикл, один підцикл і одну частотну позицію передачі від різних значень відношення потужності сигнал / шум на поражених і непоражених частотах входу для різних значень, що характеризують обстановку.

Результати моделювання представлені в вигляді графіків.

**Висновки.** Порівняння результатів моделювання з аналітичними, підтверджує адекватність синтезованої математичної моделі процесу входу в синхронізм радіолінії управління БПЛА з ППРЧ і дозволяє визначити оптимальні за критерієм максимальної помехозахищеності параметри алгоритму входу в синхронізм, які будуть задовольняти поставлені вимоги до радіолінії управління БПЛА з ППРЧ.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** широкополосні сигнали, псевдослучайна перестройка робочої частоти (ППРЧ), помехозахищеність, вхід в синхронізм, імітаційна модель, безпілотний літальний апарат (БПЛА).

#### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Kozera C. Military use of unmanned aerial vehicles a historical study / C. Kozera // *Safety & Defense*. – 2018. – Vol. 4 (1). – P. 17–21. DOI: 10.37105/sd.4.
2. Udeanu. Unmanned aerial vehicle in military operations / Udeanu, Gheorghe & Dobrescu, Alexandra & Oltean, Mihaela // *Scientific research and education in the air force*. – 2016. – Vol. 18. – P. 199–206. DOI: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.26.
3. Ясечко М. Н. Современные радиотехнические средства борьбы с беспилотными летательными аппаратами в зоне проведения АТО / М. Н. Ясечко, А. В. Очуренко, А. А. Ковальчук, Д. В. Максютя // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – 2015. – № 3 (44). – С. 54–57.
4. Maklashov V. Method of unification of electronic warfare means / V. Maklashov, M. Piganov // *Reliability & Quality of Complex Systems*. – 2019. DOI: 10.21685/2307-4205-2019-3-3.
5. Єрохін В. Ф. Математична модель перехоплення одиночного стрибка сигналу передавача з ППРЧ / В. Ф. Єрохін, О. М. Рома, С. В. Василенко, Д. Є. Бездрабко // *Вісник НТУУ «КПІ» Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування*. – 2016. – Вип. 64. – С. 75–85. DOI: 10.20535/RADAP.2016.64.75-85.
6. Биленко А. П. Сравнение помехозащищенности радиоліній с широкополосными сигналами / А. П. Биленко, Л. Н. Волков // *Радіотехніка*. – 1986. – № 4. – С. 19–21.
7. Міщенко В. Г. Методика оцінки заводо захищеності алгоритмів входу в синхронізм радіолінії з псевдовипадковим перелаштуванням радіочастоти / В. Г. Міщенко, В. Ф. Єрохін // *Захист інформації*. – 2001. – № 2. – С. 32–59.
8. Рома О. М. Вибір параметрів алгоритму входу в синхронізм радіолінії управління безпілотним літальним апаратом з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти / О. М. Рома, С. В. Василенко // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2016. – № 54. – С. 71–78.
9. Рома О. М. Основи побудови заводо захищеної радіолінії управління безпілотним літальним апаратом / О. М. Рома, С. В. Василенко // *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. – 2015. – № 49. – С. 97–104.
10. Чуднов А. М. Об адаптивных алгоритмах псевдослучайного переключения рабочих частот радиоліній в условиях случайных и преднамеренных помех / А. М. Чуднов // *Журнал радиоэлектроники*. – 2015. – № 4.
11. Нагорнюк О. А. Метод автоматичного визначення часових параметрів радіосигналів із псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти на фоні вузькосмугових перешкод / О. А. Нагорнюк // *Збірник наукових праць ЖВІ*. – 2018. – Вип. 15. – С. 53–64.
12. Fernández de Gorostiza A Method for Dynamically Selecting the Best Frequency Hopping Technique in Industrial Wireless Sensor Network Applications / Fernández de Gorostiza, J. Berzosa, J. Mabe, R. Cortiñas // *Sensors*. – 2018. – Vol. 18, Issue 2. – P. 657. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18020657>.
13. Кривенко О. В. Методика формування сигналу в радіозасобах з ППРЧ в умовах впливу навмисних шумових завад / О. В. Кривенко // *Системи озброєння і військова техніка*. – 2017. – № 1. – С. 132–135.
14. Гурський Т. Г. Методика формування сигналу в радіозасобах з ППРЧ при передачі мови в умовах впливу завад у відповідь / Т. Г. Гурський, О. В. Кривенко // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – 2017. – № 2. – С. 179–184.
15. Lei Z. Detection and Frequency Estimation of Frequency Hopping Spread Spectrum Signals Based on Channelized Modulated Wideband Converters / Lei Z., P. Yang, L. Zheng // *Electronics*. – 2018. – Vol. 7, Issue 9. – P. 70. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7090170>.
16. Kanaa A. A robust parameter estimation of FHSS signals using time–frequency analysis in a non-cooperative environment / A. Kanaa, A. Sha'ameri // *Physical Communication*. – 2018. – Vol. 26. – P. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2017.10.013>.
17. Березюк М. В. Заводо захищеність синхронізації радіолінії з ППРЧ та фіксованим набором частот входу вхід / М. В. Березюк // *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення : зб. матеріалів IV наук.-практ. семін. Київ : тези доповідей. – Київ : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2007. – С. 58.*
18. Піскун С. Ж. Заводо захищеність типових алгоритмів входу в синхронізм ліній і систем зв'язку з псевдовипадковим перелаштуванням робочої частоти / Піскун С. Ж. // *Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення : зб. матеріалів V наук.-техн. конф. Київ : тези доповідей. – Київ : ВІТІ НТУУ «КПІ», 2010. – С. 203.*