

О.П. Кулик, М.Д. Рисаков, І.Л. Костенко, О.В. Щербак, М.В. Дудко

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ НАДІЙНОСТІ ЗВ'ЯЗКУ НА ЛІНІЇ ТРОПОСФЕРНОГО РАДІОЗВ'ЯЗКУ

У роботі для попередньо розрахованих сумарних кутів закриття горизонту антен, довжини інтервалів та запасу рівня радіосигналу на завмирання на лінії тропосферного радіозв'язку пропонується математичний алгоритм розрахунку надійності зв'язку на окремих інтервалах лінії тропосферного радіозв'язку та на усій лінії. Алгоритм розрахунку передбачає, що значення еквівалентної протяжності кожного з інтервалів вже розраховані. Алгоритм наводиться у вигляді послідовності розрахункових виразів з відповідними коефіцієнтами, значення яких були отримані шляхом математичного опису графіків і номограм взаємних залежностей надійності зв'язку від відповідних параметрів для різних типів тропосферних станцій, що є оснащенні військ зв'язку та інформаційних систем Повітряних Сил ЗС України.

Ключові слова: лінія тропосферного радіозв'язку, тропосферна станція, запас рівня радіосигналу, надійність зв'язку.

Вступ

Постановка проблеми. Особливості побудови ліній тропосферного радіозв'язку (ЛТРЗ) по відношенню до ліній прямої видимості пов'язані з властивостями дальнього тропосферного розповсюдження ультракоротких радіохвиль, що обумовлюють особливості вибору траси ЛТРЗ і обов'язковість розрахунку надійності зв'язку на інтервалах лінії та обчислення в подальшому надійності зв'язку на усій лінії.

Згідно існуючої методики розрахунок надійності зв'язку ЛТРЗ включає наступні етапи:

- визначення координат розміщення тропосферних станцій (ТРС) для кожного з інтервалів лінії та відстані між ними;

- розрахунок кутів закриття горизонту антен ТРС, сумарного кута закриття антен ТРС інтервалів за профілем місцевості та азимутів взаємного положення ТРС для кожного з інтервалів;

- розрахунок запасу рівня радіосигналу на завмирання на кожному окремому інтервалі ЛТРЗ;

- визначення придатності кожного з інтервалів ЛТРЗ шляхом перевірки відповідності розрахованого значення запасу рівня радіосигналу на завмирання нормативним значенням;

- обчислення надійності зв'язку на окремих інтервалах ЛТРЗ і на усій лінії.

Автоматизація розрахунків перерахованих параметрів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1–4] відмічається, що під час навчань (бойових дій) через пункти управління частин, з'єднань та об'єднань Армії США проходить значний обсяг інформації. Наприклад, загальна кількість повідом-

лень, що проходять через пункти управління армійського корпусу щодня може сягати декількох тисяч. З таким обсягом інформації малоканалні засоби радіозв'язку справитися не в змозі, тому на вузлах зв'язку (ВЗ) широко використовуються багатоканальні лінії радіорелейного і тропосферного радіозв'язку [5–6], що забезпечують високу пропускну спроможність.

Прикладом широкого застосування засобів тропосферного зв'язку в інтересах збройних сил держав - учасниць Варшавського договору є опорна мережа тропосферного зв'язку "Барс", що була розгорнута з застосуванням ТРС Р-417С і Р-420С. За своїми параметрами вона перевищувала закордонну систему аналогічного призначення "Айс-Хай", а фактична надійність зв'язку між ТРС на інтервалі забезпечувалась на рівні не менше 99,98% [7–8]. Засоби тропосферного радіозв'язку також знаходили широке застосування у військах зв'язку збройних сил колишнього СРСР. Так, наприклад, для побудови опорних мереж зв'язку та ліній прямого зв'язку під час військового конфлікту у Республіці Афганістан активно застосовувались ТРС Р-410М та Р-412А.

Не дивлячись на все більш широке застосування супутникових засобів зв'язку засоби тропосферного радіозв'язку продовжують використовувати як в мережах спеціального, так і в мережах комерційного призначення [9–10]. Щодо перших мереж, то перевагою мобільних засобів тропосферного радіозв'язку перед супутниковими є їх вища живучість в умовах збройних конфліктів і/або при проведенні антитерористичних заходів. Прототипом портативної (переносної) ТРС може виступати розробка Харківського національного університету радіоелектроніки. Її технічні характеристики та результати ви-

пробувань, наведені у [10], свідчать про спроможність вітчизняних розробників самостійно розробляти сучасні ТРС.

В роботі [11] запропонована блок-схема алгоритму автоматизованого розрахунку ЛТРЗ і обґрунтовується можливість розрахунку координат, азимутів взаємного розміщення та кутів закриття горизонту антен ТРС кожного з інтервалів лінії зв'язку з використанням профілю рельєфу, отриманого з використанням електронної карти місцевості. Вказані параметри використовуються при розрахунку запасу рівня радіосигналу на завмирання на інтервалах лінії тропосферного радіозв'язку. Послідовність автоматизованого розрахунку запасу рівня радіосигналу пропонується в роботі [12].

У [13] викладено алгоритм ручного розрахунку ліній тропосферного радіозв'язку. Початковими даними такого розрахунку є тип ТРС, положення на топографічній карті плануємих позицій ТРС, пора року, кліматичний район і режим роботи станцій.

Метою статті є запропонувати алгоритм автоматизованого розрахунку надійності зв'язку ліній тропосферного радіозв'язку при відомих типах ТРС, еквівалентній протяжності кожного інтервалу ЛТРЗ і запасів рівня радіосигналу на цих інтервалах.

Виклад основного матеріалу

Основним завданням, яке доводиться вирішувати при побудові ЛТРЗ, є такий вибір її траси та місць установки ТРС, при якому забезпечуватиметься високий і стабільний в часі рівень високочастотних (ВЧ) сигналів на входах приймачів усіх станцій. При цьому надійність і якість зв'язку на ЛТРЗ повинні повністю відповідати заданим нормам щодо її якісних показників.

Вибір траси ЛТРЗ та місць установки ТРС повинен відбуватись з обов'язковим урахуванням місця, які вони мусять зайняти у системі зв'язку Повітряних Сил. А саме, на ТРС можуть покладатись різні функції – функції кінцевих ТРС, ретрансляційних ТРС або вузлових станцій ЛТРЗ.

Автоматизований вибір траси ЛТРЗ полягає в підборі на електронній карті позицій для розгортання станцій з урахуванням вимог до траси ЛТРЗ, її інтервалів і позицій ТРС:

- траса лінії повинна забезпечити її роботу з якістю зв'язку, заданою для даного типу станцій;
- загальна протяжність траси ЛТРЗ не повинна перевищувати величини, передбаченої для ТРС, що застосовуються;
- протяжність інтервалів не повинна перевищувати встановленої величини, а кути закриття антен не повинні перевищувати допустимих значень;
- для ускладнення противникові ведення радіорозвідки і створення завад конфігурація траси повинна

бути зигзагоподібною, а випромінювання у бік противника мінімальним.

Місцевість навколо позиції ТРС та на ній повинні забезпечувати:

- можливість під'їзду станцій і транспортних засобів, їх розміщення на тих скатах висот, з яких забезпечується екранування випромінювання рельєфом місцевості у напрямку противника;
- виключення впливу на якість зв'язку можливих джерел завад (антенних полів радіопередавальних пристроїв, високовольтних ліній електропередачі, електрифікованих залізниць і т. п.);
- можливість і зручність прокладки з'єднувальних ліній для передачі каналів від ТРС на ВЗ.

Надійність зв'язку при відомих типах ТРС - тип, еквівалентній протяжності кожного інтервалу ЛТРЗ – R_e і значеннях запасів рівня радіосигналу на завмирання – q на цих інтервалах розраховується шляхом використання номограми щодо визначення надійності зв'язку. Такі номограми складаються з двох наборів графіків:

- $y(R_e, tip)$ – залежності умовної (перехідної) функції у від еквівалентної протяжності інтервалу ЛТРЗ та від типу ТРС;
- $H(y, q), \%$ – залежності надійності зв'язку за завмираннями, яка розраховується для даного інтервалу ЛТРЗ, від значення перехідної функції у та від визначеного запасу рівня ВЧ сигналу q .

При цьому необхідно звернути увагу на те, що графіки $y(R_e, tip)$ для телефонного та бінарного режимів є спільними, а графіки $H(y, q)$ для цих же режимів мають різну залежність.

Для автоматизованого розрахунку надійності зв'язку були отримані функції опису цих графіків. Так для опису функції $y(R_e, tip)$ пропонується використати вираз:

$$y(R_e, tip) = \kappa_1(tip) - \kappa_2(tip) \cdot R_e - \kappa_3(tip) \times (R_e - \kappa\kappa)^2 + \kappa_4(tip) \cdot \exp(0,01 \cdot R_e) \quad (1)$$

Розраховані значення коефіцієнтів функції (1) наведені у табл. 1, а її графіки на рис. 1.

Таблиця 1
Значення коефіцієнтів функції (1) в залежності від типу ТРС

Тип ТРС	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	$\kappa\kappa$
$t_p=1$	4,6	0,00382	0,0001199	0,0246548	280
$t_p=2$	8,912	0,01813	0,0001977	0,1051454	275
$t_p=3$	6,874	0,00999	0,0001552	0,056561	280
$t_p=4$	5,114	0,00585	0,0001294	0,0384325	276

Для опису функцій $H(y, q)$ надійності зв'язку у телефонному та бінарному режимах роботи ТРС пропонується використати вираз:

$$H(y, q) = \zeta_1(q) + \zeta_2(q)y + \zeta_3(q)y^2 + \zeta_4(q)y^3. \quad (2)$$

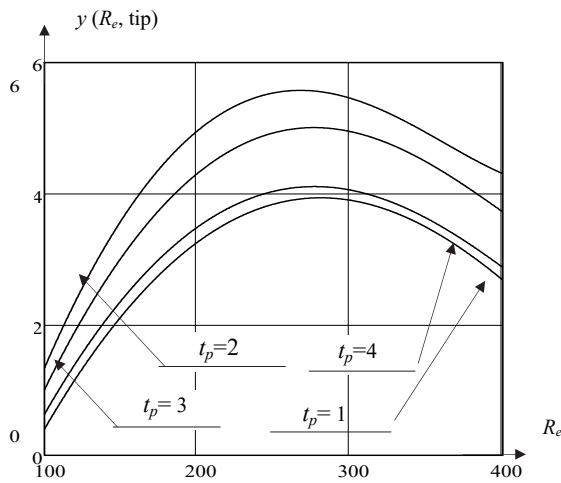


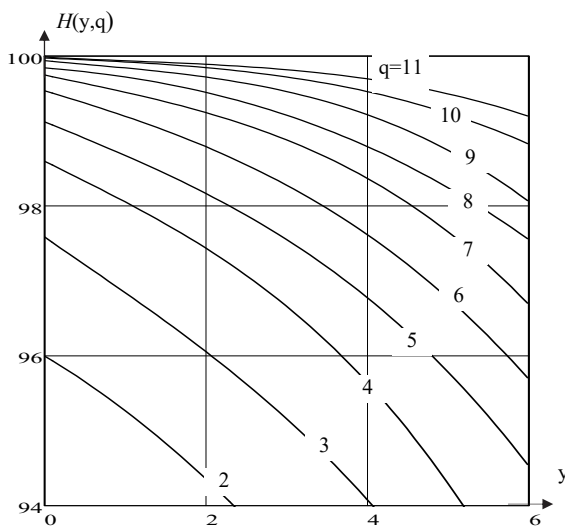
Рис. 1. Графіки переходної функції $y(R_e, tip)$

Графіки функції (2) та значення її коефіцієнтів для телефонного режиму наведені відповідно на рис. 2 та у табл. 2. Для бінарного режиму графіки функції (2) наведені на рис. 3, а значення коефіцієнтів – у табл. 3.

Запас рівня високочастотного сигналу q у розрахунковому виразі (2) має дискретний характер ($\Delta q = 1$), що вказує на те, що розрахунок надійності зв'язку на i -му інтервалі ліній тропосферного радіозв'язку $H_i(y, q)$ для визначеного запасу рівня високочастотного сигналу q необхідно виконувати за алгоритмом:

$$q_1 = \text{floor}(q), q_2 = q_1 + 1, d_1 = q - q_1, d_2 = q - q_2, \quad (3)$$

$$H_i(y, q) = H(y, q_1) \cdot d_2 + H(y, q_2) \cdot d_1,$$



де $\text{floor}(q)$ – ціла частина визначеного запасу сигналу q ;

$H_i(y, q_i)$ – значення виразу (2) для отриманого значення переходної функції (1) та для параметрів y і q_i при $i=1, 2$.

Інтервал ліній тропосферного радіозв'язку та відповідні йому позиції розгортання ТРС вважаються придатними, якщо виконується умова результатів оцінки надійності (у процентах):

$$H_i, \% \geq H_1^*, \%$$

Нормативні значення надійності зв'язку за замираннями сигналу $H_1^*, \%$, що вимагаються для ліній тропосферного радіозв'язку різних типів, наведені в табл. 4.

Якщо умова $H_i, \% \geq H_1^*, \%$ не виконується і даний інтервал планується використати як поодинокий (не у складі ЛТРЗ з декількох інтервалів), то ухвалюють рішення про необхідність зміни координат позицій розгортання ТРС на місцевості з урахуванням зручності обслуговування нової позиції і можливості підключення ТРС із цієї позиції до віддаленого ВЗ.

Після вибору нової позиції розгортання ТРС повторюється розрахунок еквівалентної протяжності R_e [11], запасу ВЧ сигналу q [12] і безпосередньо надійності зв'язку по замиранням.

Такий перехід до повторного автоматизованого розрахунку надійності зв'язку по замиранням на інтервалі виконується шляхом перевірки відповідності отриманої надійності вимогам та відображення на моніторі повідомлення користувачу про необхідність зміни координат позицій розгортання ТРС та повторного розрахунку надійності зв'язку інтервалу.

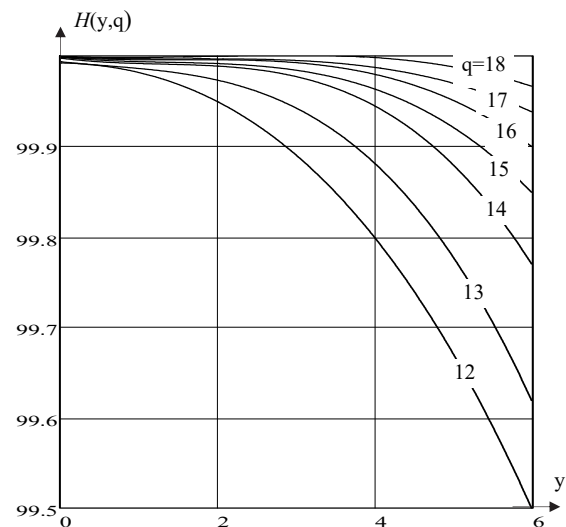


Рис. 2. Графіки функції (2) визначення надійності зв'язку для телефонного режиму

Таблиця 2

Значення коефіцієнтів функції (2) для телефонного режиму

q	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
2	96	-0,63456	-0,095342	0,0016797
3	97,59	-0,74764	0,015526	-0,0118
4	98,60	-0,5344	0,005622	-0,01402
5	99,127	-0,44042	-0,001126	-0,00878
6	99,539	-0,320445	-0,01251	-0,006753
7	99,749	-0,22672	0,006193	-0,00884
8	99,8430	-0,08323	-0,034587	-0,0024776
9	99,94	-0,09959	0,0106567	-0,0076573
10	99,9756	-0,048184	-0,000185	-0,0039166
11	99,9880	-0,05879	0,013929	-0,004334
12	99,9925	-0,001422	-0,008135	-0,0008846
13	99,9939	-0,008979	0,0035711	-0,0020803
14	99,9980	-0,011873	0,0077136	-0,0020109
15	99,9990	-0,009375	0,0056196	-0,0013694
16	99,9993	-0,00703	0,004825	-0,0010688
17	99,9996	-0,005133	0,0032917	-0,0006893
18	100	-0,0043	0,0033679	-0,000595

Таблиця 3

Значення коефіцієнтів функції (2) для бінарного режиму

q	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
6	96	-2,5	0	0
7	97,5176	-1,1111	-0,48565	0,071655
8	99,087	-1,2347	-0,17975	0,0157
9	99,5656	-0,3299	-0,332975	0,025
10	99,81	-0,18345	-0,18559	0,006658
11	99,95	-0,00358	-0,155272	0,00353094
12	99,97	-0,02399	-0,06676	-0,005786
13	99,994	-0,01979	-0,015123	-0,0963
14	99,998	0,0155667	-0,0312	-0,0023667
15	99,999	0,0051986	-0,01655728	-0,00242
16	99,9997	-0,018178	0,01757612	-0,0056636
17	99,99991	-0,008084	0,00872751	-0,0030815
18	100	-0,005305	0,0074089	-0,0023937
19	100	-0,002846	0,0040971	-0,0013455
20	100	-0,002,90	0,0029339	-0,0008939

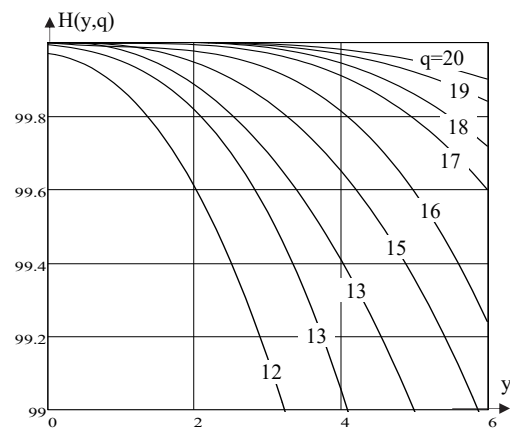
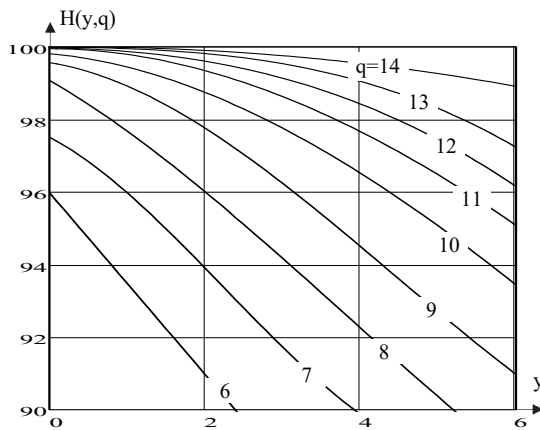


Рис. 3. Графіки функції (2) визначення надійності зв'язку для бінарного режиму

Таблиця 4

Вимоги щодо надійності зв'язку за завмираннями

Вимоги щодо надійності зв'язку	Тип ТРС		
	$t_p=1$	$t_p=2, t_p=3$	$t_p=4$
До інтервалу ЛТРЗ	99,5	98,8	99,3
До ЛТРЗ в цілому	95,0	95,0	95,0

У разі, коли планується побудова ділянки ЛТРЗ з k інтервалів (або лінії повної протяжності з $M_{инт}$ інтервалів) і на деяких з них не виконується умова $H_i, \% \geq H_I^*, \%$, і крім того, виникають утруднення у виборі інших позицій розгортання ТРС (що нерідко буває на практиці), можна застосувати метод оцінки придатності ділянки в цілому. Для того необхідно спочатку розрахувати величину надійності по завмираннях для всієї ділянки ЛТРЗ з k інтервалів (або лінії повної протяжності з $M_{инт}$ інтервалів) $H_{k\Sigma}, \%$, і потім порівняти її з потрібною по нормі величиною надійності по завмираннях для такої ділянки лінії

$H_{k\Sigma}^*, \%$. Якщо з'ясується, що виконується умова для ділянки в цілому: $H_{k\Sigma}, \% \geq H_{k\Sigma}^*, \%$, то усі інтервали ділянки вважаються придатними, хоча на деяких з них умова придатності інтервалу $H_i, \% \geq H_I^*, \%$ може не виконуватися.

Вказані величини $H_{k\Sigma}$ та $H_{k\Sigma}^*$ для ділянки з декількох інтервалів або для лінії повної протяжності з k інтервалів розраховуються за формулами:

$$H_{k\Sigma} = 100 - \sum_{i=1}^k (100 - H_i),$$

де $H_i, \%$ - величини надійності, розраховані для кожного з планованих інтервалів лінії;

$$H_{k\Sigma}^* = 100 - k(100 - H_I^*),$$

де $H_I^*, \%$ - потрібна (в середньому) надійність по завмираннях сигналу для одного інтервалу (береться з табл. 4).

Для лінії повної протяжності з M_{int} інтервалів потрібна величина $H_{\Delta\Sigma}^*$ надійність по завмираннях для усіх ЛТРЗ $H_{k\Sigma}^* = H_{\Delta\Sigma}^*$ для кожного типу тропосферних станцій також вказана у табл. 4.

Необхідно зазначити, що послідовний метод автоматизованої оцінки придатності інтервалів і лінії тропосферного радіозв'язку в цілому є більш ефективним по відношенню до так званого "ручного методу": вимагає менше часу на оцінку і забезпечує деякий запас надійності зв'язку на лінії тропосферного радіозв'язку. Тому його пропонується використовувати в удосконаленій, автоматизованій методиці розрахунку надійності зв'язку на лінії тропосферного радіозв'язку з урахуванням запасу ВЧ сигналу на завмирання шляхом програмування послідовності розрахункових виразів на мові програмування C++.

Висновки

Цією статтею завершуються дослідження питання автоматизації процесу планування зв'язку, а саме планування розгортання лінії тропосферного радіозв'язку. У статті [11] відповідно до багатоетапної процедури формалізації процесів було визначено послідовність розрахунку та запропоновано загальний алгоритм розрахунку ліній тропосферного радіозв'язку з використанням ТРС Р-410М ("Діагноз"), Р-412 ("Торф") і Р-420 ("Атлет-Д"). Він забезпечує автоматизований вибір оптимальної траси ЛТРЗ такої конфігурації при якій досягається надійність зв'язку, що не менше встановленого нормативного значення. У дослідженні [12] опрацьовано складову частину загального алгоритму – математичний опис послідовного автоматизованого розрахунку запасу ВЧ радіосигналу на інтервалі ЛТРЗ, що забезпечило розробку вбудованих підпрограм-функцій, робота яких дозволяє отримати значення запасу ВЧ сигналу на усіх інтервалах ЛТРЗ, що аналізуються, без звертання до графіків, таблиць і но-

мограм. На завершальному етапі досліджень запропоновано і апробовано математичний алгоритм розрахунку надійності зв'язку на окремих інтервалах та на усіх ЛТРЗ без звертання до графіків, таблиць і номограм.

На підставі згадуваних алгоритмів та основи цифрової карти рельєфу місцевості була розроблена штабна інформаційно-розрахункова задача, програма частина якої написана на мові програмування C++, яка забезпечує як процедурне, так і об'єктно-орієнтоване програмування.

Вона дозволяє виконувати: попередній вибір траси ЛТРЗ; вибір типів ТРС, виду зв'язку і режиму їх роботи; вибір точки стояння ТРС по цифровій карті для кожного з інтервалів лінії; розрахунок довжини, кутів закриття та взаємних азимутів ТРС на кожному з інтервалів; розрахунок запасу рівня ВЧ радіосигналу на інтервалі; визначення придатності інтервалу для забезпечення зв'язку; аналіз результатів розрахунку і прийняття рішення на зміну координат ТРС певного інтервалу або ж на перехід до розрахунку придатності наступного інтервалу і розрахунок надійності зв'язку на ЛТРЗ в цілому та її придатності для забезпечення зв'язку.

Таким чином, за рахунок використання засобів обчислювальної техніки і інформаційних технологій автоматизуються та удосконалюються процеси планування ліній тропосферного радіозв'язку по критерію показника якості – надійність зв'язку. Також виключаються з процесу планування креслення профілю місцевості на великомасштабній топографічній карті, використання для визначення параметрів надійності зв'язку таблиць, графіків і номограм, зменшується ймовірність помилок, що вносять виконавці розрахунків, та скорочуються терміни розробки плануючих та розпорядчих документів по зв'язку і підвищується їх якість.

Список літератури

1. Field Manual 6-02 Signal Support to Operations. – Washington: Headquarters Department of the Army, 2014. – 68 p.
2. The official site COMTECHSYSTEMS.COM. Troposcatter Hardware [Electronic resource]. – 2015. Режим доступу: <http://www.comtechsystems.com/products-systems/troposcatter-hardware>.
3. The official site MARINES.MIL. Lance Cpl. Cody Lemons. MWCS-28 trains in the troposphere. Available at: <https://www.cherrypoint.marines.mil/News/Article/613801/mwcs-28-trains-in-the-troposphere>.
4. Ackerman Robert K. Software Drives Future Army Communications [Electronic resource] / Robert K. Ackerman // Signal Magazine. – 2011. Available at: <https://www.afcea.org/content/software-drives-future-army-communications>.
5. Troposcatter in the Modern Military [Electronic resource]. – Available at: <http://www.comtechsystems.com/wp-content/uploads/2014/05/Troposcatter-In-The-Modern-Military.pdf>.
6. DTIC ADA211799: MANPRINT Evaluation: AN/TRC-170 Digital Troposcatter Radio System [Electronic resource]. – Available at: https://archive.org/details/DTIC_ADA211799.
7. Кукк К.И. Из истории становления отечественной военной радиорелейной и тропосферной связи / К.И. Кукк // Электросвязь: история и современность. – 2008. – № 2. – С. 2-6.
8. Серов В.В. Тропосферная связь. История и перспективы / В.В. Серов // Технологии ЭМС. – 2012. – № 2(41). – С. 55-60.
9. Поповський В.В. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології / В.В. Поповський. – Х.: СМІТ, 2010. – 482 с.
10. Проектирование универсальной системы тропосферной и радиорелейной связи / В.В. Поповский, В.А. Лошаков, А. Дриф, Т.Н. Нарытник, В.И. Слюсар // Цифрові технології. – 2015. – № 18. – С. 36-45.

11. Особливості алгоритму автоматизованого розрахунку лінії тропосферного радіозв'язку / О.П. Кулик, М.Д. Рисаков, А.Л. Ковтунов, С.М. Блашук, О.І. Воронін // Системи обробки інформації. – 2018. – № 3(154). – С. 39-45.
12. Пропозиції щодо автоматизованого розрахунку запасу радіосигналу на інтервалах лінії тропосферного радіозв'язку для визначення надійності зв'язку / М.Д. Рисаков, О.П. Кулик, В.Г. Кубрак, С.М. Блашук, О.В. Щербак // Збірник наукових праць ХНУПС. – 2019. – № 3(61). – С. 96-102.
13. Проектирование и расчет радиорелейных линий связи / Е.В. Рыжков, Г.И. Гаврилова, Е.А. Зусманов и др. / Под ред. Е.В. Рыжкова. – М.: Связь, 1975. – 264 с.

References

1. Headquarters Department of the Army (2014), *Field Manual 6-02 Signal Support to Operations*, Washington, DC, 68 p.
2. The official site COMTECHSYSTEMS.COM (2015), *Troposcatter Hardware*, available at: www.comtechsystems.com/products-systems/troposcatter-hardware.
3. The official site MARINES.MIL (2015), *Lance Cpl. Cody Lemons. MWCS-28 trains in the troposphere*, available at: www.cherrypoint.marines.mil/News/Article/613801/mwcs-28-trains-in-the-troposphere.
4. Robert, K. Ackerman (2011), Software Drives Future Army Communications, *Signal Magazine*, available at: www.afcea.org/content/software-drives-future-army-communications.
5. *Troposcatter in the Modern Military*, available at: www.comtechsystems.com/wp-content/uploads/2014/05/Troposcatter-In-The-Modern-Military.pdf.
6. DTIC ADA211799, *MANPRINT Evaluation, AN/TRC-170 Digital Troposcatter Radio System*, available at: www.archive.org/details/DTIC_ADA211799
7. Kukkk, K.I. (2008), “Iz istorii stanovleniya otechestvennoy voyennoy radioreleynoy i troposfernoy svyazi” [From the history of the formation of the domestic military radio-relay and tropospheric communications (part 2)], *Telecommunications: History and Modernity*, No. 2, pp. 2-6.
8. Serov, V.V. (2012), “Troposfernaya svyaz'. Istoriya i perspektivy” [Tropospheric communication. History and Prospects], *EMC Technology*, No. 2(41), pp. 55-60.
9. Popovskiy, V.V. (2010), “Baghatokanalnyj elektrosv'jazok ta telekomunikacijni tekhnologhiji” [Multichannel telecommunication and telecommunication technologies], SMIT, Kharkiv, 482 p.
10. Popovskiy, V.V., Loshakov, V.A., Drif, A., Narytnik, T.N. and Slyusar, V.I., (2015), “Proyektirovaniye universal'noy sistemy troposfernoy i radioreleynoy svyazi” [Design of a universal tropospheric and radio relay communication system], *Digital Technology*, No. 18, pp. 36-45.
11. Kulik, O.P., Rysakov, M.D., Kovtunov, A.L., Blashuk, S.M. and Voronin, O.I. (2018), “Osoblyvosti alghorytmu avtomatyzovanogho rozrakhunku liniyi troposfernogho radiozv'jazku” [Characteristics of the algorithm of the automated calculation of the troposphere radio link], *Information Processing Systems*, No. 3(154), pp. 39-45.
12. Rysakov, M.D., Kulyk, O.P., Kubrak, V.Gh., Blashuk, S.M. and Shcherbak, O.V. (2019), “Propozyciji shhodo avtomatyzovanogho rozrakhunku zapasu radiosyghnalu na intervalakh liniyi troposfernogho radiozv'jazku dlja vyznachennja nadijnosti zv'jazku” [Proposals for the automated calculation of the reserve of radio signal at intervals of a tropospheric radio link for determining the reliability of communication], *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 3(61), pp. 96-102.
13. Ryzhkov, Ye.V., Gavrilova, G.I. and Zusmanov, Ye.A. (1975), “Proyektirovaniye i raschet radioreleynykh liniy svyazi” [Design and calculation of radio relay communication lines], Communication, Moscow, 264 p.

Надійшла до редакції 01.10.2019

Схвалена до друку 19.11.2019

Відомості про авторів:

Кулик Олександр Петрович

кандидат військових наук
провідний науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0001-7299-4794>

Рисаков Микола Данилович

кандидат технічних наук доцент
старший науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-1579-7705>

Костенко Ігор Леонідович

кандидат військових наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-4595-7727>

Information about the authors:

Oleksandr Kulik

Candidate of Military Sciences
Lead Research
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0001-7299-4794>

Mykola Rysakov

Candidate of Technical Sciences Associate Professor
Senior Research
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0003-1579-7705>

Igor Kostenko

Candidate of Military Sciences
Senior Research
Chief of Scientific Research
Department of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4595-7727>

Щербак Олег Володимирович
науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-5289-8962>

Olegh Shcherbak
Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5289-8962>

Дудко Марина Валеріївна
науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-2010-1779>

Maryna Dudko
Research Associate
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2010-1779>

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО АВТОМАТИЗИРОВАННОМУ РАСЧЕТУ НАДЕЖНОСТИ СВЯЗИ НА ЛИНИИ ТРОПОСФЕРНОЙ РАДИОСВЯЗИ

А.П. Кулик, Н.Д. Рысаков, И.Л. Костенко, О.В. Щербак, М.В. Дудко

В работе для заранее рассчитанных суммарных углов закрытия горизонта антен, протяженностей интервалов и запаса уровня радиосигнала на интервалах и на линии тропосферной радиосвязи в целом предлагается математический алгоритм расчета надежности связи на отдельно взятых интервалах ЛТПС и на всей линии связи. Алгоритм расчета предусматривает, что значения эквивалентной протяженности каждого интервала также уже рассчитаны. Алгоритм имеет вид последовательно выполняемых расчетных выражений с соответствующими коэффициентами. Значения этих коэффициентов были получены путем математического описания графиков и номограмм зависимостей надежности связи на ЛТПС от соответствующих параметров для тропосферных станций, находящихся на вооружении войск связи и информационных систем Воздушных Сил ВС Украины.

Ключевые слова: алгоритм, линия тропосферной радиосвязи, тропосферная станция, надежность связи, запас уровня радиосигнала.

PROPOSALS FOR AUTOMATED CALCULATION OF COMMUNICATION RELIABILITY ON THE TROPOSPHERIC RADIO COMMUNICATION LINE

O. Kulik, M. Rysakov, I. Kostenko, O. Shcherbak, M. Dudko

The construction of a tropospheric radio communication line requires a preliminary selection of positions for the placement of tropospheric stations, calculation of the reliability of communication at its intervals and subsequently on the entire line. The features of the construction of tropospheric radio communication lines to the lines of direct visibility are related with the features of the distant tropospheric propagation of ultra-short waves, which determine the features of selecting the tropospheric radio communication line and require calculating the margin of the radio signal by fading at tropospheric radio communication line intervals, and the reliability of communication at all its intervals to determine the suitability of each of them for communication and, at the end of the determination of the suitability of the entire tropospheric radio link for communication. It is required that the types of tropospheric stations be preliminarily selected for line deployment, the azimuths of the mutual placement of tropospheric stations, the total angle of closure of the antenna stations of the intervals and the lengths of these intervals be calculated. In most cases, such calculations are performed "manually". It is obvious that the sequential calculation of all parameters necessary to determine the reliability of communication at each of the intervals and tropospheric radio communication in general, takes a lot of time. Especially time-consuming is the step of calculating the closing angles of the tropospheric stations antennas and the elevation for each of the intervals of the tropospheric radio communication line by constructing a terrain profile drawing on a large-scale topographic map. In addition to this use, in the following steps to determine the reliability parameters of the connection of tables, graphs and nomograms, lead to errors that are made by the calculation executors. To achieve a significant reduction in time for planning the tropospheric radio link and to improve the accuracy of calculations is possible by involving computer technology and the development of appropriate special mathematical and software. The mathematical algorithm for the automated calculation of communication reliability at tropospheric radio communication line intervals and on the entire line is proposed. The calculation algorithm provides that the values of the equivalent length of each interval have already been calculated. The algorithm is given as a sequence of calculated expressions with corresponding coefficients. The values of these coefficients were obtained for tropospheric stations, which are in service with the communication forces and information systems of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine by mathematical description of graphs and nomograms of the mutual dependencies of communication reliability on the corresponding parameters.

Keywords: algorithm, tropospheric radio communication line, tropospheric station, communication reliability, radio signal reserve.