

УДК.621.396

## ПРОСТОРОВО-РОЗНЕСЕНА ПЕРЕДАЧА СИГНАЛІВ У ЦИФРОВИХ ТРОПОСФЕРНИХ СТАНЦІЯХ

*Почерняєв В.М., Сивкова Н.М., <sup>2</sup>Повхліб В.С.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[vpochernyaev@gmail.com](mailto:vpochernyaev@gmail.com), [natsivonat@gmail.com](mailto:natsivonat@gmail.com)*

*<sup>2</sup>Київський коледж зв'язку  
01030, Україна, м Київ, вул. Леонтовича, 11.  
[povviktoriya@gmail.com](mailto:povviktoriya@gmail.com)*

## ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЕННАЯ ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ В ЦИФРОВЫХ ТРОПОСФЕРНЫХ СТАНЦИЯХ

*Почерняев В.Н., Сивкова Н.М., <sup>2</sup>Повхлеб В.С.*

*<sup>1</sup>Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[vpochernyaev@gmail.com](mailto:vpochernyaev@gmail.com), [natsivonat@gmail.com](mailto:natsivonat@gmail.com)*

*Киевский колледж связи  
01030, Украина, г. Киев, ул. Леонтовича, 11.  
[povviktoriya@gmail.com](mailto:povviktoriya@gmail.com)*

## SPATIAL DIVERSITY SIGNAL TRANSMISSION IN DIGITAL TROPOSCATTER STATIONS

*Pochernyaev V.N., Syvkova N.M., <sup>2</sup>Povkhlil V.S.*

*O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[vpochernyaev@gmail.com](mailto:vpochernyaev@gmail.com), [natsivonat@gmail.com](mailto:natsivonat@gmail.com)*

*Kiev college of communication  
11 Leontovich St., Kiev, 01030, Ukraine  
[povviktoriya@gmail.com](mailto:povviktoriya@gmail.com)*

**Анотація.** У статті досліджується можливість збільшення нормованої пропускної здатності цифрових тропосферних станцій на шляху застосування просторово-рознесеної передачі сигналів. Показана структурна схема передавального тракту цифрової тропосферної станції з просторово-рознесеною передачею сигналів. Проаналізовано способи розподілу на прийомі сигналів, що діють на вході пристрою просторово-часового кодування передавального тракту НВЧ цифрової тропосферної станції. Детально розглянуті три способи складання сигналів: лінійне складання; автовибір; оптимальне (квазіоптимальне) складання. Проаналізовані різні варіанти складання: до демодулятора і після демодулятора. Проведено розрахунок нормованої пропускної здатності каналу від відношення сигнал/шум для випадку двох передавальних антен з відомою і невідомою канальними матрицями. Встановлено, що при двох передавальних антенах і невідомій канальній матриці нормована пропускна здатність не відрізняється від випадку використання однієї передавальної антени. Проаналізовано вплив кросполяризаційної розв'язки на нормовану пропускну здатність каналу, коли одна передавальна антена випромінює сигнали горизонтальної поляризації, а друга передавальна антена – сигнали вертикальної поляризації. Отримані значення ймовірності помилки при просторово-рознесений

передачі сигналів на дві передавальні антени для двох законів розподілу випадкової величини – Релея і Райса. При райсовському законі розподілу випадкової величини, ймовірність помилки виражається через модифіковану функцію Бесселя нульового порядку. Розрахункові дані наведені в таблиці. Розрахунок проведено на двох діапазонах частот, дозволених для застосування тропосферних засобів зв'язку і для каналу без завмирання, і для каналу з міжсимвольною інтерференцією.

**Ключові слова:** просторово-рознесена передача сигналів, цифрова тропосферна станція, нормована пропускна здатність, відношення сигнал/шум, ймовірність помилки.

**Аннотація.** В статье исследуется возможность увеличения нормированной пропускной способности цифровых тропосферных станций на пути применения пространственно-разнесенной передачи сигналов. Показана структурная схема передающего тракта цифровой тропосферной станции с пространственно-разнесенной передачей сигналов. Проанализированы способы разделения на приеме сигналов, действующих на входе устройства пространственно-временного кодирования передающего тракта СВЧ цифровой тропосферной станции. Подробно рассмотрены три способа сложения сигналов: линейное сложение; автовыбор; оптимальное (квазиоптимальное) сложение. Проанализированы разные варианты сложения: до демодулятора и после демодулятора. Проведен расчет нормированной пропускной способности канала от отношения сигнал/шум для случая двух передающих антенн с известной и неизвестной канальными матрицами. Установлено, что при двух передающих антеннах и неизвестной канальной матрицей нормированная пропускная способность не отличается от случая использования одной передающей антенны. Проанализировано влияние кроссполаризационной развязки на нормированную пропускную способность канала, когда одна передающая антенна излучает сигналы горизонтальной поляризации, а вторая передающая антенна - сигналы вертикальной поляризации. Получены значения вероятности ошибки при пространственно-разнесенной передаче сигналов на две передающие антенны для двух законов распределения случайной величины – Релея и Райса. При райсовском законе распределения случайной величины вероятность ошибки выражается через модифицированную функцию Бесселя нулевого порядка. Расчетные данные приведены в таблице. Расчет проведен в двух диапазонах частот, разрешенных для применения тропосферных средств связи и для канала без замирання, и для канала с межсимвольной интерференцией.

**Ключевые слова:** пространственно-разнесенная передача сигналов, цифровая тропосферная станция, нормированная пропускная способность, отношение сигнал/шум, вероятность ошибки.

**Abstract.** The article examines the possibility of increasing the normalized throughput of digital troposcatter stations on the way of using space-separated signal transmission. Shown is a block diagram of the transmitting path of a digital troposcatter station with space-separated signal transmission. Methods of separation at the reception of signals acting at the input of the space-time coding device of the transmission path of the microwave digital troposcatter station are analyzed. Three methods of signal addition are considered in detail: linear addition; auto selection; optimal (quasi-optimal) addition. Various variants of addition are analyzed: before the demodulator and after the demodulator. The calculation of the normalized channel capacity as a function of the signal-to-noise ratio for the case of two transmitting antennas with known and unknown channel matrices is carried out. It was found that with two transmitting antennas and an unknown channel matrix, the normalized bandwidth does not differ from the case of using one transmitting antenna. The effect of cross-polarization isolation on the normalized channel capacity is analyzed, when one transmitting antenna emits signals of horizontal polarization, and the second transmitting antenna emits signals of vertical polarization. The values of the error probability are obtained for spatially-separated signal transmission to two transmitting antennas for two laws of distribution of a random variable - Rayleigh and Rice. The Rice distribution law of a random variable, the error probability is expressed through the modified zero-order Bessel function. The calculated data are shown in the table. The calculation was carried out in two frequency ranges allowed for the use of troposcatter communication facilities and for a channel without fading and for a channel with intersymbol interference.

**Key words:** space-separated signal transmission, digital troposcatter station, normalized throughput, signal to noise ratio, error probability.

Відомо, що в цифрових тропосферних системах зв'язку застосовується просторово-рознесений прийом на дві антени [1]. Це ефективний спосіб боротьби з багатопроменевістю і швидкими завмираннями сигналу. Збільшити пропускну здатність тропосферної лінії зв'язку (ТЛЗ) можна на шляху застосування просторово-рознесеної передачі сигналів, наприклад, на

дві антени. При цьому на ТЛЗ зберігається режим роботи, коли одна або кілька цифрових тропосферних станцій можуть працювати в режимі ретрансляції і приймати сигнали від кореспондента на одну антену.

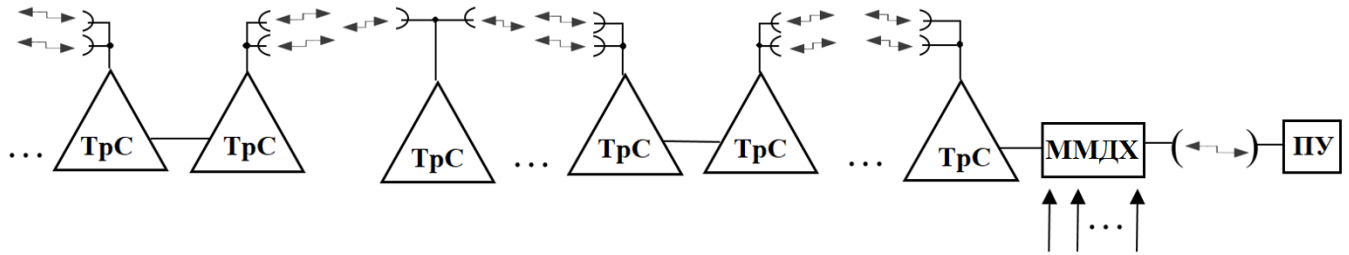


Рисунок 1 – Фрагмент організації зв'язку такої ТЛЗ

На рис. 1 також показано вбудовану в цифрову тропосферну станцію радіостанцію міліметрового діапазону хвиль, яка здатна передавати на пункт керування (ПК) досить великий обсяг інформації, зібравши її від різних джерел. В залежності від вимог, лінія зв'язку на ПК може бути реалізована в терагерцовому діапазоні хвиль.

Відмінною рисою цифрових тропосферних станцій з просторово-рознесеною передачею від відомих тропосферних станцій, наприклад, описаної в [2], або тропосферної компоненти комбінованої мобільної тропосферно-радіорелейної станції [3] є наявність пристрою просторово-часового кодування (ППЧасК) на передачі. Прийом просторово-часових сигналів викладено, наприклад, в роботі [4].

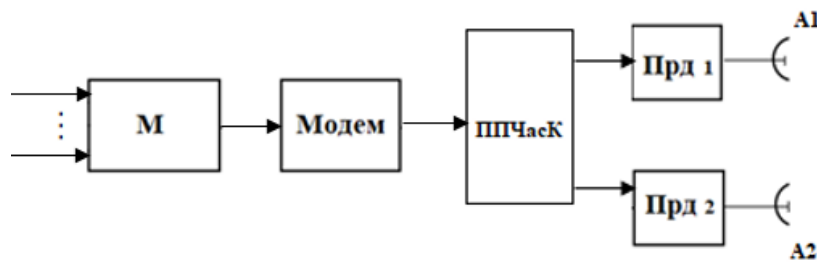


Рисунок 2 – Структурна схема передавального тракту такої цифрової тропосферної станції

Схема включає: А1, А2 – антени; Прд1, Прд2 – передавачі НВЧ; модем, що містить модулятор і кодер; М – мультиплексор.

**Мета статті** – показати можливість збільшення нормованої пропускну здатності цифрової тропосферної станції на шляху застосування просторово-рознесеної передачі сигналів.

Як правило, на сучасних цифрових тропосферних станціях використовується модуляція QPSK. На вході приймальної антени маємо:

$$\begin{aligned} P_i(t) &= A[\rho_{11}S_i(t) + \rho_{21}(t)S_{i+1}(t)] + n_1(t), \\ P_{i+1}(t) &= A[\rho_{11}\hat{S}_{i+1}(t) - \rho_{21}\hat{S}_i(t)] + n_2(t), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда сигналів;  $n_1(t)$ ,  $n_2(t)$  – шуми в першому і другому антенних каналах;  $S_i(t)$ ,  $S_{i-1}$ ,  $\hat{S}_i$ ,  $\hat{S}_{i+1}$  – сигнали на вході ППЧасК (зі знаком " ^ " – комплексно-зв'язані);  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{21}$  – вагові коефіцієнти. На передачі здійснюється просторово-часове кодування сигналів. Сигнали  $S_i(t)$  і  $S_{i+1}(t)$  у формулі (1) діють в інтервалах часу  $iT$  та  $(i + 1)T$ , а в ППЧасК ці сигнали перетворюються в комплексно-зв'язані.

На приймальній стороні використовуємо схему просторово-рознесеного прийому [1,2]. Вагові коефіцієнти  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{21}$  мають властивість ортогональності  $\rho_0^2 = (|\rho_{11}|^2 + |\rho_{21}|^2)$ , тобто існує взаємна ортогональність переданих сигналів комплексними інформаційними символами. На прийомі здійснюється повне розділення сигналів  $S_i(t)$  і  $S_{i+1}(t)$ . Складання сигналів на прийомі може здійснюватися трьома способами: 1) лінійне складання; 2) автовибір; 3) оптимальне (квазіоптимальне) складання.

На ТЛЗ найбільш широко використовуються цифрові тропосферні станції з двома антенами на передачу і двома антенами на прийом. Рознесення на прийомі забезпечує додатковий вигравш 3 дБ. Збільшення числа антен на прийомі призводить до додаткового збільшення середнього відношення сигнал/шум після оптимального (квазіоптимального) складання. При рознесенні сигналів на передачі накладається умова постійності потужності випромінюваного сигналу. В даному випадку середнє відношення сигнал/шум не змінюється і додаткового енергетичного вигравшу немає.

При складанні сигналів на прийомі розрізняють так само різні варіанти: складання до демодулятора і складання після демодулятора (рис.3).

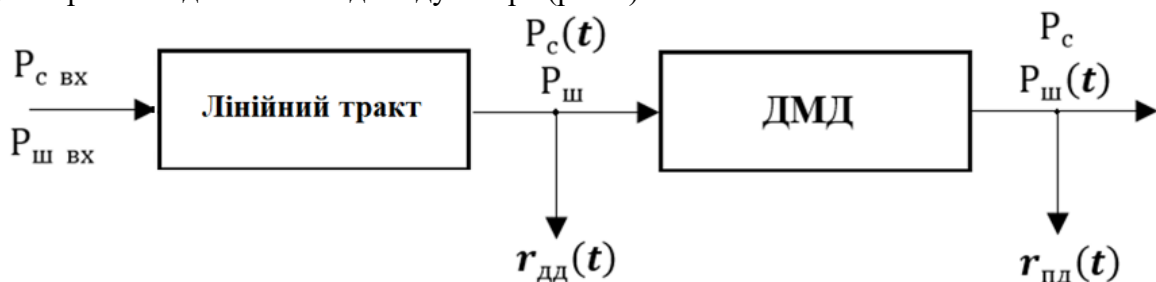


Рисунок 3 – Складання сигналів до демодулятора і після демодулятора

До демодулятора складання здійснюється за проміжною частотою (ПЧ), після демодулятора - за груповим сигналом (низькою частотою). До демодулятора величина потужності шуму  $P_{ш}$  постійна в часі, а змінюється відповідно до завмирання потужність сигналу  $P_c(t)$ . На виході демодулятора величина потужності сигналу  $P_c$  постійна, а змінюється потужність шуму  $P_{ш}(t)$ . Схема на рис. 3 відповідає кожній гілці рознесеного прийому, тому при швидких завмираннях сигналу на виході лінійного тракту до демодулятора і на виході демодулятора будуть змінюватися співвідношення сигнал/шум:

$$r_{дд}(t) = P_c(t)/P_{ш}, \quad (2)$$

$$r_{пд}(t) = P_c/P_{ш}(t). \quad (3)$$

В формулі (2) величина  $r_{дд}(t)$  змінюється при зміні потужності  $P_c(t)$ , а у формулі (3) – величина  $r_{пд}(t)$  змінюється при зміні потужності  $P_{ш}(t)$ . Ця різниця і визначає спосіб технічної реалізації системи складання – до демодулятора або після демодулятора.

Однак незалежно від того, де проводитиметься складання суміші сигналу з шумом, наприклад, у  $k$ -гілці співвідношення сигнал/шум  $r_k(t)$  пропускається через суматор з ваговим коефіцієнтом  $a_k(t)$  на його вихід, де формується сумарний сигнал/шум  $r_{\Sigma}(t)$ . Керуючі елементи суматора в кожній гілці змінюють за певним алгоритмом вагові коефіцієнти  $a_1(t), \dots, a_k(t)$ , чим досягається певний ефект від складання сигналів.

При лінійному складанні вагові коефіцієнти вибираються рівними,  $a_k = \text{const}$ . У цьому випадку маємо:

$$r_{\Sigma}(t) \leq \sum_{k=1} r_k(t).$$

Лінійне складання виявляється тим більш ефективним, ніж менш відносна різниця між величинами  $r_k(t)$  в гілках, коли завмирання неглибокі.

При автовиборі в кожен момент часу відбувається порівняння відношення сигнал/шум  $r_k(t)$  всіх гілок і вибирається та, в якій в даний момент часу  $r_k(t)$  найбільше, порівняно з іншими гілками. Керуючі сигнали відключають ці гілки від виходу суматора і вагові коефіцієнти стрибком приймають нульові значення:

$$a_k = \begin{cases} 1, \text{ при } k = j \text{ (} r_j > r_k \text{),} \\ 0, \text{ при } k \neq j . \end{cases}$$

У цьому випадку маємо:

$$r_{\Sigma}(t) = r_j(t) \leq \sum_{k=1} r_k(t).$$

Отже, автовибір ефективний за наявності істотних за величиною некорельованих завмирань у гілках.

При оптимальному (квазіоптимальному) складанні на вагові коефіцієнти безперервно впливають керуючі сигнали. Максимальний ефект складання досягається за умови:

$$r_{\Sigma}(t) = \sum_{k=1} r_k(t).$$

В цьому випадку, вагові коефіцієнти змінюються відповідно до правила:

$$a_k(t) \sim \sqrt{r_k(t)}.$$

В роботі [1] показано виграші залежності від застосованого способу складання сигналів. Використовуючи результати цієї роботи отримаємо, що енергетичний виграш при чотирикратному складанні (дві антени на прийомі, кожна приймає сигнали горизонтальної та вертикальної поляризації) складають різними способами: автовибір – 3 дБ; лінійне складання – 5,2 дБ; оптимальне складання – 6 дБ.

Наявність двох передавальних антен з некорельованим випромінюванням сигналів дозволяє збільшити пропускну здатність ТЛЗ. Проведемо розрахунок нормованої пропускну здатності каналів. Під нормованою пропускну здатністю будемо розуміти середню спектральну ефективність каналу, оскільки тропосферний канал – суть канал із завмираннями. Пропускна здатність ТЛЗ, на якій цифрові тропосферні станції мають по дві передавальні антени, а матриця каналу невідома на передавальній стороні, виражається наступним чином:

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{c}{\Psi} \right). \quad (4)$$

Вираз (4) збігається з формулою для пропускну здатності лінії зв'язку з однієї передавальної антени.

Нормована пропускна здатність ТЛЗ з цифровими тропосферними станціями, що мають на передачу дві антени і відомою матрицею каналу на передавальній стороні записується в такий спосіб:

$$C = \log_2 \left( 1 + \frac{c}{\Psi} \sum_{i=1}^2 |K_i|^2 \right), \quad (5)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт передачі каналу.

При використанні в цифровій тропосферній станції системи автоматичного регулювання потужності передавача НВЧ просторово-рознесена передача отримує додатковий виграш в пропускну здатності за рахунок використання на передавальній стороні інформації про статистичні властивості каналу зв'язку (відома канална матриця).

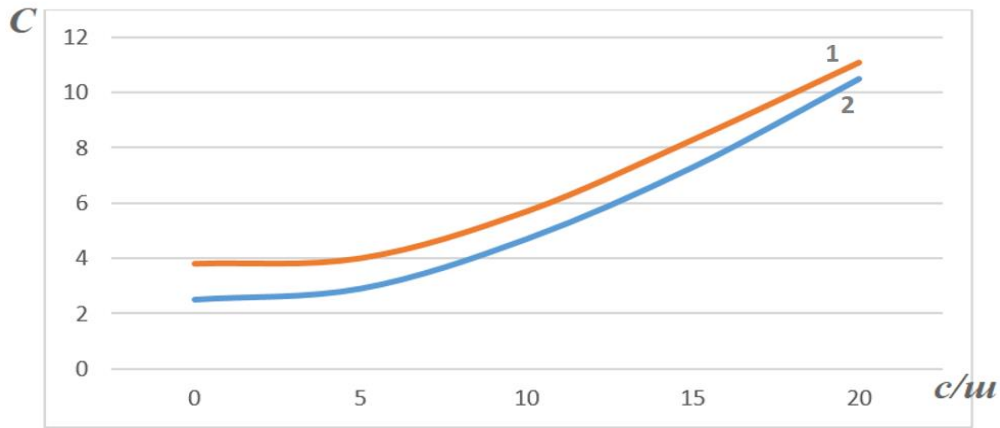


Рисунок 4 – Залежність нормованої пропускної здатності каналу від відношення сигнал/шум

На рис. 4 показана залежність нормованої пропускної здатності каналу від відношення сигнал/шум: крива 1 – для каналу з відомою каналною матрицею; крива 2 – для каналу з невідомою каналною матрицею (дві передавальні антени, одна приймальна антена).

Коли матриця каналу відома, то нормована пропускна здатність значно краще, ніж при невідомій матриці каналу (формула 5). Більш того, нормована пропускна здатність при двох передавальних антенах і невідомій матриці каналу не відрізняється від пропускної здатності з використанням однієї передавальної антени.

На ТЛЗ використовуються сигнали і горизонтальної, і вертикальної поляризації. Так, в цифровій тропосферній станції з двома передавальними антенами одна антена випромінює сигнали горизонтальної поляризації, інша антена – вертикальної поляризації. Як правило, певна частина сигналу накладається на сигнал з іншою поляризацією. Тому повинна існувати кросполяризаційна розв'язка, яка характеризується параметром  $\chi$  ( $0 \leq \chi \leq 1$ ). При  $\chi = 0$  має місце повна кросполяризаційна розв'язка (сигнали з ортогональними поляризаціями не впливають один на одного). При  $\chi = 1$  має місце повна відсутність кросполяризаційної розв'язки (вплив сигналів максимальний один на одиний).

Пропускна здатність каналу з двома передавальними антенами може бути записана наступним чином:

$$C_{x=0} = 2 \log_2 \left( 1 + \frac{c}{\text{ш}} \right), \quad (6)$$

$$C_{x=1} = \log_2 \left( 1 + 2 \frac{c}{\text{ш}} \right).$$

Якщо відношення  $c/\text{ш} \ll 1$  у формулах (6), та скориставшись наближеною рівністю  $\log_2(1+x) \approx x \log_2 e$ , маємо:

$$C_{x=0} \approx C_{x=1} \approx 2 \frac{c}{\text{ш}} \log_2 e. \quad (7)$$

З виразу (7) видно, що кросполяризаційна розв'язка не впливає на пропускну здатність каналу з двома передавальними антенами.

При відношенні сигнал/шум  $\gg 1$  у формулах (6), маємо:

$$C_{x=0} = 2 \log_2 \left( \frac{c}{\text{ш}} \right), \quad (8)$$

$$C_{x=1} = \log_2 \left( 2 \frac{c}{\text{ш}} \right).$$

З виразу (8) видно, що висока кросполяризаційна розв'язка сприяє більш високій пропускній здатності каналу з двома передавальними антенами.

При просторово-рознесеній передачі для випадку двох передавачів рівень сигналу  $h_0^2$  на вході демодулятора можна надати у вигляді:

$$h_0^2 = |h_1|^2 + |h_2|^2,$$

де  $|h_1|, |h_2|$  – модулі канальних коефіцієнтів.

Відношення сигнал/шум на вході демодулятора має вигляд:

$$\frac{c}{ш} = \frac{A^2 T h_0^2}{2 P_{ш \text{ дмд}}},$$

де  $A$  – амплітуда сигналу;  $T$  – довжина сигналу;  $P_{ш \text{ дмд}}$  – потужність шуму на вході демодулятора. Як показано в [5] ймовірність помилкового прийому за відсутності завмирань наступна:

$$P_{\text{ош}} = 4Q \sqrt{\frac{3R_f c/ш}{2R_f - 1}},$$

$$Q = \frac{1}{25} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt,$$

де  $R_f$  – питома швидкість передавання інформації.

Величину  $Q$  можна надати наступним чином [6]:

$$Q = \frac{1}{\pi} \int_x^\infty \frac{e^{-\frac{x^2}{2}} (1+t^2)}{1+t^2} dt.$$

Отримаємо величину  $P_{\text{пом}}$  для двох випадків: при розподілу випадкової величини за законом Релея та за законом Райса.

Релеєвський закон розподілу випадкової величини:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Якщо завмирання сигналу на кожному шляху поширення між передавальними і приймальною антенами, які визначаються коефіцієнтами  $|h_1|$  і  $|h_2|$  є незалежними величинами, розподіленими за законом Релея, то ймовірність помилки наступна:

$$P_{\text{пом}} = \frac{4e^{V/2(1+V/4)} Q \sqrt{4V}}{(1+V/4)^2},$$

$$V = \frac{3R_f(c/ш)}{2R_f - 1}.$$

Райсовський закон розподілу випадкової величини:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2+a^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{ax}{\sigma^2}\right).$$

Для двох шляхів поширення сигналу, завмирання за якими є незалежними величинами розподіленими за законом Райса, ймовірність помилки має вигляд:

$$P_{\text{пом}} = Q_{(a,b)} - I_0(a) e^{-\frac{1}{2}(a^2+b^2)} + \frac{1}{8} e^{-\frac{1}{2}(a^2+b^2)} [I_0(a) + I_0(ab) \left(\frac{a^2+b^2}{ab}\right)],$$

$$Q_{(a,b)} = \int_a^b e^{-\frac{1}{2}(a^2+b^2)} I_0(ax) dx,$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\bar{X}}{\sqrt{m_x}} - \frac{\bar{Y}}{\sqrt{m_y}} \right), \quad b = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{\bar{X}}{\sqrt{m_x}} + \frac{\bar{Y}}{\sqrt{m_y}} \right),$$

де  $\bar{X}, \bar{Y}$  – гауссові випадкові величини, які визначаються на виходах узгоджених фільтрів;  $m_x, m_y$  – математичні очікування;  $\sigma$  – дисперсія;  $I_0(a)$  – модифікована функція Бесселя нульового порядку.

Надано значення для нормування пропускної здатності цифрових тропосферних станцій, що працюють у діапазоні 600 МГц (Ст1) і у діапазоні 5 ГГц (Ст2) в умовах без завмирань і в умовах багатопроменевості за схемою з одним передавачем і за схемою двох передавачів. Для цих випадків вважаємо, що рівень шуму на прийомі становить  $10^{-13}$  Вт і ймовірність помилкового прийому  $10^{-6}$  (кліматичні, метеорологічні, географічні поправки не враховуються.)

Таблиця 1 – Нормовані пропускні здатності

Тип станції	Ст1				Ст2			
	1 передавач		2 передавача		1 передавач		2 передавача	
Умова	Без завмирань	Міжсимвольна інтерференція	Без завмирань	Міжсимвольна інтерференція	Без завмирань	Міжсимвольна інтерференція	Без завмирань	Міжсимвольна інтерференція
Мбіт/с	12,3	11,9	12,4	12,1	11,8	11,3	13,9	13,7

Аналіз таблиці показує, що в більш низькому частотному діапазоні схема з двома передавачами має більш низьку ефективність, ніж для більш високих частотних діапазонів і її можна порівняти з впливом на формування пропускної здатності зі схемою з одним передавачем. Це перш за все пояснюється тим, що помітно впливають дифракційні явища і для просторової селекції потрібні антенні системи значних геометричних розмірів.

На закінчення відзначимо, що дані табл. 1 не враховують конкретну реалізацію модема і кодека. Дані табл. 1 також відносяться до тропосферної компоненти МЦТРРС та їх можна застосовувати для багатопозиційних радіолокаційних систем, які так само вважаються комбінованими.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гусятинский И.А. Дальняя тропосферная радиосвязь / И.А. Гусятинский, А.С. Немировский, А.В. Соколов, В.Н. Троицкий. – М.: Связь, 1968. – 248 с.
2. Почерняев В.Н. Тропосферная связь: общая характеристика, особенности и принципы построения аппаратуры / В.Н. Почерняев, С.Е. Захаренко // Звязок. – 2000. – № 3. – С. 21-25.
3. Почерняев В.Н. Мобильная цифровая станция СВЧ диапазона двойного назначения / В.Н. Почерняев, В.С. Повхлеб // Наукові праці ОНАЗ ім.О.С.Попова. – 2014. – № 2. – С. 76-82.
4. Кремер И.Я. Пространственно-временная обработка сигналов / И.Я. Кремер. – М.: Радио и связь, 1984. – 223 с.
5. Прокис Дж. Цифровая связь / Дж. Прокис. – М.: Горячая линия–Телеком, 2000. – 798 с.
6. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Наука, 1963. – 1100 с.

REFERENCES:

1. Gusyatsinsky I.A. Far tropospheric radio communication / I.A. Husyatynskyy, A.S. Nemyrovskyy, A.V. Sokolov, V.N. Troitsk, M.: Communication, 1968, 248 p.
2. Pochernyaev V.N. Tropospheric communication: general characteristics, features and principles of construction of equipment / V.N. Pochernyaev, S.E. Zakharenko // Communication № 3 (2000): 21-25.
3. Pochernyaev V.N. Mobile digital microwave station of dual-purpose range / V.N. Pochernyaev V.S. Povkhele // Scientific works of ONAS named after OS Popov, № 2 (2014): 76-82.
4. Kremer I.Ya. Spatial-temporal signal processing / I.Ya. Kremer. M.: Radio and communication, 1984. 223 p.
5. Prokis J. Digital communication / J. Prokis, M.: Hotline – Telecom, 2000. – 798 p.
6. Gradstein I.S. Tables of integrals, sums, series and products / I.S. Gradstein, I.M. Saffron. M.: Science, 1963. 1100 p.

DOI10.33243/2518-7139-2020-1-2-92-99