

УДК 621.396

DOI: 10.31673/2412-9070.2019.054043

О. Л. ТУРОВСЬКИЙ, канд. техн. наук, доцент,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Обґрунтування методу підвищення завадозахищеності високошвидкісних атмосферних цифрових волоконно-оптичних систем передавання шляхом розширення параметра сигналу «БАЗА»

Проведено аналіз взаємозв'язку характеристик завадозахищеності спеціальних радіоканалів передавання інформації з параметром сигналу «база». Розкрито доцільність наведення зазначеного параметра для випадку атмосферних оптичних ліній зв'язку з дублюванням по радіоканалу до більш загального вигляду завдяки введенню «польової» складової. Запропоновано за таку складову брати коефіцієнт підсилення передавальної антени. Подано розрахунок конкретних значень вказаного коефіцієнта для оптичної лінії зв'язку.

Ключові слова: завадозахищеність; прихованість; база сигналу; атмосферна оптична лінія зв'язку; коефіцієнт підсилення передавальної антени.

Вступ

З початком використання волоконно-оптичних систем передавання в місцевих мережах доступу в низці випадків з'ясувалося, що вони малооперативні з погляду прокладання ліній передавання і не завжди кращі, а також можуть призвести до значних фінансових затрат, особливо у разі прокладання тимчасових ліній [1].

Великий інформаційний мегаполіс сьогодні — це комплексна інфраструктура, що складається з державних служб, корпоративних і приватних користувачів, операторів зв'язку та інших схожих систем, які перебувають у постійному обміні інформацією.

Більшість із них використовують радіочастотний діапазон, попит і ціна на який з кожним роком тільки збільшуються. Розростаються міста, забудовуються нові райони, і сучасні вулиці тепер все частіше являють собою складні комунікаційні споруди.

Аби в місті вжити будь-яких заходів щодо втручання в ландшафт чи структуру, наприклад, прокладання кабелю, потрібно витратити чимало зусиль, часу та коштів.

Одним із шляхів забезпечення мобільності передавання інформації на близькі відстані і у районах, де важко прокласти оптичні волокна, як альтернатива, є застосування атмосферних оптичних систем зв'язку [1].

Атмосферні оптичні системи зв'язку АОСЗ, (*Free Space Optics* — FSO) — вид зв'язку, який набув свого розвитку і комерційного застосування в кінці 90-х років XX століття в результаті об'єднання лазерних і телекомунікаційних технологій [2].

Використання інфрачервоного оптичного діапазону для передавання даних відкрило широкі можливості для проектувальників систем зв'язку, які потребують максимальної оптимізації процесу передавання інформації як з технічної, так і

комерційної сторін. Безпроводові оптичні канали зв'язку, що використовують лазерні або світлодіодні випромінювачі ІЧ-діапазону, практично не відрізняються за параметрами від каналів, організованих по ВОЛЗ. Вони не потребують узгодження частот, не накладають істотних обмежень на обладнання, не вимагають розроблення додаткових протоколів зв'язку. Окрім того, надзвичайно широка смуга пропускання дає можливість збільшувати швидкість передавання даних, причому здійснювати це незалежно від кількості користувачів або обсягу переданої інформації [2].

Передавальна частина системи містить підсилювач електричних сигналів ЕП, генератор струму накачування ГСН, що виконує роль перетворювача напруги в струм і каскаду джерела випромінювання (лазера) ДВ. Оптичне випромінювання фокусується за допомогою антени (рис. 1).

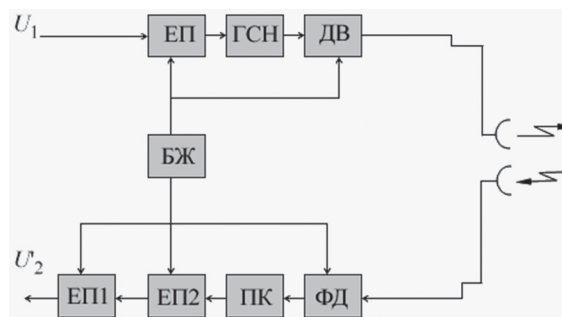


Рис. 1. Схема приймально-передавального пристрою атмосферної системи зв'язку

Приймальна частина містить антену, що фокусує випромінювання на приймальну площинку фотодіода. Каскад із фотодіодом ФД через погоджувальний каскад ПК підімкнено до підсилювачів ЕП1, ЕП2.

Одним із недоліків цієї системи є її залежність від стану атмосфери, а саме наявності різних опадів, а особливо туману.

Для усунення зазначеного недоліку на сучасному етапі проектуються та розгортаються АОЛЗ,

які є поєднанням атмосферного зв'язку з радіорелейною системою зв'язку [1; 2].

Принципову схему гібридної АОСЗ подано на рис. 2.

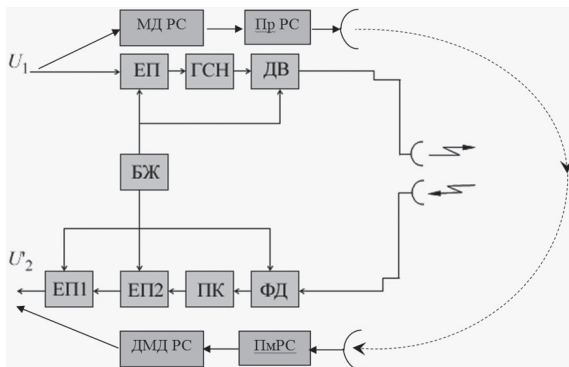


Рис. 2. Схема гібридного приймально-передавального пристрою атмосферної системи зв'язку

У даній системі створюється додатковий радіоканал, який включає модулятор МД РС та ДМД РС радіосигналу, передавальну Пр РС та приймальну Пм РС радіосистему.

Завдяки поєднанню можливостей інфрачервоних та радіосистем під час роботи в умовах сильних опадів можна використовувати АОЛЗ з гігабітними безпроводовими з'єднаннями точка-точка на дистанціях до 3 км з операторською доступністю 99,999% [2].

При цьому 97-99% часу в році транспорт даних проходить через АОЛЗ (FSO)-систему, стійку до радіозавад і не створює їх, а в решту 1-3% часу транспорт забезпечено міліметровою радіосистемою [2]. Окрім високої доступності таке поєднання дає можливість будувати систему з дублюванням каналів. Водночас задіяний радіорелейний канал за умов високого насичення простору проходження сигналу різним електромагнітним випромінюванням зазнає впливу різних перешкод і завад [1; 2].

Аналіз останніх публікацій та постановка проблеми. У джерелах [2; 3] визначено, що найважливішою характеристикою захищеності засобів зв'язку від потужних природних і штучних радіозавад на сигнальному рівні є завадозахищеність: здатність системи зв'язку забезпечувати функціонування, керування в умовах впливу шумів і завад штучного і природного походження.

Однак наведені в [2; 3] та інших відомих джерелах визначення завадозахищеності і «бази сигналу» не повною мірою враховують специфіку систем зв'язку, що використовують широкопasmові сигнали і антенні системи з вузькою діаграмою напрямленості, зокрема такі, що можуть використовуватись у комбінованих АОЛЗ, а також у перспективних оптичних лазерних системах із повітряно-космічними каналами зв'язку [3].

Отже, метою цієї статті є аналіз взаємозв'язку характеристик завадозахищеності радіоканалів із параметром «база сигналу», узагальнення поняття «база сигналу» для оптичних та радіосистем системи зв'язку і формулювання аналітичного виразу для «бази сигналу», що враховує особливості впливу простору поширення сигналу на його проходження.

Основна частина

Серед усіх параметрів сигналу найбільший вплив на прихованість та завадозахищеність системи передавання сигналів має параметр B — «база» сигналу [2; 3]:

$$B = \Delta F_c \cdot T_c, \quad (1)$$

де ΔF_c — ефективна ширина спектра сигналу, Гц;
 T_c — час тривалості сигналу, с.

Для простих елементарних сигналів $B \approx 1$.

Для складних сигналів, до яких належать широкосмугові шумоподібні сигнали (ШШПС), сигнали з програмно переналаштованою робочою частотою (ПНРЧ), а також перспективні вузькосмугові шумоподібні сигнали (ВШПС) $B \gg 1$.

При цьому великих значень параметра B у ШШПС ПНРЧ можна набути завдяки розширенню ΔF_c , а в ВШПС — збільшенням T_c .

Відомо, що параметр B бере участь в енергетичних співвідношеннях радіоприймання через вираз [3]:

$$P_c/P_{\text{ш}} \cdot B = E_c/N_0, \quad (2)$$

де $P_c/P_{\text{ш}}$ — відношення потужності прийнятого сигналу і потужності сигналу шуму на антенному вході;

E_c/N_0 — відношення енергії біта сигналу до спектральної густини потужності завади на виході демодулятора сигналу (вході 1-го розв'язувального пристрою).

Відношення E_c/N_0 визначає завадостійкість системи P_0 і має залишатись фіксованою.

Для збереження $P_0 = 10^{-6}$ необхідно підтримувати відношення $E_c/N_0 = 10$.

Відповідно до (2) значення $P_c/P_{\text{ш}}$ і B перебувають в обернено пропорційній залежності, поданій на рис. 3 [3].

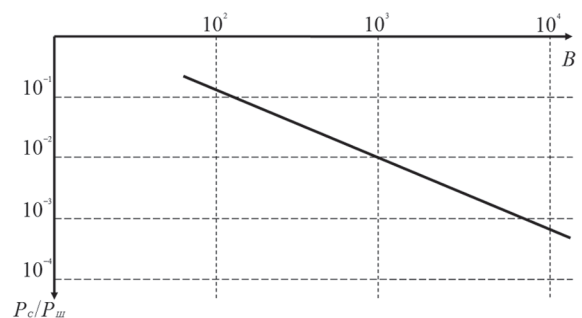


Рис. 3. Графік залежності $P_c/P_{\text{ш}}$ від B при $E_c/N_0 = 10$

Проаналізувавши залежності на рис. 3, доходимо висновку, що збільшенням параметра B можна підтримати значення E_c/N_0 постійним. Наприклад, що дорівнює 10, у разі зменшення відношення $P_c/P_{ш}$ на вході радіоприймального пристрою на кілька порядків. Це забезпечує необхідне значення P_0 .

Зменшення відношення $P_c/P_{ш}$ з точністю до постійного множника K пропорційно до зменшення ймовірності появи завади в діапазоні передавання корисного сигналу P_p .

Значення P_p визначається за виразом [3; 4]

$$P_p = KP_c/P_{ш}.$$

Зменшення ймовірності появи завади в діапазоні передавання корисного сигналу P_p у разі підтримання в постійних значеннях ймовірності порушень $P_{п}$ у роботі радіопередавального пристрою зумовлює підвищення завадозахищеності радіоканалу.

Це впливає із загального виразу обчислення ймовірнісного критерію завадозахищеності [4]:

$$P_{зз} \geq P_{ззз\text{дн}},$$

або

$$P_{зз} \geq P_{зз\text{макс}},$$

де $P_{зз}$ — ймовірність функціонування системи зв'язку з заданим рівнем завадозахищеності.

Таким чином, простежується такий логічний ланцюг:

$$(*) \text{const} \rightarrow P_{п} = \text{const} \rightarrow \uparrow B \rightarrow \downarrow P_c/P_{ш} \rightarrow \downarrow P_p \rightarrow \uparrow P_{зз}. \quad (3)$$

Із виразу (3) випливає, що підвищення $P_{зз}$ радіоканалу тісно пов'язано з пропорційним збільшенням значення бази сигналу B .

Це підтримується в системах ІШПС, ПНРЧ та у ВШПС [3; 4].

Якщо для цього випадку розглядати протяжну лазерну повітряно-космічну систему, то її завадозахищеність визначається значною просторовою прихованістю, яка досягається скороченням імпульсу сигналу.

Водночас параметр B функціонально залежить від часу тривалості сигналу (1). Тобто, при достатньо короткочасних імпульсах сигналу вузького спектра, а це притаманно лазерним повітряно-космічним системам оптичного зв'язку та може бути реалізовано в перспективних АОЛЗ. Отже, є дійсним вираз $\tau_c \approx 1/\Delta f_c$, а саме значення B наближається до одиниці [3].

Але, разом із тим, сигнали з такими характеристиками B є найбільш завадозахищеними через мале значення тривалості сигналу.

Аналіз показує, що доцільно враховувати універсальну пропорційну залежність між значеннями ймовірності функціонування системи зв'язку із заданим рівнем завадозахищеності B , якщо розрахунки виконувати не на вузькому сигнальному рівні, а на більш загальному сигнальному

польовому. Саме поняття «просторової» скритності пов'язано із розглядом поряд з радіосигналами ще і й простору оптичного поля [5].

Канал передавання сигналу, що має просторову прихованість, природно розглядати як канал з просторово-часовим прийманням на полісигнальному рівні.

Це, у свою чергу, зумовлює потребу в уточненні поняття параметра B через урахування впливу полісигнального рівня передавання сигналів на фоні його короткочасного імпульсу.

Сигнал, який проходить простором через приймально-передавальний тракт на виході передавальної антени має певну потужність $P_{прд}$. Вона визначається загалом як еквівалентна ізотропно-випромінювальна потужність (ЕІВП) передавального пристрою. ЕІВП можна дістати з виразу, дБ·Вт [2]

$$\text{ЕІВП} = P_{прд} G_{прд}, \quad (4)$$

де $G_{прд}$ — коефіцієнт підсилення передавальної антени.

Коефіцієнт підсилення $G_{прд}$ передавальної антени для розглянутих раніше умов формування та проходження сигналу, а саме, полісигнального рівня передавання сигналу на фоні його короткочасного імпульсу, доцільно ввести в розрахунки параметра B [2].

Тоді вираз (1) набере такого вигляду:

$$B = G_{прд} \Delta F_c \cdot T_c. \quad (5)$$

Аналіз цього виразу дає змогу встановити, що для вузьконаправлених лазерних (оптичних) сигналів чи радіосигналів сантиметрового та міліметрового діапазону значення B визначатимуться саме коефіцієнтом $G_{прд}$.

Уведення в (1) додаткової складової, що враховує особливості простору поширення сигналу, уможливує проведення розрахунків параметра B для короткотермінових вузьконаправлених сигналів за універсальним правилом — «більша база сигналу — вища завадозахищеність» [2; 5].

Деякі результати оцінювання завадозахищеності космічних оптичних ліній зв'язку (як образу АОЛЗ) і супутникових радіоліній еквівалентної довжини подано в таблиці [3], де q_E , q_P , q_C відповідно енергетичний, просторовий і сигнальний коефіцієнти завадозахищеності.

Лінія зв'язку	Коефіцієнти рівняння завадозахищеності				
	ЕІВП реп (оеп), дБ·Вт	q_E , дБ·Вт	q_P , дБ·Вт	q_C , дБ·Вт	Запас завадозахищеності
Радіолінія з ІШП	110...120	30...40	20...40	20...40	10
ОЛС	115...125	90...95	90-	-10	50...60

Висновки

1. Доцільно ввести у вираз розрахунку «Бази» «польову» складову, що враховує просторовий розподіл поля випромінювання сигналу.

2. За таку складову запропоновано брати $G_{\text{прд}}$ — коефіцієнт підсилення передавальної антени. Це забезпечить універсальну відповідність — «більша база — вища заводозахищеність».

3. Енергетична складова виразу заводозахищеності q_E для ОЛЗ (АОЛЗ) для оптичних ліній зв'язку значно (до 50...60 дБ) перевищує вказаний параметр відносно ширококутових радіосигналів, що пояснюється значним коефіцієнтом підсилення $G_{\text{прд}}$ оптичних ліній зв'язку, які можуть досягати 110 дБ.

Список використаної літератури

1. Розорінов Г. М., Соловійов Д. О. *Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку: навч. посіб. / 2-е вид., перероб. і допов. Київ: Кафедра, 2012. 344 с.*

2. Трубочанінова К. А. Дослідження моделі гібридної радіооптичної телекомунікаційної системи // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. ХДУЗТ. 2015. №5. С. 20–24.*

3. Битченко А. Н, Макаров Л. Б, Подорожняк А. А. *Заводозахищеність і розвиток змісту параметра «База» сигналів: зб. наук. праць Харків. ун-ту Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. 2008. Вип. 2(17). С. 60–64.*

4. Гаврилко Є. В. *Методика обчислення затримки інформації в системі управління супутникових екологічних телекомунікаційних систем дистанційного моніторингу Землі // Системи управління, навігації і зв'язку. Полт. НТУ. 2015. № 2 (34). С. 23–38.*

5. *Телекомунікаційні системи та мережі [Електронний ресурс]: педагог. навч. посіб. для вищих навч. закладів. ХНУР. 2011. Т. 1. URL: <http://www.znanius.com/3640.html>. (дата звернення 26.11.2019).*

А. Л. Туровский

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ЦИФРОВЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ПУТЕМ РАСШИРЕНИЯ ПАРАМЕТРА СИГНАЛА «БАЗА»

Проведен анализ взаимосвязи характеристик помехозащищенности специальных радиоканалов передачи информации с параметром сигнала «база». Раскрыта целесообразность приведения указанного параметра для случая атмосферных оптических линий связи с дублированием по радиоканалу к более общему виду путем введения «полевой» составляющей. Предложено в качестве данной составляющей использовать коэффициент усиления передающей антенны. Представлен расчет конкретных значений указанного коэффициента для оптической линии связи.

Ключевые слова: помехозащищенность; скрытность; база сигнала; атмосферная оптическая линия связи; коэффициент усиления передающей антенны.

O. L. Turovsky

SUBSTANTIATION OF METHODS FOR IMPROVEMENT OF HIGH-SPEED ATMOSPHERIC DIGITAL FIBER-OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS BY EXTENDING THE SIGNAL PARAMETER «BASE»

An analysis of the use of fiber optic transmission systems in local access networks has shown that in some cases they are poorly operational in terms of laying transmission lines and not always better, and can lead to significant financial costs, especially when laying down time lines. One of the ways to ensure the mobility of long-distance information transmission and in areas where it is difficult to lay fiber optics as an alternative is to use atmospheric optical communication systems. The disadvantage of this system is its dependence on the state of the atmosphere, namely the presence of various precipitation, especially fog. To eliminate this deficiency, AOLZs are being designed and deployed at the present stage, which is a combination of atmospheric communication with radio relay communication system. In addition to high availability, this combination allows you to build a system with duplicate channels. In turn, the radio relay channel in the conditions of high saturation of the space of the signal through different electromagnetic radiation is subject to various interferences and interferences. Generally, the most important characteristic of communication security against powerful natural and artificial radio interference at the signal level is noise immunity: the ability of the communication system to function, control under the influence of noise and interference of artificial and natural origin.

However, the well-known sources of noise immunity and «signal base» do not fully take into account the specifics of communication systems using broadband signals and antenna systems with narrow directional patterns, in particular those that can be used in combined AOLZs and in perspective optical laser systems with air-space communication channels.

The article analyzes the interrelation of the noise immunity characteristics of special radio channels of information transmission with the parameter of the signal «base». The expediency of bringing this parameter to the case of atmospheric optical lines for radio duplication is shown to be more general by introducing a «field» component. It is proposed to use a transmitting antenna gain as a component. The specific values of the specified coefficient for the optical link are given.

Keywords: noise immunity; stealth; signal parameter base; atmospheric optical communication line; transmit antenna gain.