

УДК 681.3

І.Р. Опірський

ПОТІК ІНФОРМАЦІЇ І ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ ВОЛЗ

У роботі досліджується проблема пропускної спроможності і потоку інформації у волоконно-оптичних лініях зв'язку. При аналізі цієї проблеми враховуються розподіли сигналу, відсутність кореляції сигналу, наявність спектрів потужностей у частотному діапазоні та інші характеристики сигналу, що впливають на пропускну спроможність та потік інформації.

Ключові слова: потік інформації, пропускна спроможність, волоконно-оптичні лінії зв'язку, сигнал.

В работе исследуется проблема пропускной способности и потока информации в волоконно-оптических линиях связи. При анализе этой проблемы учитываются распределения сигнала, отсутствие корреляции сигнала, наличие спектров мощностей в частотном диапазоне и другие характеристики сигнала, которые влияют на пропускную способность и поток информации.

Ключевые слова: поток информации, пропускная способность, волоконно-оптические линии связи, сигнал.

In work the problem of a data throughput and information flow in optical fiber communication lines is investigated. Signal distributions, an absence of a signal correlation, the presence of power-density spectra in frequency range and other characteristics of a signal which have an influence on data throughput and information flow are considered.

Keywords: information flow, data throughput, fiber communication lines, signal.

Оптоволоконні мережі, поза сумнівом, є одним із провідних напрямів в області зв'язку. Пропускна спроможність оптичних каналів є на порядок вищою ніж у інформаційних ліній на основі мідного кабелю. Оптичне волокно на сьогодні вважається досконалим фізичним середовищем для передачі інформації, а також найбільш перспективним середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані. Тому проблема збільшення пропускної спроможності ВОЛЗ та потоку інформації у наш час набула неабиякої актуальності.

Для оцінки пропускної спроможності системи береться інформація, передана за одиницю часу; при цьому, як відомо, виходить потік переданої інформації $J(x; y)$. При повному використанні лінії зв'язку для передачі інформації максимум потоку інформації називається пропускною спроможністю або ємністю лінії C_l [1, 2].

Отже, пропускна спроможність ВОЛЗ є інформаційно-теоретичною характеристикою лінії зв'язку. Насправді система передає за одиницю часу менше інформації, ніж це дозволяє пропускна спроможність лінії. Повністю пропускну спроможність лінії можна використовувати тільки для сигналів, оптимально пристосованих до лінії в інформаційно-теоретичному плані. Тому для заданої лінії зв'язку завжди повинно бути:

$$J \leq C_t \quad (1),$$

В час, коли найчастіше розглядається лише випадок відсутності кореляції вхідних сигналів, який розглядається в роботах Пінснера [3, 4], дає рівняння загального вигляду для максимуму потоку переданої інформації за умови, що сигнали $x(t)$ і $y(t)$ мають гаусовий розподіл.

$$C_t = -\frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \log[1 - \rho_{xy}^2(\omega)] d\omega \quad (2),$$

де слід припустити

$$\rho_{xy}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_x(\omega)S_y(\omega)} \quad (3);$$

де $S_{xy}(\omega)$ – взаємний спектр потужності; $S_x(\omega)$ і $S_y(\omega)$ – спектри потужностей сигналів, що розглядаються. Для ВОЛЗ відповідно до рівняння (2) можна записати:

$$C_t = -\frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \log[1 - \rho_{n_e z_a}^2(\omega)] d\omega \quad (4),$$

або

$$\rho_{n_e z_a}^2(\omega) = \frac{S_{n_e z_a}(\omega)^2}{S_{n_e}(\omega)S_{z_a}(\omega)} \quad (5).$$

За допомогою цих рівнянь можна вирахувати пропускну спроможність лінії зв'язку. Проте рівняння (2) для випадку відсутності кореляції вхідних сигналів, що часто зустрічається, можна спростити.

З огляду на літературу [4, 5], можна записати:

$$\begin{aligned} S_{n_e z_a}(\omega) &= S_{n_e} n_a(\omega), \\ S_{n_e n_a}(\omega) &= G(j\omega) S_{n_e}(\omega), \\ S_{z_a}(\omega) &= |G(j\omega)|^2 [S_{n_e}(\omega) + S_{r_e}(\omega)] \end{aligned} \quad (6).$$

Безпосередньо отримуємо співвідношення:

$$C_t = -\frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \log \left[1 - \frac{S_{n_e}(\omega)}{S_{r_e}(\omega)} \right] d\omega \quad (7),$$

або можна записати з урахуванням [5]:

$$C_t = -\frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} \log \left[1 + \frac{P_{n_e}(\omega)}{P_{r_e}(\omega)} \right] d\omega \quad (8).$$

Припускаючи наявність постійних спектрів потужності (білий шум) $P_{n_e} o$, $P_{r_e} o$, в частотному діапазоні $0 < \omega \leq \omega_g$, і вважаючи, що ВОЛЗ є фільтром нижніх частот з граничною частотою ω_g , отримуємо для пропускну спроможності лінії зв'язку при

або при

$$C_t = f_g \log \left[1 + \frac{P_{ne0}}{P_{re0}} \right] \quad (9)$$

$$\begin{aligned} P_{ne0} \omega_g &= \overline{n_e^2(t)} \\ P_{re0} \omega_g &= \overline{r_e^2(t)} \end{aligned} \quad (10),$$

рівняння, зване рівнянням Шеннона [6]:

$$C_t = f_g \log \left[1 + \frac{\overline{n_e^2(t)}}{\overline{r_e^2(t)}} \right] \quad (11),$$

де f_g – смуга пропускання ідеального фільтра нижніх частот. Так само для постійних спектрів потужності за умови виконання рівняння (10) можна визначити максимальну передавану інформацію відповідно до рівняння

$$I(n_e; z_e) = \frac{1}{2} \log \left[1 + \frac{\int_0^{\omega_g} P_{ne}(\omega) d\omega}{\int_0^{\omega_g} P_{re}(\omega) d\omega} \right] \text{ при обмеженні смуги. В цьому випадку маємо:}$$

$$I(n_e; z_e)_{\max} = \frac{1}{2} \log \left[1 + \frac{\overline{n_e^2(t)}}{\overline{z_a^2(t)}} \right] \quad (12).$$

Тоді, якщо відомі максимально передавана інформація і максимально передаваний потік інформації або пропускна спроможність каналу C_t (біт/с), можна визначити час $t_{\text{пер}}$, необхідний для передачі $I(n_e; z_e)_{\max}$ за виразом (12):

$$C_t t_{\text{пер}} = I(n_e; z_e)_{\max} \quad (13),$$

або

$$t_{\text{пер}} = \frac{I(n_e; z_e)_{\max}}{C_t} \quad (14).$$

Отже, для випадку постійних щільностей потужності в частотному діапазоні $0 < f \leq f_g$ якраз, виходить час встановлення режиму [1]:

$$t_{\text{пер}} = \frac{1}{2f_g} = \frac{1}{f_g} \quad (15).$$

Рівняння (14) або його окремий випадок – рівняння (11) – визначає теоретичну межу швидкості передачі інформації у ВОЛЗ при заданих вхідних корисному сигналі і сигналі завад. Згідно з цими рівняннями, в окремому випадку постійних спектрів потужності протягом часу $t_{\text{пер}}$, за допомогою ВОЛЗ може передаватися наступна максимальна кількість інформації в бітах:

$$C_t t_{\text{пер}} - \frac{1}{2} \log \left[1 + \frac{n_e^2(t)}{r_e^2(t)} \right] \quad (16).$$

Оскільки згідно з умовою це відповідає максимальній переданій інформації, то в ідеальному випадку можна в середньому визначити $1/t_{\text{пер}}$ окремих значень інформаційних блоків за одиницю часу. Тому було б достатньо визначити значення сигналу $z_a(t)$ через еквівалентні інтервали $t_{\text{пер}}$, а не аналізувати весь сигнал, що передається. Отже, щоб уникнути втрат інформації, протягом часу $t_{\text{пер}}$ потрібно було б опитувати сигнал мінімум один раз. Цей висновок важливий для аналого-цифрового перетворення і подальшої обробки на ЕОМ. Скорочення часу опитування не означає збільшення максимально передаваної інформації.

Між необхідним часом опитування $t_{\text{оп}}$ і часом $t_{\text{пер}}$ повинна існувати залежність [1]:

$$t_{\text{оп}} \leq t_{\text{пер}} \quad (17),$$

або якщо в основу покласти рівняння (15)

$$t_{\text{оп}} \leq \frac{1}{2fg} \quad (18).$$

Залежність за виразом (17) відома в літературі [2, 3] як теорема Котельникова, теорема відліків або теорема квантування. При цьому в класичному виведенні рівняння (18) за основу береться теорія цілих функцій.

Рівняння (14) справедливе завжди, у тому числі і тоді, коли не пропонується обмеження після пропускання сигналів і частотний діапазон сигналів ВОЛЗ знаходиться в межах $0 < \omega < \infty$. Якщо передбачається відсутність кореляції вхідних сигналів системи $n_e(t)$, $r_e(t)$, а також гаусовий розподіл, то вимоги максимально передаваної інформації призводять до результату:

$$I(n_e; z_a)_{\text{max}} = \frac{1}{2} \log \frac{\int_0^\infty Pn_e(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \frac{Pn_e(\omega) Pr_e(\omega)}{Pn_e(\omega) + Pr_e(\omega)} d\omega} \quad (19),$$

де $Pn_e(\omega)$, $Pr_e(\omega)$ – спектральні щільності потужностей сигналів. Тому при відсутності кореляції вхідних сигналів отримаємо для часу передачі

$$\log \frac{\int_0^\infty Pn_e(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \frac{Pn_e(\omega) Pr_e(\omega)}{Pn_e(\omega) + Pr_e(\omega)} d\omega} \quad (20),$$

$$t_{\text{пер}} = \pi \frac{1}{\int_0^\infty \log \left[1 + \frac{Pn_e(\omega)}{Pr_e(\omega)} \right] d\omega}$$

а для необхідного часу опитування:

$$t_{\text{оп}} \leq \pi \frac{\log \frac{\int_0^\infty Pn_e(\omega) d\omega}{\int_0^\infty \frac{Pn_e(\omega) Pr_e(\omega)}{Pn_e(\omega) + Pr_e(\omega)} d\omega}}{\int_0^\infty \log \left[1 + \frac{Pn_e(\omega)}{Pr_e(\omega)} \right] d\omega} \quad (21),$$

Тим самим необхідний час опитування $t_{\text{оп}}$ фізично цілком наочним чином залежить від відношення сигнал-шум, якщо немає обмеження спектрів. Щоправда, рівняння (21) містить особливий випадок корисного сигналу, обмеженого по смузі, як це впливає з рівнянь (9–18).

Тому ставиться завдання досягнення оптимальної в найширшому сенсі передачі пакету інформації. Розв'язання цього завдання відіграє велику роль у всіх областях, де застосовується ВОЛЗ. Оскільки в шеннонівському сенсі ця система розглядалася як система передачі інформації і вказувався оптимальний варіант при заздалегідь заданих вхідних сигналах, то можна показати межі передачі інформації у ВОЛЗ із завадами. Це дозволяє оцінити, чи викликають підвищені технічні витрати помітне збільшення передаваної інформації.

Проведемо аналіз і розрахунки відповідно до рис. 1 для практично важливих спектральних щільностей потужності корисного сигналу і сигналу завад.

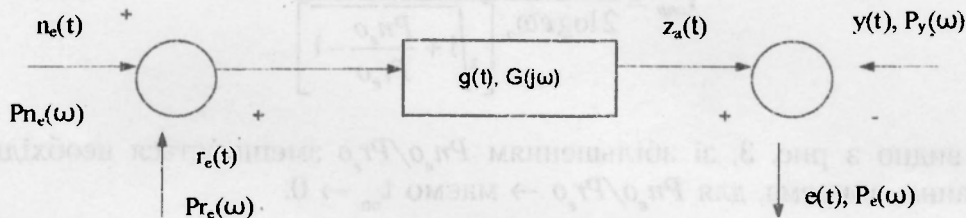


Рис. 1. Покладена в основу розглядів система передачі інформації з вхідною величиною $n_e(t)$, вихідною $z_a(t)$, завадами $r_e(t)$ і похибкою перетворення $e(t)$.

При цьому для характеристик спектральних щільностей потужності $Pn_e(\omega)$, $Pr_e(\omega)$ вхідних сигналів лінії припускається:

$$\begin{aligned} Pn_e(\omega) &= Pn_{e0} \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \\ Pr_e(\omega) &= Pr_{e0} \end{aligned} \quad (22),$$

З огляду на це, визначаємо максимальний потік передаваної інформації, а також необхідний час опитування за рівнянням (21) при заданих відношеннях Pn_{e0}/Pr_{e0} (спектральне відношення сигнал/шум при $\omega=0$).

Підставимо спектральні щільності потужності в рівняння (8), отримаємо для пропускної спроможності лінії:

$$C_1 = \frac{\omega_0}{2 \ln 2} \left[\sqrt{1 + \frac{Pn_{e0}}{Pr_{e0}}} - 1 \right] \quad (23).$$

Зі збільшенням відношення Pn_o/Pr_o зростає максимальний потік передаваної інформації (рис. 2).

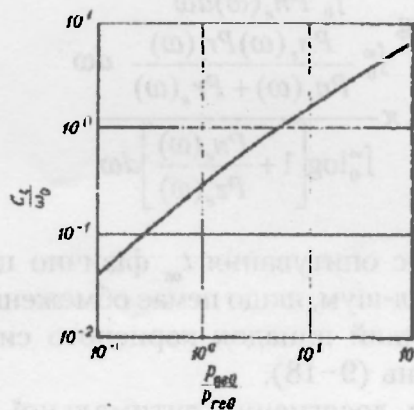


Рис. 2 Відношення $\frac{C_e}{\omega_o} = f\left(\frac{Pn_o}{Pr_o}\right)$

Тому необхідний час опитування буде дорівнювати:

$$t_{\text{оп}} \leq \frac{1}{2 \log e \omega_o} \frac{\log \left[1 + \frac{Pn_o}{Pr_o} \right]}{\sqrt{1 + \frac{Pn_o}{Pr_o} - 1}} \quad (24).$$

Як видно з рис. 3, зі збільшенням Pn_o/Pr_o зменшується необхідний час опитування, зокрема, для $Pn_o/Pr_o \rightarrow \infty$ маємо $t_{\text{он}} \rightarrow 0$.

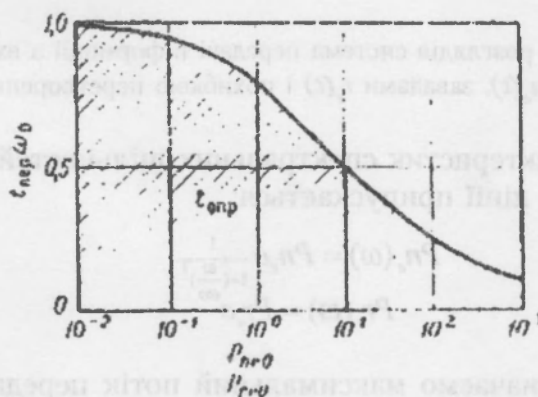


Рис. 3. Час передачі $t_{\text{пр}}$ і необхідний час опитування $t_{\text{он}}$ (заштрихована область) від Pn_o/Pr_o .

При малому відношенні приблизно Pn_o/Pr_o $t_{\text{он}}$ рівне:

$$t_{\text{он}} = \frac{1}{\omega_o} \quad (25).$$

Область необхідного часу опитування на рис. 3 заштрихована.

Запропоновані і досліджені проблеми пропускну́ї спроможності ВОЛЗ, а також вирішення питання потоку інформації в математичній формі дозволить покращити ефективність передачі інформації в ВОЛЗ, крім того створять передумови для проектування засобів захисту інформації в системах передачі інформації з використанням ВОЛЗ, а також можуть використовуватись для оцінки захищеності інформації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Wosohni E.-G.* Information und Automatisierung, Reihe Automatisierungstechnik, Bd. 98, Berlin, Verlag Technik, 1980.
2. *Фано Р.М.* Передача информации. Статистическая теория связи / Р.М. Фано – М. : Мир, 1965. – 312 с.
3. *Fey P.* Einfache Korrelationsmeßverfahren, Nachrichtentechnik, 8, H. 1, 12–16 (1988).
4. Краус М. Измерительные информационные системы / М. Краус, Э. Вошни. – М. : Изд. Мир, 1975. – 310 с.
5. *Ланге Ф.* Корреляционная электроника. Основы и применение корреляционного анализа в современной технике связи, измерений и регулирования / Ланге Ф. – Л. : Судпромгиз, 1963. – 346 с.
6. *Шеннон К.Е.* Математическая теория связи. Теория передачи электрических сигналов при наличии помех / К.Е. Шеннон, В. Уивер. – М. : ИЛ, 1953. – 253 с.
7. *Гринфилд Д.* Оптические сети / Д. Гринфилд. – К. : ООО "Тид "ДС", 2002. – 256 с.
8. *Фриман Р.* Оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2003.

Отримано 14.04.2011