

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЮ ОПТИМАЛЬНОСТІ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ ДЛЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАВАННЯ З ОРТОГОНАЛЬНИМИ ГАРМОНІЧНИМИ СИГНАЛАМИ

Розглянуто переваги методу передавання з ортогональними гармонічними сигналами та особливості його застосування у сучасних телекомунікаційних технологіях. Вирішується задача пошуку критерію оптимальності амплітудно-частотної характеристики каналу зв'язку для OFDM-систем, який полягає у мінімізації суми значень загасання каналу передавання на усіх несучих частотах OFDM-системи. Доведено, що запропонований критерій відповідає критерію максимізації швидкості передавання даних.

Ключові слова: канал зв'язку, амплітудно-частотна характеристика, OFDM-система, критерій максимізації швидкості передачі, ортогональний сигнал

Останні роки метод передавання OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів) отримав надзвичайно широке застосування у сучасних телекомунікаційних мережах широкосмугового доступу (ШД) [1]. Він успішно використовується цілою низкою телекомунікаційних технологій широкосмугового доступу, що розраховані як на радіо, так і на проводове середовище поширення сигналів, - Wi-Fi, WiMAX, LTE, DVB, T-DAB, ADSL2+, VDSL2, DOCSIS, BPL тощо [2-4]. У вітчизняній науковій літературі системи передавання (СП) з використанням OFDM отримали назву СП з ортогональними гармонічними сигналами (СП ОГС) [3].

Метод передавання OFDM фактично витіснив інші конкуруючі технології передавання на мережах ШД (окрім оптичних технологій) насамперед завдяки своїй надзвичайно високій ефективності при роботі по каналах зв'язку з ненормованими та нестабільними у часі характеристиками (до яких, як правило, і належать канали зв'язку мереж ШД), пов'язаної насамперед з вузькосмуговістю сигналів-переносників, що використовуються у даному методі передавання. Ця вузькосмуговість дає можливість адаптивно використовувати смугу частот передавання, "вимикаючи" непридатні для передавання ділянки частот та, навпаки, "направляючи" більшу потужність на ділянки частот з кращими характеристиками [3, 4].

Досить часто в науковій діяльності з дослідження СП ОГС та у практичній діяльності служб експлуатації мереж доступу виникає задача оцінки або порівняння амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) каналів зв'язку, призначених для передавання сигналів OFDM. Найбільш адекватним критерієм, що відображає здатність каналу зв'язку для передавання даних, є, очевидно, критерій максимуму досяжної швидкості передавання даних. Однак експлуатаційний персонал телекомунікаційних операторів, як правило, не володіє ані методикою, ані відповідними інструментами розрахунку досяжної швидкості передавання, виходячи з відомої АЧХ каналу зв'язку. Тому масове застосування цього критерію на практиці фактично є неможливим.

Водночас аналіз літератури з цього питання показав, що на сьогодні всі інші критерії оцінки та порівняння АЧХ не відповідають багатоканальній специфіці сигналу OFDM і, отже, непридатні для адекватної оцінки каналу зв'язку з точки зору здатності переносити інформацію.

Тому метою даної статті є пошук такого критерію оцінки АЧХ каналу зв'язку (призначеного для передавання сигналів OFDM), який би враховував багаточастотну специфіку СП ОГС і при тому був би придатним і зручним для практичного застосування.

Швидкість передавання даних, досяжна системою передавання з ортогональними гармонічними сигналами, розраховується за наступною формулою [3, 4]:

$$R = f_s \cdot \sum_{l=l_1}^{l_2} b(l),$$

де f_s – кількість передаваних посилок (символів) за секунду (symbol rate);

l_1 і l_2 – номери першої та останньої використовуваних несучих;

$b(l)$ – максимальна кількість бітів інформації $b(l)$, що передається протягом посилки на l -й несучій.

Величина $b(l)$ пов'язана із відношенням сигнал/завада на частоті l -ої несучої $SNR(l)$ і ймовірністю помилки p на виході приймача співвідношенням [3, 4]:

$$b(l) = \text{floor} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{3 \cdot SNR(l)}{h^2} \right) \right\},$$

де $\text{floor}\{x\}$ – операція відкидання дробової частини числа x ;

h – відношення “напіввідстані” між найближчими точками сигнального сузір'я до середньоквадратичного значення гаусового шуму в l -му каналі модему.

Величина h розраховується за формулою:

$$h = Q^{-1} \left(\frac{p}{1,7} \right),$$

де $Q^{-1}(x)$ – функція, зворотна $Q(x)$, $Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$;

p – ймовірність помилки при $p = 10^{-7}$ $h \approx 5,3$.

Відношення сигнал/завада на вході приймача на частоті l -й несучої

$$SNR(l) = 10^{0,1(PSD(l) - A(l) - N(l))},$$

де $PSD(l)$ – номінальна спектральна густина потужності (СГП) передаваного сигналу на частоті l -й несучої;

$A(l)$ – загасання каналу зв'язку на частоті l -й несучої (очевидно, що $A(l)$ являє собою дискретну АЧХ каналу зв'язку, кожен відлік якої представлений у децибелах);

$N(l)$ – СГП завади на частоті l -й несучої на вході приймача.

Для досягнення мети статті, очевидно, необхідно визначити вплив АЧХ каналу зв'язку (тобто $A(l)$) на досягну швидкість передавання при фіксованих інших параметрах. У більшості випадків у реальних СП використовуються рівномірні за частотою СГП передаваного сигналу та завади. Тому для визначення цього впливу ми можемо вважати $SNR(l)$ і $N(l)$ константами. З урахуванням цього:

$$R = f_s \cdot \sum_{l=l_1}^{l_2} \text{floor} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{3(10^{0,1(PSD(l) - A(l) - N(l))})}{h^2} \right) \right\} = f_s \sum_{l=l_1}^{l_2} \text{floor} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{3 \cdot 10^{0,1(a - A(l))}}{h^2} \right) \right\},$$

де a – константа, що дорівнює $PSD(l) - N(l)$.

Оскільки вирішувана задача обмежується лише визначенням характеру впливу $A(l)$ на R , то ми можемо знехтувати функцією $\text{floor}\{x\}$ і доданком «1» під знаком логарифму:

$$\begin{aligned} R &\approx f_s \sum_{l=l_1}^{l_2} \log_2 \left(\frac{3 \cdot 10^{0,1(a - A(l))}}{h^2} \right) = f_s \sum_{l=l_1}^{l_2} \left(\log_2 \frac{3}{h^2} + \log_2 (10^{0,1(a - A(l))}) \right) = f_s (l_2 - l_1 + 1) \log_2 \frac{3}{h^2} + f_s \sum_{l=l_1}^{l_2} \log_2 (10^{0,1(a - A(l))}) = \\ &= f_s (l_2 - l_1 + 1) \log_2 \frac{3}{h^2} + f_s \sum_{l=l_1}^{l_2} 0,1(a - A(l)) \log_2 10 = f_s (l_2 - l_1 + 1) \log_2 \frac{3}{h^2} + f_s \sum_{l=l_1}^{l_2} 0,1(a - A(l)) \log_2 10 = \\ &= f_s (l_2 - l_1 + 1) \log_2 \frac{3}{h^2} + 0,1 f_s \log_2 10 \cdot \sum_{l=l_1}^{l_2} a - 0,1 f_s \log_2 10 \cdot \sum_{l=l_1}^{l_2} A(l) = B - C \sum_{l=l_1}^{l_2} A(l), \end{aligned}$$

де B та C – константи,

$$B = f_s(l_2 - l_1 + 1) \log_2 \frac{3}{h^2} + 0,1 a f_s(l_2 - l_1 + 1) \log_2 10,$$

$$C = 0,1 f_s \log_2 10.$$

Отже, доведено, що

$$R \approx B - C \sum_{l=l_1}^{l_2} A(l). \quad (1)$$

З формули (1) очевидно є лінійна залежність між швидкістю передавання і сумою значень загасання каналу зв'язку на усіх несучих частотах СП ОГС та впливає очевидний висновок: швидкість передавання досягає максимуму у тому випадку, коли сума значень загасання каналу зв'язку на усіх несучих частотах СП ОГС є мінімальною.

Отже, шуканий критерій оцінки АЧХ каналу зв'язку знайдено – він полягає у мінімізації суми значень загасання каналу зв'язку на усіх несучих частотах СП ОГС. Завдяки своїй простоті цей критерій є зручним для практичного застосування.

Список використаної літератури

1. Bingman John A. C. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come / John A. C. Bingman // IEEE Commun. Mag. – May, 1990. – 7 p.
2. Weinstein Stephen B. The history of orthogonal frequency-division multiplexing / Stephen B. Weinstein // IEEE Commun. Mag., November, 2009. – pp. 20 – 24.
3. Балашов В. А. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами / В. А. Балашов, П. П. Воробиенко, Л. М. Ляховецкий. – Москва : Эко-трендз, 2012. – 228 с.
4. Балашов В. А. Технологии широкополосного доступа xDSL. Инженерно-технический справочник / В. А. Балашов, А. Г. Лашко, Л. М. Ляховецкий. – Москва : Эко-трендз, 2009. – 256 с.

Автор статті

Ляховецький Леонід Михайлович – кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи Державного підприємства «Одеський науково-дослідний інститут зв'язку». Тел.: +380 (67) 938 93 28.
E-mail: lm@oniis.org.ua

Author of the article

Liakhovetskyi Leonid Mykhailovych – candidate of science (technic), deputy director of State Enterprise “Odessa scientific-research institute of telecommunications”. Tel.: +380 (67) 938 93 28.
E-mail: lm@oniis.org.ua

Дата надходження
в редакцію: 13.10.2016 р.

Рецензент:

доктор технічних наук, професор К. С. Сундучков
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут ім. Ігора Сікорського»