

## ЗАВАДОЗАХИЩЕНІСТЬ РАДІОЛІНІЙ З ШИРОКОСМУГОВИМИ OFDM СИГНАЛАМИ

**Василенко С.В., Рома О.М.**

*Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації НТУУ «КПІ»*

*E-mail: sirx0308@gmail.com*

### Comparison of jamming immunity of radio link with wide-band signals

In this paper considered radio link with wide-band signals, which are using to protect against hindrances Pseudo Noise Signals (PNS), Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) or Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM). It is shown that under optimal action each type transmission of hindrance, jamming immunity radio lines at PNS, FHSS and OFDM are same.

Ефективними засобами захисту систем передачі інформації від навмисних завад є широкосмугові методи передачі. Перший метод характеризується розширенням спектру методом псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ). Другий метод характеризується розширенням спектру кожного інформаційного символу, використовуючи шумоподібні (ШПС), псевдовипадкові (ПВС) чи псевдошумові (ПШС) сигнали. У сучасних стандартах широке застосування знайшли OFDM-сигнали, як у поєднанні з ППРЧ, так і з додатковим розширенням спектру за допомогою квазіортогональних псевдовипадкових послідовностей. Дані методи широко використовуються у системах широкосмугового зв'язку і мають різну оцінку завадозахищеності.

При порівнянні методів виникає питання: які завади є оптимальними (найбільш ефективними при фіксованій середній потужності) для кожного методу.

У [1] показано, що для псевдовипадкового перестроювання робочої частоти (ППРЧ) оптимальними (в класі гаусівських шумових) являються завади, спектр яких зосереджений в частині робочої смуги. Відомо [2], що при заваді типу білого гаусівського шуму, відносній фазовій модуляції (ВФМ) і некогерентному прийомі

$$P_{ном} = \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{N_0}}, \quad (1)$$

де  $\frac{E}{N_0} = h^2$  — відношення енергії сигналу до спектральної щільності шуму.

Якщо завада уражає частину робочої смуги частот, то

$$P_{ном} = r \frac{1}{2} e^{-r \frac{E}{N_3 + rN_0}} + (1-r) \frac{1}{2} e^{-\frac{E}{N_0}}, \quad (2)$$

де  $P_{ном} \in [0, 1]$ ;  $r \in [0, 1]$ ;  $r$  — частина смуги, уражена навмисною завадою;  $N_3$  — спектральна щільність умисної завади в усій робочій смузі.

Зазвичай при прийомі сигналу на фоні навмисної завади  $N_3 \gg N_0$ , тоді

$$P_{ном} \gg r \frac{1}{2} e^{-r \frac{E}{N_3}}. \quad (3)$$

Показано, що оптимальне значення  $r$ , яке призводить до максимуму  $P_{ном}$  визначається як

$$r_{opt} = \frac{N_3}{E}. \quad (4)$$

При цьому

$$\max P_{ном} = \frac{1}{2} \frac{e^{-1}}{E / N_3}. \quad (5)$$

(З фізичних міркувань (4) має сенс при  $\frac{E}{N_3} \geq 1$ .)

При передачі бітової послідовності на одній несівній ймовірність бітової помилки передачі є функцією інтеграла помилок, який у свою чергу, є функцією бітового відношення сигнал / шум.

Стосовно OFDM-сигналу ми можемо розглядати передачу бітової послідовності на  $N$  незалежних піднесівних (у наслідок їх ортогональності). Для випадку, що розглядається, ймовірність бітової помилки на одній піднесівній незалежна від інших піднесівних і визначається виразом (1), де  $E$  є енергією біта. Для OFDM-сигналу в цілому результуюча ймовірність бітової помилки на всіх піднесівних є усередненням бітової помилки за всіма  $N$  піднесівними

$$P_{ном} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, \quad (6)$$

а у разі рівності цих помилок також визначається виразом (1).

Це означає, що оцінити ймовірність бітової помилки при передачі дискретного потоку за допомогою OFDM-сигналів можна за допомогою методики, призначеної для оцінки ймовірності бітової помилки в одному потоці (на одній несівній) з таким же видом дискретної модуляції.

У [1] показано, що при неадаптивних методах передачі та прийому інформації завадозахищеність при ППРЧ (без кодування) відносно шумових завад, що уражають оптимальну частину робочої смуги, значно нижче завадозахищеності відносно шумових завад (тієї ж потужності) з рівномірною спектральною щільністю в смузі сигналу. Висновок стосується і інших видів маніпуляції, а також регулярних (не шумових) завад, дискретної множини гармонічних завад, які уражають частину чи всі робочі частоти.

Для методу захисту від завад з використанням ШПС ймовірність помилки при заваді типу білого гаусівського шуму і аналогічним вище вказаним вимогам визначається за допомогою виразу (1).

Якщо навмисна завада діє тільки певний час передачі, тобто вражає  $m$  інформаційних символів із  $M$ ,  $P_{ном}$  визначається виразом (2) (чи (3) при  $N_3 \gg N_0$  і  $r = m / M$ ).

Аналогічно випадку з ППРЧ, оптимальне значення  $r$ , що призводить до максимуму  $P_{ном}$  при використанні ШПС визначається виразом (4), а  $\max P_{ном}$  — виразом (5).

Однак, не дивлячись на те, що вираз для максимуму ймовірності помилки при впливі оптимальних (в класі шумових) завад однакові, передавач переривистих завад для випадку з ШПС повинен мати імпульсну (тільки в інтервалі випромінювання завади) потужність, яка в  $g$  разів перевищує середню, а при ППРЧ середня та імпульсна потужності передавача завад можуть бути майже однаковими.

У цьому разі можна оцінити, на скільки імпульсна потужність передавача оптимальних переривистих по часу завад перевищує середню потужність передавача неперервних шумових завад при фіксованій ймовірності помилки і енергії сигналу. Аналіз показав, що це перевищення ( $g_{opt}$ ) для неперервної завади дорівнює  $E / N_3$ .

Для фіксованих значень ймовірності завади  $P$  і енергії сигналу  $E$  та використовуючи вирази (1), (4) отримуємо оптимальне значення  $r$

$$r_{opt} = - \frac{1}{\ln 2P_{ном}}. \quad (7)$$

Аналізуючи розглянуті вище вирази ми бачимо, що значення перевищення ( $g_{opt}$ ) дорівнює

$$g_{opt} = \frac{1}{r_{opt}}. \quad (8)$$

На основі цього будуюмо таблицю для декількох значень ймовірності помилки (при некогерентному прийомі сигналів з ВФМ).

$P_{ном}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
$g_{opt}$ , дБ	5,9	7,9	9,3	10,3

З таблиці видно, що перевищення імпульсної потужності передавача оптимальних переривистих завад над середньою потужністю передавача безперервних завад не велике, наприклад, для  $P_{ном} = 10^{-4}$  складає всього 9.3 дБ.

Таким чином, з аналізу широкополосних методів передачі ППРЧ, ШПС і OFDM видно, що завадозахищеність сигналів відносно оптимальних (для кожного методу) завад однакова.

### Література

1. Финкин Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. Изд. 2-е переработаное, дополненное. Изд-во «Советское радио», — 1970., — стр. 728.
2. Биленко А.П., Волков Л.Н. Сравнение помехозащищенности радиолиний с широкополосными сигналами / А.П. Биленко, Л.Н. Волков // Радиотехника. — 1986. — №4 — С. 19-21.
3. В.А. Балашов, П.П. Воробиенко, Л.М. Ляховецкий. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами. — М.: Эко-трендз, 2012. — 228 с.