

КОМПЕНСАЦІЯ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ЗСУВУ ЧАСТОТИ N-OFDM СИГНАЛІВ

Слюсар В.І., д.т.н., проф., Троцько О.О.

Центральний НДІ озброєння та військової техніки Збройних Сил України,
ВІТІ НТУУ «КПІ»

Розглянуто варіанти компенсації доплерівського зсуву частоти, що виникає в лініях зв'язку з БПЛА, при використанні неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM) сигналів.

A COMPENSATION OF DOPPLER FREQUENCY SHIFT OF N-OFDM SIGNALS

In this Paper a Doppler Frequency Shift's Compensation are considered, which arises in Communication Lines with UAV, at use of Not Orthogonal Frequency Discrete Modulation (N-OFDM) Signals.

Застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) розглядається сьогодні як один з перспективних напрямів розвитку телекомунікаційних систем. Серед задач, що ставляться перед БПЛА, досить поширеними є радіозв'язок і ретрансляція повідомлень та даних. Разом з тим, високі швидкості руху БПЛА призводять до негативного впливу доплерівського ефекту, зокрема, при використанні сигналів ортогональної частотної дискретної модуляції (OFDM). Тому при збільшенні доплерівського частотного зсуву для відповідності вимогам надійності зв'язку необхідно збільшувати захисний інтервал OFDM-сигналу, хоча це й супроводжується зростанням невикористаної області задіяного частотного діапазону. Крім того, має знижуватись порядок модуляції з переходом від квадратурно-амплітудної модуляції (QAM) вищих порядків до QPSK [1]. Отже, якщо не вжити запобіжних заходів, доплерівські зсуви можуть викликати погіршення якості демодуляції OFDM-сигналів і часті відмови каналів зв'язку [1].

Альтернативним підходом до частотного розподілу вузькосмугових інформаційних підканалів є застосування методу неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM), що базується на надрелеївському частотному ущільненні сигналів при дотриманні вимог до якості зв'язку [2]. Суттєвою відмінністю цього підходу є те, що частоти підканалів можуть бути рознесені за частотою менше, ніж на ширину синтезованого при операції швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) частотного фільтру. Це дозволяє досить органічно врахувати доплерівський зсув частоти у разі його виникнення.

Початковим етапом компенсації впливу доплерівського зсуву частоти, як відомо, є оцінка величини цього зсуву на етапі входження у зв'язок за допомогою пілот-сигналів. Як найпростіший варіант компенсації доплерівського зсуву може розглядатися попередня зміна носійної частоти сигнального пакету у сторону, протилежну, напрямку доплерівського зсуву. Таку випереджену компенсацію досить нескладно зробити у процесорі формування цифрових сигналів, що мають подаватись на вхід цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП) передавального сегменту. Зазначений варіант компенсації дозволяє лишити незмінними алгоритми демодуляції N-OFDM сигналів на приймальній стороні. Такий спосіб втручання у процес формування сигналів на передачу може виконуватись у спрощеному вигляді, коли для всіх сигналів багаточастотного пакету використовується однаковий частотний зсув, оцінений за частотою пілот-сигналу. Підставою для такого нехтування розбіжностями номіналів піднесучих частот у N-OFDM пакеті є відносно малі рівні частотних рознесень сигналів у порівнянні з абсолютним значенням носійної частоти. Однак, у разі необхідності, для кожної з піднесучих може розраховуватись свій частотний зсув. Для цього оцінка доплерівського зсуву частоти F_{dop} , отримана по пілот-сигналу, перераховується у абсолютне значення радіальної швидкості рухомого носія (БПЛА) за виразом $V_r = \lambda \cdot F_{dop}$, де λ - довжина хвилі пілот-сигналу. Далі для кожної i -ої піднесучої розраховується частотна поправка за виразом $F_{dop,i} = V_r / \lambda_i$, яка з протилежним знаком використовується при формуванні часових відліків ЦАП у сеансі передачі даних.

Певним недоліком методу випереджувальної компенсації у передавачі є необхідність розширення смуги частот, в якій має зберігатись лінійність аналогового тракту передаваль-

ного сегменту. Хоча зазначене розширення робочої смуги є порівняно невеликим, при значній потужності сигналів кожен додатковий кілогерц лінійної передачі може коштувати дорого. Крім того, не слід забувати про позасмугове випромінювання, для пригнічення якого бажано максимально звужувати ефективну смугу передачі. Тому як альтернативний підхід у випадку N-OFDM може пропонуватись компенсація доплерівського зсуву на етапі цифрової обробки прийнятих сигналів.

Як і у випадку випереджувальної компенсації при передачі сигналів, усунення впливу доплерівських зсувів частоти у приймачі радіолінії зв'язку спирається на оцінку частоти Доплера F_{dop} по пілотному сигналу. Надалі аналогічно може використовуватись спрощений варіант компенсації за припущення про інваріантність доплерівських еволюцій носійної частоти до номіналу піднесучих N-OFDM пакету. Зокрема, відома з [2] процедура оцінювання квадратурних складових сигналів по напругах синтезованих у результаті ШПФ частотних фільтрів

$$\hat{a}_m^{c(s)} = S^{-1} \cdot \det^{-1} \cdot \det_m^{c(s)}; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (1)$$

може бути модифікована заміною головного визначника на вираз

$$\det = \begin{vmatrix} f_1(w_1 + \Delta) & f_1(w_2 + \Delta) & \dots & f_1(w_M + \Delta) \\ f_2(w_1 + \Delta) & f_2(w_2 + \Delta) & \dots & f_2(w_M + \Delta) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ f_M(w_1 + \Delta) & f_M(w_2 + \Delta) & \dots & f_M(w_M + \Delta) \end{vmatrix}, \quad \text{в якому} \quad \Delta = 2\pi F_{dop},$$

$$f_j(w_m + \Delta) = \left(\sin S \cdot \left[j \cdot \frac{\pi}{S} - w_m - \Delta \right] \right) \left(\sin \left[j \cdot \frac{\pi}{S} - w_m - \Delta \right] \right)^{-1} - \text{значення амплітудно-частотної ха-}$$

рактеристики (АЧХ) синтезованого шляхом ШПФ j -го частотного фільтра, w_j, w_k, w_m - відомі частоти піднесучих, виражені в долях ширини головної "пелюстки" АЧХ ШПФ-фільтра, з множини заданих за умови відсутності доплерівського ефекту. Решта позначок в (1) тотожна наведеним у [2], а саме: S - розмірність (кількість точок) операції ШПФ, $\det_m^{c(s)}$ - визначник, отриманий заміною у головному визначнику \det відповідного стовпчика вектором вільних членів $[V^{c(s)}] = [U_1^{c(s)} \quad U_2^{c(s)} \quad \dots \quad U_M^{c(s)}]^T$, $U_j^{c(s)}$ - квадратурні складові комплексного відгуку j -го ШПФ-фільтра.

Більш точне врахування доплерівського ефекту полягає у заміні в (1) частотноінваріантної поправки $\Delta = 2\pi F_{dop}$ на величину $\Delta_m = 2\pi F_{dop,m}$, що залежить від номера піднесучої й визначається відповідним доплерівським зсувом частоти.

На відміну від OFDM, метод N-OFDM дозволяє компенсувати ефект Доплера не тільки шляхом внесення випереджувальних частотних зсувів при формуванні сигналів у передавачі радіолінії, а й на етапі обробки прийнятих сигналів. Можливе також поєднання обох зазначених підходів, що дозволить максимально мінімізувати похибки демодуляції й підвищить швидкість обміну даними з бортовою апаратурою БПЛА.

Література:

1. Tiejun (Ronald) Wang, John G. Proakis, Elias Masry, and James R. Zeidler. Performance Degradation of OFDM Systems due to Doppler Spreading // IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 5, No. 6, June 2006.

2. Слюсар В.И., Смоляр В.Г. Метод неортогональной дискретной частотной модуляции сигналов для узкополосных каналов связи // Радиоэлектроника. Изв. высш. учеб. заведений. - 2004. - № 4. - С. 53 - 59.