

УДК 621.396

В.І. СЛЮСАР<sup>1</sup>, О.О. ТРОЦЬКО<sup>2</sup><sup>1</sup>Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Україна<sup>2</sup>Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «КПІ», Україна

## МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ГАРАНТОЗДАТНОГО ЗВ'ЯЗКУ З БПЛА З ВРАХУВАННЯМ ЕФЕКТУ ДОПЛЕРА

Розглянуто методи компенсації доплерівського зсуву частоти, який виникає в лініях зв'язку з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) через великі швидкості їх руху відносно наземних кореспондентів. Запропоновано використання неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM) сигналів, яка дає змогу застосовувати сукупність методів компенсації доплерівського зсуву частоти на передавальній стороні (випереджувальної компенсації) та на прийомній стороні (компенсації на етапі цифрової обробки), що гарантуватиме максимальне врахування ефекту Доплера.

**Ключові слова:** безпілотний літальний апарат, ефект Доплера, неортогональна частотна дискретна модуляція, пілот-сигнал, частотний зсув.

### Вступ

Будь-яка технічна система рано чи пізно застаріває, і на зміну їй приходиться нова, досконаліша. Подібні зміни відносно авіації вже відбулися в світі. Створюється все більше і більше літаків, які управляються без допомоги пілота. Перед цими безпілотними літальними апаратами (БПЛА) ставиться багато різних задач, у різних сферах сучасного життя. Так, одним з перспективних напрямів розвитку телекомунікаційних систем, що окреслилися в останні роки, є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у якості ретрансляторів, що виконують завдання з організації радіозв'язку і ретрансляції повідомлень та даних [1, 2]. Однак, високі швидкості руху БПЛА відносно землі призводять до виникнення ефекту Доплера, тому, наприклад, при застосуванні модуляції OFDM у системах зв'язку необхідно враховувати певні її властивості [3]: залежність правильного декодування даних від ефекту Доплера; неоптимальне використання частотного діапазону; особливості використання швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) для формування частотних фільтрів.

Так, при збільшенні доплерівського частотного зсуву для відповідності вимогам надійності зв'язку необхідний достатній захисний інтервал OFDM-сигналу, однак як наслідок відбувається зростання невикористаної області задіяного частотного діапазону. До цього ефекту також призводить збільшення кількості підканалів.

Основною проблемою використання операції ШПФ, що не згадується в описах стандартів зв'язку на основі OFDM, і про наявність якої не вказують

автори публікацій, що поверхнево розглядають фізику процесу обробки, є паразитні фазові викривлення комплексних амплітуд сигналів. Ці викривлення супроводжують ШПФ. При використанні QAM-алгоритмів модуляції вони не дозволяють достовірно декодувати інформацію. Отже, якщо не вжити запобіжних заходів, доплерівські зсуви частоти можуть викликати погіршення якості демодуляції OFDM-сигналів і часті відмови каналів зв'язку [3], що не дозволяє гарантувати якісне надання послуг зв'язку.

Альтернативним підходом до частотного розподілу вузькосмугових інформаційних підканалів є застосування методу неортогональної частотної дискретної модуляції (N-OFDM), що базується на використанні надрелеївського частотного ущільнення сигналів при дотриманні вимог до якості зв'язку [4, 5].

Суттєвою відмінністю цього підходу є те, що частоти підканалів можуть не співпадати з максимумами амплітудно-частотних характеристик (АЧХ) частотних фільтрів, синтезованих при операції ШПФ, і бути рознесеними за частотою менше, ніж на ширину окремо взятого фільтру. Це дозволяє досить органічно врахувати доплерівський зсув частоти у разі його виникнення. Компенсація впливу ефекту Доплера при використанні N-OFDM сигналів складається з двох етапів.

### Основна частина

Початковим етапом, як відомо, є оцінка величини цього зсуву на етапі входження у зв'язок за допомогою пілот-сигналів. Для цього може викори-

стовуватися, наприклад, відповідна модифікація методу оцінювання [6].

Як найпростіший варіант компенсації доплерівського зсуву може розглядатися попередня зміна несучої частоти випромінюваного сигнального пакету у сторону, протилежну напрямку доплерівського зсуву. Таку випереджену компенсацію досить нескладно зробити у процесорі формування цифрових сигналів, що мають подаватися 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 виконуватися у спрощеному вигляді, коли для всіх сигналів багаточастотного пакету використовується однаковий частотний зсув, оцінений за частотою пілот-сигналу, який надходить з борту БПЛА.

Підставою для такого нехтування розбіжностями номіналів піднесучих частот у N-OFDM пакеті є відносно малі рівні частотних рознесень сигналів у порівнянні з абсолютним значенням несучої частоти.

Однак, у разі необхідності гарантування оптимального приймання, для кожної з піднесучих може розраховуватися свій частотний зсув. При цьому оцінка доплерівського зсуву частоти  $F_{\text{dop}}$ , отри-

мана по пілот-сигналу з БПЛА, перераховується у абсолютне значення радіальної швидкості рухомого носія (БПЛА) за виразом:

$$V_r = \lambda \cdot F_{\text{dop}}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі пілот-сигналу;  $F_{\text{dop}}$  – оцінка доплерівського зсуву частоти.

Далі для кожної  $i$ -ої піднесучої розраховується частотна поправка за виразом:

$$F_{\text{dop},i} = V_r / \lambda_i, \quad (2)$$

де  $\lambda_i$  – довжина хвилі  $i$ -ої під несучої; яка з протилежним знаком використовується при формуванні часових відліків ЦАП у сеансі передачі даних.

Певним недоліком методу випереджувальної компенсації доплерівських зсувів частоти у передавачі є необхідність розширення смуги частот, в якій має зберігатися лінійність аналогового тракту передавального сегменту.

Хоча зазначене розширення робочої смуги частот 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 пропонуватися компенсація доплерівського зсуву частоти перед демодуляцією на етапі цифрової об-

робки 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  $F_{\text{dop}}$  по пілот-сигналу.

Надалі аналогічно може використовуватися спрощений варіант компенсації ефекту Доплера за умови припущення про інваріантність доплерівських еволюцій несучої частоти до номіналу піднесучих N-OFDM пакету.

Пояснимо це на прикладі відомої процедури демодуляції сигналів у приймачі, що використовує метод максимальної правдоподібності за припущення про некорельованість і гауссовський розподіл шумів.

Відповідний інформаційний еквівалент функції правдоподібності для дійсної форми представлення суми  $M$  гармонійних сигналів має вигляд:

$$L = \sum_{s=1}^S \left\{ U_s - \sum_{m=1}^M a_m \cos(\omega_m \Delta t (s-1) + \phi_m) \right\}^2, \quad (3)$$

або, якщо позначити

$$a_m^c = a_m \cos \phi_m, \quad a_m^s = a_m \sin \phi_m, \quad p_{ms} = \omega_m \Delta t (s-1),$$

формула має вид:

$$L = \sum_{s=1}^S \left\{ U_s - \sum_{m=1}^M (a_m^c \cos p_{ms} - a_m^s \sin p_{ms}) \right\}^2 \quad (4)$$

$$= \min,$$

де,  $U_s$  – напруга сигнальної суміші в  $s$  – у часовому відліку;

$a_m$  – амплітуда  $m$ -го гармонічного сигналу;

$S$  – загальна кількість часових відліків, що піддаються обробці ( $S \geq 2M$ );

$s$  – порядковий номер відліку АЦП в межах сигнальної вибірки;

$\omega_m$  – відома радіальна частота  $m$ -ї піднесучої з множини заданих за умови відсутності доплерівського ефекту;

$\phi_m$  – початкова фаза  $m$ -го сигналу.

Приведена процедура компенсації доплерівського зсуву частоти на етапі цифрової обробки прийнятих сигналів може бути модифікована введенням у частотно залежний аргумент  $p_{ms}$  поправки доплерівського зсуву частоти  $\Delta_D$ , а саме:

$$p_{ms} = (\omega_m + \Delta_D) \Delta t (s-1), \quad (5)$$

де

$$\Delta_D = 2\pi F_{\text{dop}}. \quad (6)$$

Більш точне врахування доплерівського зсуву частоти полягає у заміні частотноінваріантної поправки (6) на величину:

$$\Delta_{D,m} = 2\pi F_{\text{dop},m}, \quad (7)$$

що залежить від номера піднесучої частоти і визначається відповідним доплерівським зсувом та використовується при формуванні сигнальних матриць демодуляції даних.

### Висновки

Таким чином, 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. Врахування доплерівських зсувів при цьому може здійснюватись, як для всього пакету, так і для кожної піднесучої частоти окремо.

Поєднання обох зазначених підходів до компенсації частотного зсуву гарантуватиме максимальне врахування ефекту Доплера, що дозволить мінімізувати похибки демодуляції й підвищить швидкість гарантоздатного обміну даними з бортовою апаратурою БПЛА, що мають високі швидкості руху.

### Література

1. Романюк В.А. Мобильные радиосети – перспективы беспроводных технологий / В.А. Романюк

// *Сети и телекоммуникации*. – 2003. – № 12. – С. 62-68.

2. Илюшко В.М. Система передачи данных на базе высотного беспилотного летательного аппарата / В.М. Илюшко, Т.Н. Нарытник. – Зв'язок. – 2004. – № 7. – С. 38-39.

3. Tiejun R.W. Performance Degradation of OFDM Systems due to Doppler Spreading / Wang (Ronald) Tiejun, Proakis G. John, Masry Elias, Zeidler R. James // *IEEE Transactions on Wireless Communications*, June 2006. – Vol. 5, No. 6. –P. 25-37.

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

5. Слюсар В.И. . Частотное уплотнение каналов связи на основе свёрхрелеевского разрешения сигналов / В.И. Слюсар, В.Г. Смоляр // *Радиоэлектроника. Изв. высш. учеб. заведений*. – 2003. – № 7. – С. 30-39.

6. Слюсар В.И. Измерение периода дискретизации АЦП по сигналу известной частоты / В.И. Слюсар // *Радиоэлектроника*. – 1998. – № 5. – С. 43 -47.

Поступила в редакцию 12.02.2008

**Рецензент:** к-т техн. наук, проф. кафедры В.В. Варич, Военный институт телекоммуникаций и информатизации Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”, Полтава.

### МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГАРАНТОСПОСОБНОЙ СВЯЗИ С БПЛА С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ДОПЛЕРА

*В.И. Слюсар, А.А. Троцко*

Рассмотрены методы компенсации доплеровского смещения частоты, возникающего в линиях связи с беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) вследствие больших скоростей их движения относительно наземных корреспондентов. Предложено использование неортогональной частотной дискретной модуляции (N-OFDM) сигналов, позволяющей применять совокупность методов компенсации доплеровского сдвига частоты на передающей стороне (опережающей компенсации) и на приемной стороне (компенсации на этапе цифровой обработки), что будет гарантировать максимальный учет эффекта Доплера при демодуляции данных.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, эффект Доплера, неортогональная частотная дискретная модуляция, пилот-сигнал, частотный сдвиг.

### METHODS OF MAINTENANCE OF THE GUARANTEED COMMUNICATION WITH UAV TAKING INTO ACCOUNT DOPPLER'S EFFECT

*V.I. Slyusar, A.A. Trocko*

Indemnification methods Doppler shift of frequency which arises in communication lines with UAV because of the big speeds of their movement concerning land correspondents are considered. Use of not orthogonal frequency discrete modulation (N-OFDM) signals which gives the chance to apply set of methods of indemnification Doppler frequency shift on the transfer side (advancing indemnification) and on the reception side (indemnification at a stage of digital processing) is offered, that will guarantee the maximum account of effect of Doppler.

**Key words:** unmanned aerial vehicles, Doppler's effect, not orthogonal frequency discrete modulation, the pilot-signal, frequency shift.

**Слюсар Вадим Іванович** – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння і військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна, e-mail: swadim@inbox.ru.

**Троцько Олександр Олександрович** – ад'юнкт Військового інституту телекомунікацій та інформатизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна, e-mail: trocko\_aa@mail.ru.