

АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 621.396.17.(07)

М.А. Міхалочкін, д-р техн. наук
В.П. Харченко, д-р техн. наук**ПРИНЦИП ВІДНОСНОСТІ В НАВІГАЦІЇ
НА ПРИКЛАДІ ДОПЛЕРІВСЬКОГО ВИМІРНИКА ШВИДКОСТІ**

НАУ, кафедра аеронавігаційних систем, e-mail: ans@nau.edu.ua

Проведено аналіз похибок радіонавігаційних систем, пов'язаних з умовами відносного руху приймача й передавача, розміщених на рухомих об'єктах, тобто релятивістськими ефектами. Розроблено методику оцінки прискорення з допомогою доплерівського вимірника прискорення одного повітряного корабля відносно іншого.

Постановка проблеми

Інтерес представляє доплерівський вимірник швидкості, принцип дії якого ґрунтується на релятивістській теорії радіонавігації, і можливість вимірювати з його допомогою прискорення.

Аналіз останніх досліджень

На сьогодні у відкритих джерелах інформації відомостей про оцінку прискорення з допомогою доплерівського вимірника швидкості не виявлено.

Формулювання мети статті

У цій статті розглянуто можливості вимірювання прискорення повітряного корабля доплерівським методом.

Виклад основного матеріалу

Принцип відносності в навігації викликає цікавість. Розглянемо взаємозв'язок між основним завданням навігації, що зводиться до вимірювання параметрів відносного руху тіл, і принципом відносності, на якому базується сучасна теорія навігації.

З механіки відомо, що стан механічної системи в даний момент часу визначається координатами і швидкістю відносно будь-якої системи відліку. Співвідношення, що пов'язують прискорення з координатами й швидкостями, можна одержати з рівнянь руху системи. Для опису фізичних явищ у найбільш зручній і простій формі використовують інерціальні системи відліку.

А. Ейнштейн, узагальнюючи принцип відносності, дійшов висновку, підтвердженого практикою, що взагалі ніякими дослідами, проведеними тільки усередині такого об'єкта, будь те механічні, електричні, магнітні, світлові та ін., не можна визначити координати місцезнаходження, швидкість і напрям руху об'єкта щодо зовнішньої інерціальної системи відліку.

Розглянемо особливості навігаційних вимірювань під час неінерціального руху об'єкта.

Як відомо з курсу фізики, прискорення мають абсолютний характер. Спостерігач, що перебуває всередині об'єкта, виявить прискорений рух завдяки тому, що на нього буде діяти перевантаження. Усі інші вимірювальні пристрої, засновані на механічних, електричних, оптичних і інших принципах дії, також будуть реагувати на перевантаження і тим самим установлять факт прискореного руху об'єкта без використання якої-небудь зовнішньої навігаційної інформації.

Згідно з одним із постулатів, прискорення може бути виявлено будь-якими механічними, електромагнітними, світловими й іншими методами вимірювань [1].

Найвища точність, як показала практика, властива радіотехнічним навігаційним системам (РНС). Це пояснюється тим, що вимірюваними фізичними величинами в них є параметри радіохвилі: час поширення, частота, фаза, поляризація. Рівень же метрологічного забезпечення вимірювань цих величин серед інших найбільш високий, оскільки сучасні еталони часу й частоти мають радіотехнічну природу й гранично високі характеристики точності. Однак сучасні РНС досягли такого рівня розвитку, коли подальше підвищення їхньої точності вже неможливо без урахування явищ, викликаних впливом гравітаційного поля й відносного руху приймача й передавача.

Ці явища пояснюються теорією відносності та часто називаються релятивістськими ефектами (від латинського *relativus* – відносний).

Сучасна теорія радіонавігації базується на великій кількості методів вимірювань, систем і комплексів. Інтерес представляє доплерівський вимірник швидкості, принцип дії якого ґрунтується на релятивістській теорії радіонавігації.

Ефект Доплера полягає, як відомо, у вимірюванні частоти спостережуваних коливань, якщо спостерігач і джерело випромінювання рухаються один відносно одного.

Завдання зводиться до визначення частоти відбитих коливань порівняно з випромінюваними.

Уважають, що частота коливань, які приймає рухомий літак, дорівнює [2]

$$f_{\text{вд}} = f_0 \left(1 - 2 \frac{W_1}{\lambda_0} \cos \gamma_0 \right), \quad (1)$$

де $f_0, f_{\text{вд}}$ – частоти електромагнітних коливань (ЕМК) передавача й приймача (ПРМ) відповідно; $W_{\text{п}}$ – шляхова швидкість літака; γ_0 – кут нахилу променя – кут між поздовжньою віссю літака й поверхнею Землі; λ_0 – довжина хвилі ЕМК.

Однак вираз (1) відрізняється від класичного точного виразу для визначення частоти відбитих коливань

$$f_{\text{вд}} = f_0 \frac{c - W}{c + W}, \text{ якщо } \gamma_0 = 0, \quad (2)$$

де c, W – швидкості світла і літака в напрямку випромінювання ЕМК.

При подальшому розгляді ефекту Доплера від класичного виразу (2) для відбитої хвилі ЕМК переходять до наближеного (1) шляхом розкладання (2) у ряд Маклорена вигляду

$$f_{\text{вд}} = f_0 \left(1 - \frac{2W}{c} + \frac{2W^2}{c^2} - \dots \right)$$

і, нехтуючи членами другого порядку малості й вище, одержують вираз

$$f_{\text{вд}} \approx f_0 \left(1 - \frac{2W_1}{c} \right), \text{ якщо } \gamma_0 = 0. \quad (3)$$

Якщо $\gamma_0 \neq 0$ вираз має вигляд (1).

На підставі умови (3) і з урахуванням кута нахилу променя доплерівський зсув частоти $F_{\text{д}}$ буде дорівнювати різниці f_0 й $f_{\text{вд}}$:

$$F_{\text{д}} = f_0 - f_{\text{вд}} = \frac{2W_1}{\lambda_0}, \text{ якщо } \gamma_0 = 0;$$

$$F_{\text{д}} = f_0 - f_{\text{вд}} = \frac{2W_1}{\lambda_0} \cos \gamma_0, \quad (4)$$

де $\lambda_0 = \frac{f_0}{c}$.

Отже, швидкість літака буде дорівнювати

$$W_1 = \frac{F_{\text{д}} \lambda_0}{2 \cos \gamma_0}.$$

Зауважимо, що за доплерівським зсувом частоти в нашому випадку визначається шляхова швидкість літака.

Проведемо аналогічні міркування під час обчислення другого члена ряду Маклорена.

Маємо

$$f_{\text{вд}} = f_0 \left(1 - \frac{2W}{c} + \frac{2W^2}{c^2} \right). \quad (5)$$

Розкриваючи дужки у формулі (5), дістанемо

$$f_{\text{вд}} = f_0 - f_0 \frac{2W}{c} + f_0 \frac{2W^2}{c^2}$$

або

$$f_0 - f_{\text{вд}} = f_0 \frac{2W}{c} - f_0 \frac{2W^2}{c^2}.$$

Тоді

$$F_{\text{д}} = \frac{2W}{\lambda_0} - \frac{2W^2}{\lambda_0}.$$

Доплерівський зсув можна подати у вигляді двох доданків:

$$F_{\text{д}} - \Delta F_{\text{д}} = \frac{2W}{\lambda_0} - \frac{2W^2}{c \lambda_0}. \quad (6)$$

Оскільки перші доданки в обох частинах виразу (5) рівні і відповідають залежності (4), можна вважати, що рівність (6) містить доданок

$$\Delta F_{\text{д}} = \frac{2W^2}{c \lambda_0}. \quad (7)$$

Розділивши таким чином тотожність (6) на дві частини, побачимо пропорційний приріст частоти $\Delta F_{\text{д}}$ 1 с^2 , тобто Гц^2 , що рівносильно пропорційності прискоренню рухомого об'єкта.

Уведемо у вираз (7) нові змінні a і R та перепишемо його

$$\Delta F_{\text{д}} = \frac{2aR}{c \lambda_0},$$

де $aR = W^2$.

Розв'язуючи його відносно змінної a , дістанемо

$$a = \frac{\Delta F_{\text{д}} \tilde{n} \lambda_0}{2R}. \quad (8)$$

Аналіз співвідношення (8) показує, що змінна a – це прискорення руху об'єкта, що прямо пропорційне приросту $\Delta F_{\text{д}}$ доплерівського зрушення частоти, довжині хвилі й обернено пропорційне подвоєній відстані літака до поверхні Землі.

При цьому як постійний коефіцієнт виступає швидкість поширення електромагнітних хвиль.

Залежність (8) можна переписати у вигляді

$$a = c \frac{\Delta F_{\text{д}} \lambda_0}{2R}.$$

Висновок

Таким чином, з'являється можливість вимірювати прискорення за допомогою доплерівського вимірника швидкості, а в перспективі комплексувати його з іншими не радіотехнічними вимірниками прискорень. Члени розкладання ряду Маклорена вищого порядку малості утворюють залишкову суму й можуть уважатися методичною помилкою розглянутого підходу.

Досить поширене комплексування радіотехнічних вимірників з курсовертикалями, інерціальними навігаційними системами (ІНС) та іншими системами, що мають нерадіотехнічну природу.

Процесу об'єднання радіотехнічних і нерадіотехнічних вимірників передуює вибір загальної системи координат (СК), що дозволяє враховувати найбільшу кількість змінних при спільній обробці, або такі СК, для яких існують рівняння зв'язку (перетворення) одних змінних та інших у третю загальну СК, залишаючи можливість працювати кожному зразкові у своїх СК.

Як загальна СК застосовується і географічна СК, що є інформаційною системою вимірювачів, які комплексовані.

При цьому ІНС реалізує числення шляху в цей СК, що знаходить висвітлення в рівняннях кінематики ІНС, куди входять змінні прискорення по складових осях.

Визначення складових вектора шляхової швидкості доплерівським вимірником виробляється в літаковій СК при нерухомій антені, що зв'язана відомими співвідношеннями зі СК, осі якої задаються ІНС, реалізуючи географічний тригранник.

Отже, у нашому випадку, з'являється можливість уточнювати координати числення шляху літака з використанням інформації про прискорення від обох вимірників, одержуючи вигоду у точності й інших характеристиках за рахунок істотного розходження спектрів їхніх сигналів.

Література

1. *Фізика* для інженерних спеціальностей. Кредитно-модульна система: Навч. посіб. Ч.І / В.В. Куліш, А.М. Соловійов, О.Я. Кузнєцова, В.М. Кулішенко. – К.: НАУ, 2004. – 456 с.
2. *Дудко Г.К., Резников Г.Б.* Допплеровские измерители скорости и угла сноса. – М.: Сов. радио, 1964. – 450 с.

Стаття надійшла до редакції 12.12.05.

Проведен анализ ошибок радионавигационных систем, связанных с условиями относительного движения приёмника и передатчика, размещенных на подвижных объектах, т. е. релятивистскими эффектами. Разработана методика оценки ускорения с помощью доплеровского измерителя ускорения одного воздушного судна относительно другого.

There is considered in article the analysis of radio navigation system errors, are determined by the requirements according to the movement of receiver, and transmitter, which are located on the moving objects, i.e. by the "relativists" phenomena; is represented the estimation methodic of acceleration using other Doppler's device and the acceleration of one aircraft relative to another.