

depending on the informative signs of the images. The model of the formation process of the solving function of the combined correlation-extreme navigation system is clarified, taking into account the influence of the three-dimensional shape of the sighting objects and random changes in the spatial position of the flying apparatus. Relations are obtained for describing the current images of the sighting surface in the radiometric and television channels of a combined correlation-extreme navigation system, taking into account the three-dimensional shape of the objects of interference and random changes in the spatial position of the aircraft caused by the turbulence of the atmosphere. An expression describing the process of formation of the solving function of a combined correlation-extreme navigation system is presented. Variants of the scenario for the formation of a decisive function are presented depending on the conditions of the operational-tactical situation. The expediency of forming a single standard for television and radiometric channels of a combined correlation-extreme navigation system is substantiated.

**Keywords:** combined correlation-extreme navigation system, current image, sighting surface, decision function.

УДК 623.55.02

О.І. Тимочко<sup>1</sup>, С.В. Герасимов<sup>1</sup>, В.О. Лабунець<sup>2</sup>, О.К. Климович<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>2</sup>Генеральний штаб Збройних Сил України, Київ

<sup>3</sup>Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

## ОЦІНЮВАННЯ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ РАДІОКАНАЛУ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА У МІСЬКИХ УМОВАХ

Розглядається метод оцінювання завадозахищеності каналу радіозв'язку безпілотних літальних апаратів при діях у міських умовах для випадків розташування джерел навмисних завад на будинках, спорудах тощо. Стійкий радіозв'язок між підрозділами у міських умовах забезпечується шляхом урахування тривимірності діаграми спрямованості антен та висот ймовірного розташування джерел навмисних завад. Програмна реалізація запропонованого методу дозволяє розв'язати задачу побудови максимальної за розміром зони стійкого радіозв'язку для конкретної оперативної обстановки.

**Ключові слова:** радіоелектронне придушення, радіозавади, канал радіозв'язку, діаграма спрямованості.

### Постановка проблеми

Оцінювання можливостей протистояння засобам радіопридушення каналів радіозв'язку є обов'язковим заходом при плануванні та під час виконання завдань правоохоронної діяльності. Сучасні засоби постановки навмисних завад (НЗ) мають всі необхідні технічні характеристики для їхнього застосування в умовах безпосереднього контакту протиборчих сторін, особливо при виконанні завдань правоохоронної діяльності у міських умовах, в умовах прямої видимості, яка обмежується сотнями метрів. Це робить необхідним для забезпечення стійкого радіозв'язку використання додаткових засобів захисту від навмисних завад (ДЗЗНЗ) у вигляді нестандартних скритих мобільних екранів та направлених антен, наприклад, розташованих на безпілотних літальних апаратах (БПЛА) [1, 2].

Обмежений оперативний простір, особливо при виконанні завдань правоохоронної діяльності в міських умовах, вимагає точного визначення можливих варіантів розташування радіозасобів відносно

засобів постановки НЗ. Оптимальна орієнтація ДЗЗНЗ з діаграмами спрямованості (ДС) нестандартної форми дозволяє збільшити зони стійкого радіообміну, які при цьому, як правило, мають неправильну форму [2]. Практика використання ДЗЗНЗ показує, що досягти достатнього рівня стійкості каналів радіозв'язку при впливі навмисних завад можливо лише у певному просторі, єдиним шляхом визначення якого є імітаційне моделювання [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показує, що недоліком методу побудови зони досяжності, запропонованого у роботах [2, 3], є відсутність врахування різних висот ймовірного розташування джерел навмисних завад, які можуть знаходитись в будинках, спорудах і т. ін., що є цілком ймовірним у міських умовах. Урахування тривимірності ДС антен дозволить підвищити точність орієнтації ДЗЗНЗ, як по азимуту, так і по куту місця та більш точно розв'язати задачу побудови зони досяжності, у межах якої забезпечується стійкий радіозв'язок між підрозділами при виконанні завдань правоохоронної діяльності.

**Мета статті.** Удосконалення методу побудови зони досяжності, у межах якої забезпечується стійкий радіозв'язок між підрозділами у міських умовах шляхом урахування тривимірності ДС антен та різних висот ймовірного розташування джерел навмисних завад, особливо при використанні БПЛА для забезпечення зв'язку.

### Виклад основного матеріалу

У міських умовах площі є на порядок або два меншими порівняно з площами, на яких звичайно проводяться загальновійськові операції Збройних Сил України. Враховуючи це, головним завданням є забезпечення стійкого радіозв'язку на якомога більшій площі розміщення своїх військ. Звідси випливає, що за критерій ефективності методу підвищення стійкості радіозв'язку між підрозділами в міських умовах можна прийняти цільову функцію, яка враховує відношення між площею стійкого радіозв'язку із залученням заходів захисту та без таких [2]

$$F(X) = [1 - S_0(X) / S_z(X)] \rightarrow \max, \quad (1)$$

де  $X$  – вектор параметрів;  $S_z$  – площа стійкого обміну із захистом;  $S_0$  – площа стійкого обміну без захисту.

У склад вектора параметрів  $X$  входить множина параметрів засобів радіоелектронного впливу (кількість джерел завад, їх потужність, просторові координати, орієнтація антенних систем та ін.).

За результатами робіт [2, 3] для комплексу радіоелектронного придушення, який складається з  $N$  джерел завад, розміри площ  $S_z$  та  $S_0$  залежать від коефіцієнта придушення радіоелектронних засобів (РЕЗ) підрозділу, який оцінюється співвідношенням

$$K_n(\theta_o) = \frac{R_c^2}{P_{npdc} G(\theta_c - \theta_o)} \sum_{i=1}^N \frac{P_{npdz_i} G(\theta_{z_i} - \theta_o)}{R_{z_i}^2}, \quad (2)$$

де  $P_{npdz}$  – потужність передавача корисного радіосигналу центра зв'язку;  $P_{npdz_i}$  – потужність передавача  $i$ -ї завади ( $i = 1..N$ );  $R_c$  – відстань між передавачем центру зв'язку та радіоприймачем мобільної групи;  $R_{z_i}$  – відстань між радіоприймачем мобільної групи та передавачем  $i$ -завади ( $i = 1..N$ );  $\theta_c$  – кут напрямку ДС мобільного засобу РЕЗ від НЗ на передавач центру зв'язку;  $\theta_{z_i}$  – кут напрямку ДС мобільного засобу РЕЗ від НЗ на передавач  $i$ -ї завади ( $i = 1..N$ ).

Отже, вектор параметрів, що оптимізуються, у задачі (1) має вигляд

$$X = (P_{npdc}, P_{npdz}, R_c, R_{z_i}, \theta_c, \theta_{z_i}, \theta_o), \quad (i = 1..N). \quad (3)$$

Оскільки потужності передавачів можна вважати фіксованими, а можливості маніпулювання відстанями у міських умовах є обмеженими, на перший план виходить розв'язання задачі (1) шляхом вибору для

мобільного засобу РЕЗ від НЗ у кожній точці  $S_z$  оптимального кута  $\theta_o^*$  зі співвідношення (2), такого, що

$$K_n(\theta_o^*) = \min K_n(\theta_o). \quad (4)$$

Узагальнюючи сказане, можна сформулювати правило визначення площі стійкого обміну із захистом  $S_z$  у задачі (1) для точок оперативної мапи  $x, y \in \Omega$  ( $\Omega$  – множина точок оперативної мапи, що належать області виконання завдань правоохоронної діяльності) наступним чином:

$$K_n(x, y, \theta_o) = \frac{R_c^2}{P_{npdc} G(\theta_c - \theta_o)} \sum_{i=1}^N \frac{P_{npdz_i} G(\theta_{z_i} - \theta_o)}{R_{z_i}^2}, \quad (5)$$

$$R_c = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2},$$

$$R_{z_i} = \sqrt{(x - x_{z_i})^2 + (y - y_{z_i})^2}, \quad i = 1..N,$$

де  $x_c, y_c$  – координати джерела корисного сигналу центру зв'язку на мапі;  $x_{z_i}, y_{z_i}$  – координати  $i$ -го джерела завади на мапі ( $i = 1..N$ );  $K_{nop}$  – порогове значення коефіцієнта придушення, яке для мобільних засобів зв'язку становить 10 дБ.

Для площі стійкого обміну без захисту  $S_0$  відповідно маємо:

$$S_o = \{ \forall (x, y) \in \Omega [K_n(x, y, \theta_o) \leq K_{nop}] \}, \quad (6)$$

$$K_n(\theta_o) = \frac{R_c^2}{P_{npdc}} \sum_{i=1}^N \frac{P_{npdz_i}}{R_{z_i}^2}.$$

Для урахування можливості розташування джерел навмисних завад на певній висоті у співвідношення (2–4) введемо тривимірну функцію коефіцієнта підсилення ДС антенного пристрою засобу РЕЗ від НЗ  $G(\theta, \varphi)$ , де  $\theta$  – кут азимуту, а  $\varphi$  – кут місця цілі. Характеристики просторової діаграми спрямованості мобільного діаграмо-спрямовуючого пристрою за наявності відповідних креслень можна обчислити за технологією HFSS [4].

Тоді вираз (2) можна записати наступним чином [3, 5, 6]

$$K_n(\theta_o, \varphi_o) = \frac{R_c^2}{P_{npdc} G(\theta_c - \theta_o, \varphi_o)} \times \sum_{i=1}^N \frac{P_{npdz_i} G(\theta_{z_i} - \theta_o, \varphi_{z_i} - \varphi_o)}{R_{z_i}^2}, \quad (7)$$

де  $\varphi_z$  – кут місця ДС з точки розташування підрозділу на точку розташування засобу РЕЗ;

$\varphi_o$  – власний кут місця ДС антенного пристрою захисту РЕЗ підрозділу.

Таким чином, вектор параметрів у задачі (1) для даного випадку має вигляд

$$X = (P_{npdc}, P_{npdz}, R_c, R_{z_i}, \theta_c, \theta_{z_i}, \varphi_{z_i}, \theta_o, \varphi_o), \quad (i = 1..N), \quad (8)$$

а задача боротьби з радіоелектронним придушенням розв'язується шляхом вибору оптимальних кутів азимуту  $\theta_0^*$ , та місця  $\varphi_0^*$ , таких, що

$$K_n(\theta_0^*, \varphi_0^*) = \min K_n(\theta_0, \varphi_0). \quad (9)$$

Відповідно співвідношення (5) для визначення площі стійкого обміну із захистом  $S_z$  у задачі (1) змінюються наступним чином:

$$S_z^* = \{ \forall (x, y) \in \Omega | K_n(x, y, \theta_0^*, \varphi_0^*) = \min K_n(x, y, \theta_0, \varphi_0) \leq K_{nop} \}$$

$$K_n(x, y, \theta_0, \varphi_0) = \frac{R_c^2}{P_{npdc} G(\theta_c - \theta_0, \varphi_0)} \times \sum_{i=1}^N \frac{P_{npdz_i} G(\theta_{z_i} - \theta_0, \varphi_{z_i} - \varphi_0)}{R_{z_i}^2}. \quad (10)$$

Замість співвідношення (6) для площі стійкого обміну без захисту  $S_0$  відповідно маємо:

$$S_0 = \{ \forall (x, y) \in \Omega | K_n(x, y) \leq K_{nop} \}, \quad (11)$$

$$K_n(x, y) = \frac{R_c^2}{P_{npdc}} \sum_{i=1}^N \frac{P_{npdz_i}}{R_{z_i}^2}.$$

Впровадження одержаних співвідношень (7–11) у програмний комплекс [2] розширило його функціональні можливості, оскільки дозволило обчислювати оптимальну орієнтацію засобу мобільного захисту як по азимуту, так і по куту місця, а також визначати на мапі максимальну за розміром зону досяжності  $S_z$ , у межах якої забезпечується стійкий радіозв'язок між мобільними групами в умовах міста.

Порівняльний аналіз впливу різних типів антенних систем ДЗЗНЗ на розмір зони стійкого радіообміну можна провести за результатами розрахунків для часткового випадку, наведеного на рис. 1.

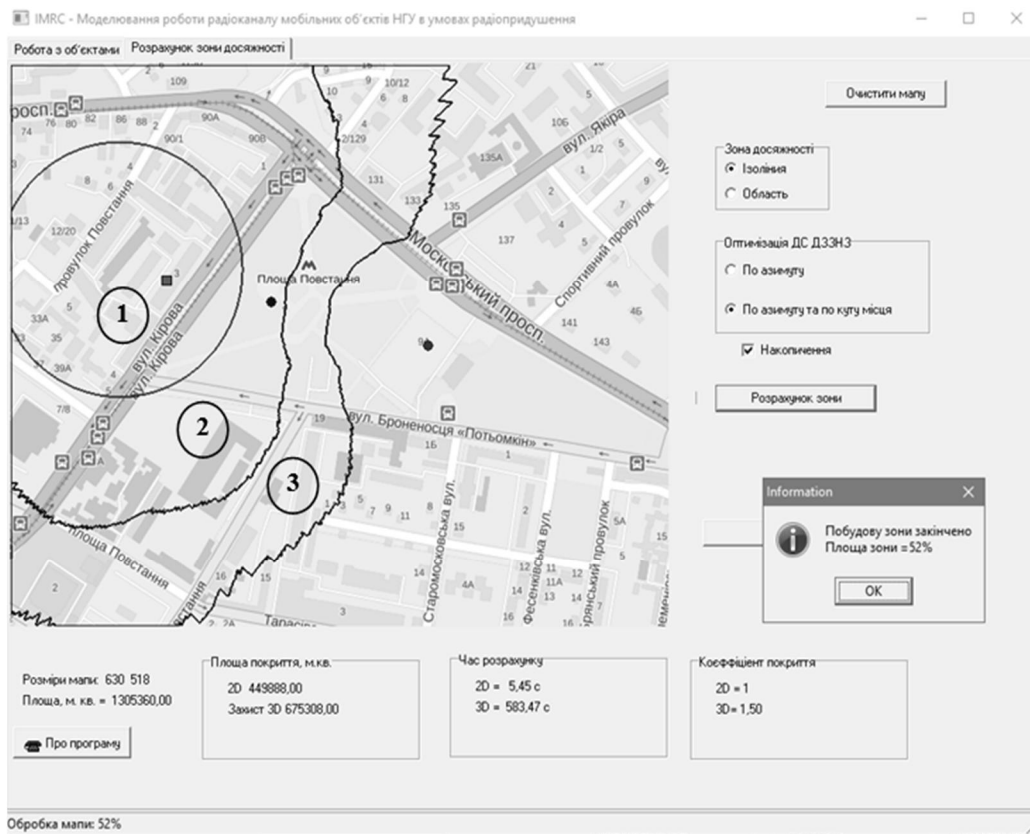


Рис. 1. Зони стійкого радіообміну з використанням ДЗЗНЗ з ДС різних типів

На рис. 1 межі зони  $S_0$  (область 1) одержані для випадку, коли мобільна група працює без захисту каналу радіообміну, тобто не використовує ДЗЗНЗ, а застосовує звичайні засоби радіозв'язку зі штирвою антеною. Межі зони  $S_z$  (область 2) одержані для випадку, коли мобільна група використовує ДЗЗНЗ, для якого виконується оптимізація тільки по куту азимуту відповідно до співвідношення (4). Межі зони  $S_z^*$  (область 3) одержані для випадку, коли мобільна група використовує той самий ДЗЗНЗ, але для якого

виконується оптимізація по куту азимуту та по куту місця відповідно до співвідношення (9).

Форма і розміри зон стійкого радіообміну  $S_0$  та  $S_z$  відповідають наведеному у праці [2]. За результатами розрахунків площа зони стійкого радіообміну  $S_0$  становить 13% від загальної площі мапи,  $S_z$  зони – 34%, зони  $S_z^*$  – 52%. Таким чином, розміри зони стійкого радіообміну  $S_z^*$  збільшуються у 1,5 раза щодо площі та  $S_z$  у 4 рази щодо площі  $S_0$ .

### Висновки

Результати аналізу існуючих способів захисту від навмисних завад показали необхідність врахування об'ємності діаграм спрямованості антен зв'язку при забезпеченні захисту від засобів радіопридушення, які розташовуються на різних висотах.

У результаті проведеного дослідження було удосконалено метод побудови зони досяжності, у межах якої забезпечується стійкий радіозв'язок між підрозділами у міських умовах, шляхом урахування тривимірності діаграми спрямованості антен та висот ймовірного розташування джерел навмисних завад.

Програмна реалізація запропонованого методу дозволяє розв'язати задачу побудови максимальної за розміром зони стійкого радіозв'язку, для конкретної оперативної обстановки, більшої від відомих у 1,5 раза.

### Список літератури

1. Белокурський Ю.П. Удосконалення методу підвищення завадозахищеності системи радіозв'язку підрозділів Національної гвардії України [Текст] / Ю.П. Белокурський, О.М. Горбов, В.В. Лищенко // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2016. – Вип. 2 (28) – С. 35-37.
2. Іохов О.Ю. Комплексний метод підвищення завадостійкості радіоканалів мобільних об'єктів підрозділів

Національної гвардії України / О. Ю. Іохов, С. А. Горелишев, І. В. Кузьминич // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 2 (42). – С. 92-94.

3. Іохов О.Ю. Оцінювання завадостійкості каналу радіозв'язку тактичної ланки управління підрозділами внутрішніх військ методом імітаційного моделювання [Текст] / О.Ю. Іохов, І.В. Кузьмінч, В.Г. Малик, О.В. Северінов // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць Полтавського НТУ ім. Ю. Кондратюка. – 2013. – Вип. 3 (27). – С. 153–158.

4. HFSS Ansoft. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>.

5. Ломоносов С.Е., Павловский А.А., Подорожняк А.О., Герасимов С.В. Разработка методики наведения систем слежения радиотехнических средств контроля космического пространства при переходе антеннами области зенита // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС. – 2009. – Вип. 2 (20). – С. 50–52.

6. Герасимов С.В., Подорожняк А.О., Рачинський О.П. Застосування векторних аналізаторів для контролю за частотним розподіленням радіосигналів // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХУПС. – 2012. – Вип. 1 (7). – С. 105–108.

**Рецензент:** д.т.н., проф. В.В. Литвин, Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів.

### ОЦЕНИВАНИЕ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОКАНАЛА СВЯЗИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ГОРОДСКИХ УСЛОВИЯХ

А.И. Тимочко, С.В. Герасимов, В.А. Лабунец, О.К. Климович

Рассматривается метод оценки помехозащищенности канала радиосвязи беспилотных летательных аппаратов при действиях в городских условиях для случаев расположения источников преднамеренных помех на зданиях, сооружениях и т. п. Результаты анализа существующих способов защиты от преднамеренных помех показали необходимость учета объемности диаграмм направленности антенн связи при обеспечении защиты от средств радиоэлектронного подавления, которые располагаются на разных высотах. Устойчивая радиосвязь между подразделениями в городских условиях обеспечивается путем учета трехмерности диаграммы направленности антенн и высот вероятного расположения источников преднамеренных помех. Критерием эффективности метода повышения устойчивости радиосвязи между подразделениями в городских условиях принимается целевая функция, которая учитывает отношение между площадью устойчивой радиосвязи с привлечением мер защиты и без таковых. В состав вектора параметров входит множество параметров средств радиоэлектронного воздействия: количество источников помех, их мощность, пространственные координаты, ориентация антенных систем и т. д. Программная реализация предложенного метода позволяет решить задачу построения максимальной по величине зоны устойчивой радиосвязи для конкретной оперативной обстановки.

**Ключевые слова:** радиоэлектронное подавление, радиопомехи, канал радиосвязи, диаграмма направленности.

### EVALUATION OF RADIOCHANNEL POWERFUL SECURITY CONNECTION IN FREE-FLAT CLEANER UNIT IN CITY CONDITIONS

O. Timochko, S. Gerasimov, V. Labunets, O. Klimovich

The method of estimating the noise immunity of the radio communication channel of unmanned aerial vehicles under urban conditions for cases of the location of sources of intentional interference on buildings, structures, etc. The results of analysis of the existing methods of protection from intentional interference have shown the need to take into account the volumetric diagrams of the antennae of communication, electronic suppression, which are located at different altitudes. Stable radio communication between units in urban conditions is provided by taking into account the three-dimensionality of the antenna pattern and the heights of the probable location of sources of intentional interference. Therefore, the aim of the scientific article is to improve the method of constructing a reach zone within which stable radio communication between subdivisions in the city is ensured by taking into account the three-dimensionality of the antenna pattern and the various heights of the probable location of sources of intentional interference, which is especially characteristic when using unmanned aerial vehicles for communication. The criterion for the effectiveness of the method for increasing the stability of radio communication between subdivisions in urban conditions is the objective function, which takes into account the relationship between the area of stable radio communication with and without protection measures. The vector of parameters includes many parameters of the radioelectronic impact facilities: the number of sources of interference, their power, spatial coordinates, the orientation of the

antenna systems, etc. Taking into account the three-dimensionality of the antenna pattern will increase the accuracy of the orientation of additional means of protection against intentional interference, both in azimuth and on the angle of the place and more accurately solve the task of constructing an area of reach within which stable radio communication between power units is ensured. Software implementation of the proposed method allows to solve the problem of constructing a maximum zone of stable radio communication for a specific operational situation.

**Keywords:** radio-electronic suppression, radio interference, radio communication channel, directional diagram.

---

UDC: 531.383

V. Chikovani<sup>1</sup>, H. Tsiрук<sup>1</sup>, O. Korolova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Aviation University, Kyiv

<sup>2</sup>National Academy of Land Forces named after Hetman Petro Sakhajdachnyj, Lviv

### TRIPLE-MODE VIBRATORY GYROSCOPE

Coriolis vibratory gyroscope (CVG) is one of the chronologically latest gyroscopic technologies that appeared on the world market in the 90s of the last century. This technology has spread throughout the world for a relatively short time, mainly due to its micro-miniature version based on the micro-electro-mechanical system (MEMS), the so-called MEMS gyroscopes. There are two well-known modes of Coriolis vibratory gyro operation. These are rate mode and rate-integrating modes described in many works of different authors. There is also known dual mode CVG in which two abovementioned modes of operation have been combined in one gyro with automatic switching from one mode to another. Such a dual-mode CVG gains additional advantages over competing technologies, such as laser and fiber-optic gyroscopes. Recently, differential mode of operation for single mass CVG has been developed in Ukraine. It was shown that differential mode of operation has excellent external disturbances rejection properties.

This paper considers each mode of CVG operation and the questions of how to embed the differential mode into two first abovementioned ones to obtain triple-mode CVG which will widen application area and tighten position over competitive technologies. This triple-mode CVG can surely be realized in MEMS and non-MEMS gyros.

Thus, the following is defined, Differential CVG can be considered as third mode of operation for vibratory gyroscopes along with two well-known rate and rate-integrating ones. Differential mode of operation can be built-in the single gyro together with the two others, rate and rate-integrating modes, to implement triple-mode CVG. Triple-mode gyro can be implemented both for MEMS and non MEMS vibratory gyros.

Differential mode of operation has greater, than rate mode, external disturbances rejection factor and can be used when motion occurs in harsh environment.

Realization of triple mode CVG gives it highest «versatility» in comparison with competitive gyro technologies like ring laser gyro and fiber optic one.

**Keywords:** Triple-mode CVG, MEMS gyro, rate mode, rate-integrating mode, differential mode.

#### Introduction

Coriolis vibratory gyroscope (CVG) is one of the chronologically latest gyroscopic technologies that appeared on the world market in the 90s of the last century. This technology has spread throughout the world for a relatively short time, mainly due to its micro-miniature version based on the micro-electro-mechanical system (MEMS), the so-called MEMS gyroscopes.

There are two known modes of CVG operation: first one is a force-rebalance mode, where Coriolis force arising due to rotation is compensated for by the negative feedback control system, holding the vibratory standing wave in a fixed position close to an excitation electrode, and hence, rotates together with a gyro. In this case the

signal that compensates for the Coriolis force is proportional to angle rate. It is so-called rate mode of CVG operation. This mode of operation has been described in many works, for example [1–4].

The second mode is rate-integrating one, where Coriolis force is not compensated for. The quadrature signal is only compensated for to reduce measurement errors. In this mode of operation Coriolis force caused rotation of the vibratory standing wave relative to gyro and an angle of its rotation is proportional to an angle of a gyro rotation relative to the inertial space. Coefficient of proportionality between the angle of a gyro rotation relative to the inertial space and the angle of the standing wave rotation relative to gyro is called the