

М. В. Бахмат¹, Ю. І. Бударецький¹, Т. В. Лаврут¹, В. В. Бондарев²

¹ Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна

² Науково-дослідний центр ракетних військ і артилерії, Суми, Україна

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРУ ДОПЛЕРІВСЬКОГО СИГНАЛУ НА ВИХОДІ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОГО МОДУЛЮ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ВИМІРЮВАЧА ПАРАМЕТРІВ РУХУ

Мета статті – аналітичне та експериментальне визначення спектру доплерівського сигналу на виході приймально-передавального модулю радіолокаційного вимірювача параметрів руху. **Результати дослідження.** В статті наведені структурні схеми радіолокаційного вимірювача параметрів руху, який призначений для використання в автономних підсистемах навігації та топогеодезичної прив'язки наземних рухомих об'єктів. Наведені експериментальні данні підтверджують основні положення аналітичних досліджень. Показано, що ширина спектру доплерівського сигналу однозначно визначається шириною діаграми спрямованості приймально-передавальних антен. **Висновок.** Наведені експериментальні данні підтверджують основні положення аналітичних досліджень. Результати, що отримані в процесі дослідження призначені для подальшої розробки на їх підставі близьких до оптимальних алгоритмів визначення параметрів руху наземних рухомих об'єктів.

Ключові слова: навігаційні системи, вимірювачі параметрів руху.

Вступ

Аналіз проблеми та наукових публікацій. Сьогодні проблема оперативного отримання і використання даних щодо місця розташування здобула виключно актуальність. Так, за оцінками закордонних військових експертів 80% трудовитрат з організації управління процесами, що відбуваються, пов'язано з пошуком відповідей на питання: «Де знаходжусь?», «Куди рухатись?» [1].

Найбільш поширені засоби навігації та топогеодезичної прив'язки, що використовують данні супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) не завжди працездатні в критичних умовах. Тому для визначення місцеположення наземних рухомих об'єктів широко використовуються інерційні навігаційні системи (ІНС) і одометричні засоби навігації і топогеодезичної прив'язки, які доповнюють СРНС шляхом комплексування даних, що отримані за різними фізичними принципами, а в разі їх подавлення працюють в автономному режимі [2, 3]. **Метою даної статті** є аналітичне та експериментальне визначення спектру доплерівського сигналу на виході приймально-передавального модулю радіолокаційного вимірювача параметрів руху (РВПР).

Результати досліджень

Серед одометричних засобів навігації розрізняють контактні (механічні) і безконтактні (радіолокаційні, лазерні і оптичні) вимірювачі. Традиційні методи визначення параметрів руху наземних рухомих об'єктів (НРО), що використовуються в сучасних спідометрах і одометрах та засновані на контактних методах вимірювання за допомогою підрахунку числа обертів колеса або трансмісії мають значну похибку за рахунок зміни діаметру колеса та його

проковзування при русі дорогами з різним покриттям, особливо по бездоріжжю та пересіченій місцевості. Практика показує, що кардинальним рішенням для визначення параметрів руху НРО, в тому числі і на бездоріжжі, є використання безконтактного вимірювання фактичної швидкості, прискорення руху і пройденого шляху за допомогою радіолокаційного вимірювача параметрів руху (РВПР) з двома приймально – передавальними антенами, діаграми спрямованості яких розташовані під кутом 90° і направлені вперед-назад під кутом 45° відносно полотна дороги [4].

Функціонально РВПР складається з чотирьох основних складових частин: приймально-передавального модуля (ППМ), блоку цифрових вимірювань (БВ) з двонаправленим інтерфейсом RS-232, портативного комп'ютера (ПК) і блоку джерел вторинного електроживлення (БЖ). Залежно від типу випробувань до БВ можуть підключатись додаткові датчики [6].

Структурна схема основного складу РВПР наведена на рис. 1.

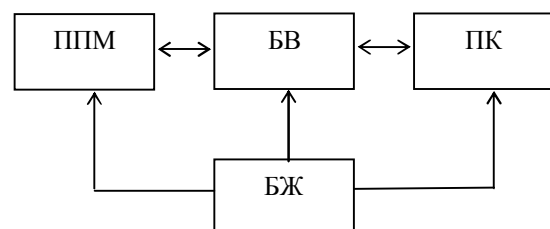


Рис. 1. Структурна схема РВПР

РВПР призначений для роботи в умовах ударних навантажень, вібрацій і широкого діапазону температур та може бути використаний для проведення шляхових випробувань, колісних і гусеничних

транспортних засобів, а також для вирішення інших прикладних задач, що вимагають високоточного вимірювання параметрів руху в умовах руху як залізницею та автодорожніми шляхами з твердим покриттям, так і бездоріжжям. Для забезпечення роботи комплексу за призначенням його основні складові частини виконують наступні функції.

ППМ здійснює формування та випромінювання зондуючого сигналу, прийом відбитого від полотна дороги сигналу з доплерівським зміщенням частоти, виділення і підсилення сигналу доплерівської частоти.

Блок вимірювань здійснює попередню обробку доплерівських сигналів, що надходять з ППМ і їх фільтрацію. Особливістю його побудови є використання цифрових методів обробки та фільтрації імпульсних сигналів, що дозволяє уніфікувати обробку сигналів, які надходять від різнотипних датчиків.

БЖ забезпечує формування всіх необхідних напруг живлення ППМ, БВ і ПК від бортової мережі об'єкту встановлення з напругою як 12, так і 24 В.

Програмне забезпечення ПК здійснює початкову установку та функціональний контроль АКБК, керує режимами його роботи, забезпечує накопичення та обробку даних, відображення вихідної інформації як в табличному, так і в графічному вигляді [4].

Розглянемо особливості побудови найбільш оригінальної частини РВПР – ППМ, оптимізація побудови якого значно впливає як на економічні, так і на експлуатаційні характеристики комплексу.

ППМ являє собою автодинний прийомопередавач 5-ти міліметрового діапазону хвиль.

Структурна схема ППМ наведена на рис. 2, згідно якої блок складається з передавального, приймального та антенного трактів.

До складу передавального тракту входять: стабілізатор струму А1, ЛПД-генератор G1, вентиль W1.

До складу приймального тракту входять: змішувальна камера W2, підсилювач доплерівської частоти А2, формувач імпульсів А3.

До складу антенного тракту входять: щілинний міст W3, рупорні антени W4, W5.

Для забезпечення функціонального контролю в ППМ передбачена можливість подачі сигналу "Контроль". Меандровий сигнал "Контроль" надходить з БВ і має частоту, яка знаходиться в діапазоні доплерівських частот. В ППМ цей сигнал надходить на стабілізатор струму і за рахунок 100% амплітудної модуляції зондуючого та гетеродинного сигналів формує на виході приймального тракту сигнал биття тої самої частоти. Конструктивно ППМ змонтований в оригінальному литому корпусі з габаритами 187x164x70 мм. Маса блоку не перевищує 2,5 кг. Основною конструктивною особливістю корпусу є те, що він забезпечує розташування осей діаграм спрямованості антен (ДСА) W4, W5 під кутом 45° до полотна дороги вперед-назад відносно напрямку руху. Другою конструктивною особливістю побудови ППМ є те, що вузли надвисокої частоти (НВЧ) передавального тракту G1, W1, приймального трак-

ту W2, та антенного тракту W3, W4, W5 жорстко з'єднані між собою без перехідних хвильоводів, що дозволяє оптимально мінімізувати габарити блоку в цілому і забезпечити його роботу в умовах вібрацій та ударних навантажень.

За функціональним призначенням робота блоку відбувається наступним чином.

Генератор G1 видає НВЧ сигнал

$$u_n(t) = A_n \cos \omega_0 t,$$

який через невзаємний пристрій (вентиль) W1, що служить для розв'язки та погодження генератора з антенним трактом, надходять на одне з плечей щілинного мосту W3. Тут відбувається розділення потужності між антенами W4, W5 на дві рівні частини, причому невелика частина потужності з рівнем (-15...-20) дБ надходить на змішувальну камеру W2.

Сигнал, що відбивається від полотна дороги, приймається антенами W4, W5 і має доплерівське зміщення частоти, яке в першому наближенні (без урахування кінцевої ширини ДСА), описується виразами:

$$\begin{aligned} u_{w4}(t) &= A_4 \times \cos(\omega_0 + \Omega_d)t, \\ u_{w5}(t) &= A_4 \times \cos(\omega_0 - \Omega_d)t, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\Omega_d = 2\pi F_d$, F_d – доплерівське зміщення частоти зондуючого сигналу.

В подальшому ці сигнали додаються в плечі щілинного мосту, якій навантажений на змішувальну камеру. Тут відбувається перемноження відбитих сигналів $u_{w4}(t)$, $u_{w5}(t)$ з сигналом $u_n(t)$, що відгалужується з виходу передавача:

$$\begin{aligned} u_d(t) &= u_{w4}(t) \times u_n(t) + u_{w5}(t) \times u_n(t) = \\ &= A_4 \cos(\omega_0 + \Omega_d)t \times A_n \cos \omega_0 t + \\ &+ A_5 \cos(\omega_0 - \Omega_d)t \times A_n \cos \omega_0 t. \end{aligned} \quad (2)$$

Після фільтрації гармонік з частотою $2\omega_0$ виділяється сигнал різницевої частоти Доплера, який надходить в підсилювач доплерівської частоти (ПДЧ) А2:

$$u_d(t) = A_d (\cos \Omega_d t + \cos (-\Omega_d t)) = 2A_d \cos \Omega_d t. \quad (3)$$

Як відмічалось, основною особливістю побудови ППМ є те, що діаграми спрямованості антен W4, W5 розташовані під кутом 90° і спрямовані під кутом 45° до полотна дороги вперед-назад відносно напрямку руху.

Таке розташування антен і наведена схема селекції доплерівських сигналів значно зменшують похибки вимірювань, які виникають за рахунок подовжніх коливань корпусу об'єкту встановлення РВПР відносно його центру мас.

Суть особливості пояснюється рис. 2 і полягає в наступному.

Під час руху об'єкта, на якому встановлено РВПР, відносно поверхні, що опромінюється його ППМ, значення доплерівської частоти F_d і радіальної швидкості V_r пов'язані між собою відомим виразом:

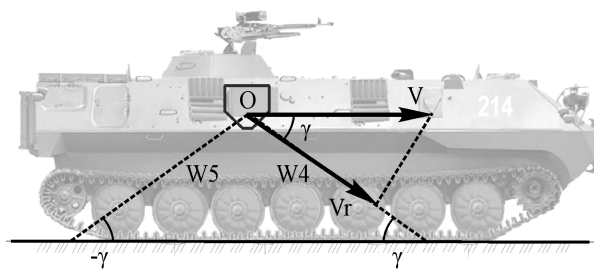


Рис. 2. Розташування антен РВПР на НРО

$$F_{\partial} = 2V_r \frac{f_0}{C}, \tag{4}$$

де F_{∂} [Гц] доплерівське зміщення частоти; V_r [м/с] - радіальна складова швидкості взаємного переміщення об'єктів; f_0 [Гц] - несуча частота зондуючого сигналу; $C=3 \times 10^8$ [м/с] - швидкість розповсюдження радіохвиль.

Величина V_r пов'язана зі швидкістю переміщення об'єкту встановлення відносно поверхні, що опромінюється V , як

$$V_r = V \cdot \cos \gamma, \tag{5}$$

де γ – кут між вектором швидкості об'єкта, на якому встановлено РВПР, і напрямом на поверхню, що опромінюється.

При русі по пересіченій місцевості кут γ буде постійно змінюватись за рахунок коливань ППМ відносно точки О. З рис. 3 і виразів (1)...(5) видно, що за наявності в складі ППМ тільки однієї антени W4 виникатиме відповідна зміна доплерівської частоти, що веде до похибок оцінки швидкості руху, а за наявності двох антен W4 і W5 ці похибки компенсуються в наведеній схемі побудови ППМ.

Важливою особливістю побудови ППМ є те, що кожна антена опромінює полотно дороги з шириною ДСА $\theta=10^\circ$. Така ширина ДСА вибрана на основі експериментальних досліджень і, з одного боку, дозволяє підвищити точність вимірювань за рахунок усереднення амплітудних флуктуацій сигналу, що відбивається від полотна дороги в межах ширини променя, а з іншого – веде до складнощів вимірювання, які пов'язані з вторинним ефектом Доплера. Причина складнощів полягає в наступному.

В зв'язку з тим, що ДСА має кінцеву ширину, відбитий сигнал на вході приймача не являє собою монохроматичні коливання надвисокої частоти як це описують вирази 1–3, а займає деяку смугу частот $\Delta F_{\text{доп}}$ (рис. 3).

Причина цього явища полягає в тому, що зондуючий сигнал відбивається не однією точкою земної поверхні, а множиною точок, які знаходяться в межах площини, що освітлюється променем антени. Оскільки напрями на ці точки з місця розташування антен різні, різними виявляються проекції шляхової швидкості на напрями, з яких ведеться прийом відбитих сигналів, і доплерівські зсуви частоти сигналів, що приймаються. При цьому інтенсивність різних складових спектру неоднакова.

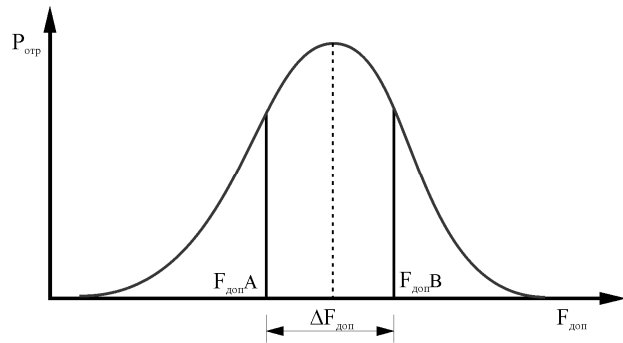


Рис. 3. Смуга частот $\Delta F_{\text{доп}}$

Найбільшу інтенсивність мають складові спектру відбитого сигналу, що формуються в напрямку максимуму ДСА. Потужність спектральних складових, що формуються в напрямках, які не співпадають з напрямом максимуму, тим менша чим менше значення відповідних ним ординат ДСА, і змінюється пропорційно квадрату ДСА за потужністю. Таким чином, огинаюча спектру сигналів, що приймаються, визначається квадратом ДСА за потужністю, а результуючий сигнал на вході приймача являє собою сукупність коливань биття близьких між собою частот. Тому огинаюча результуючого коливання змінюється в часі.

Досвід шляхових випробувань і лабораторні дослідження свідчать, що огинаюча результуючого коливання являє собою досить складне коливання, і це коливання має вигляд випадкових змін напруги, яке за своїм характером нагадує випадковий процес. Для його опису в другому наближенні коливання на вході приймача можна представити в вигляді двох еквівалентних дискретних частот $F_{\text{допА}}$ і $F_{\text{допВ}}$, які характеризують ширину ДСА на рівні 0,5.

Різниця між цими частотами складає ΔF . Можна показати, що в спектрі відбитого коливання переважають частоти, які знаходяться в межах ширини спектру доплерівських частот ΔF .

Механізм їх формування показано на рис. 4, на якому наведена схема опромінення полотна дороги.

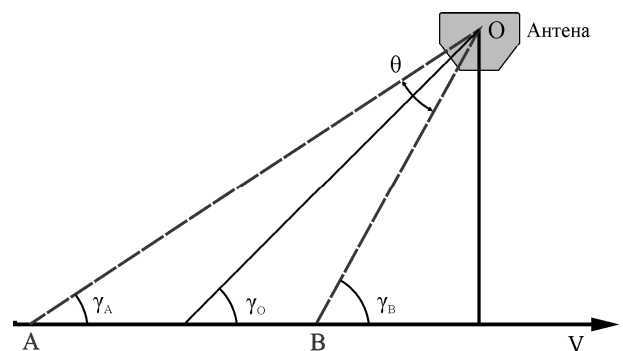


Рис. 4. Механізм формування доплерівських частот

При опромінюванні полотна дороги антеною з діаграмою спрямованості кінцевої ширини θ внаслідок складання сигналів, що відбиваються від різних точок поверхні, яка опромінюється, виникають биття, які називають вторинним ефектом Доплера.

Для запису форми сигналу, що відбивається, відокремимо дві крайні точки плями А і В, при цьому будемо рахувати, що вектор швидкості V співпадає з відрізком АВ. Частоти коливань, що відбиваються від крапкових цілей А і В при розміщенні антени давача в точці О, визначаються як:

$$f_{ДА} = f_0 + \frac{2V \cos \gamma_A}{\lambda}, \quad (6)$$

$$f_{ДВ} = f_0 + \frac{2V \cos \gamma_B}{\lambda},$$

де f_0 і λ несуча частота та довжина хвилі РЛС відповідно.

При цьому частота биття результуючих коливань від крапкових цілей буде:

$$\Delta f_{Д} = f_{ДА} - f_{ДВ} = \frac{2V(\cos \gamma_A - \cos \gamma_B)}{\lambda} = \frac{2V}{\lambda} 2 \sin \frac{\gamma_A + \gamma_B}{2} \sin \frac{\gamma_A - \gamma_B}{2}. \quad (7)$$

З урахуванням того, що:

$$\gamma_A = \gamma_0 - \frac{\theta}{2}, \gamma_B = \gamma_0 + \frac{\theta}{2}, \quad (8)$$

$$\sin \frac{\gamma_B + \gamma_A}{2} = \sin \gamma_0, \sin \frac{\gamma_B - \gamma_A}{2} = \sin \frac{\theta}{2}, \quad (9)$$

максимальне значення вторинної частоти Доплера дорівнює:

$$F_{Д} = \frac{2V}{\lambda} \sin \gamma_0 \sin \frac{\theta}{2}. \quad (10)$$

Значення доплерівського зміщення частоти сигналу, що відбивається від полотна дороги з урахуванням виразів (2, 3) можна записати

$$f_{Д} = \frac{2V}{\lambda} \cos \gamma_0. \quad (11)$$

Формули (10), (11) дозволяють встановити коефіцієнт зв'язку між частотами первинного f_0 і вторинного $F_{Д}$ ефекту Доплера, який дорівнює:

$$K = \frac{f_{Д}}{F_{Д}} = \frac{ctg \gamma_0}{2 \sin \frac{\theta}{2}}. \quad (12)$$

З (12) видно, що частоти f_0 і $F_{Д}$ пов'язані між собою, при чому коефіцієнт зв'язку не залежить від швидкості руху.

Наприклад, для прийнятих в системі значень параметрів: $\gamma_0=45^\circ$, $\theta=10^\circ$ коефіцієнт зв'язку дорівнює

$$K = \frac{f_{Д}}{F_{Д}} \approx 5,7.$$

Наведені аналітичні вирази, що пояснюють формування спектру доплерівського сигналу, підтверджені результатами експериментальних досліджень (рис. 5).

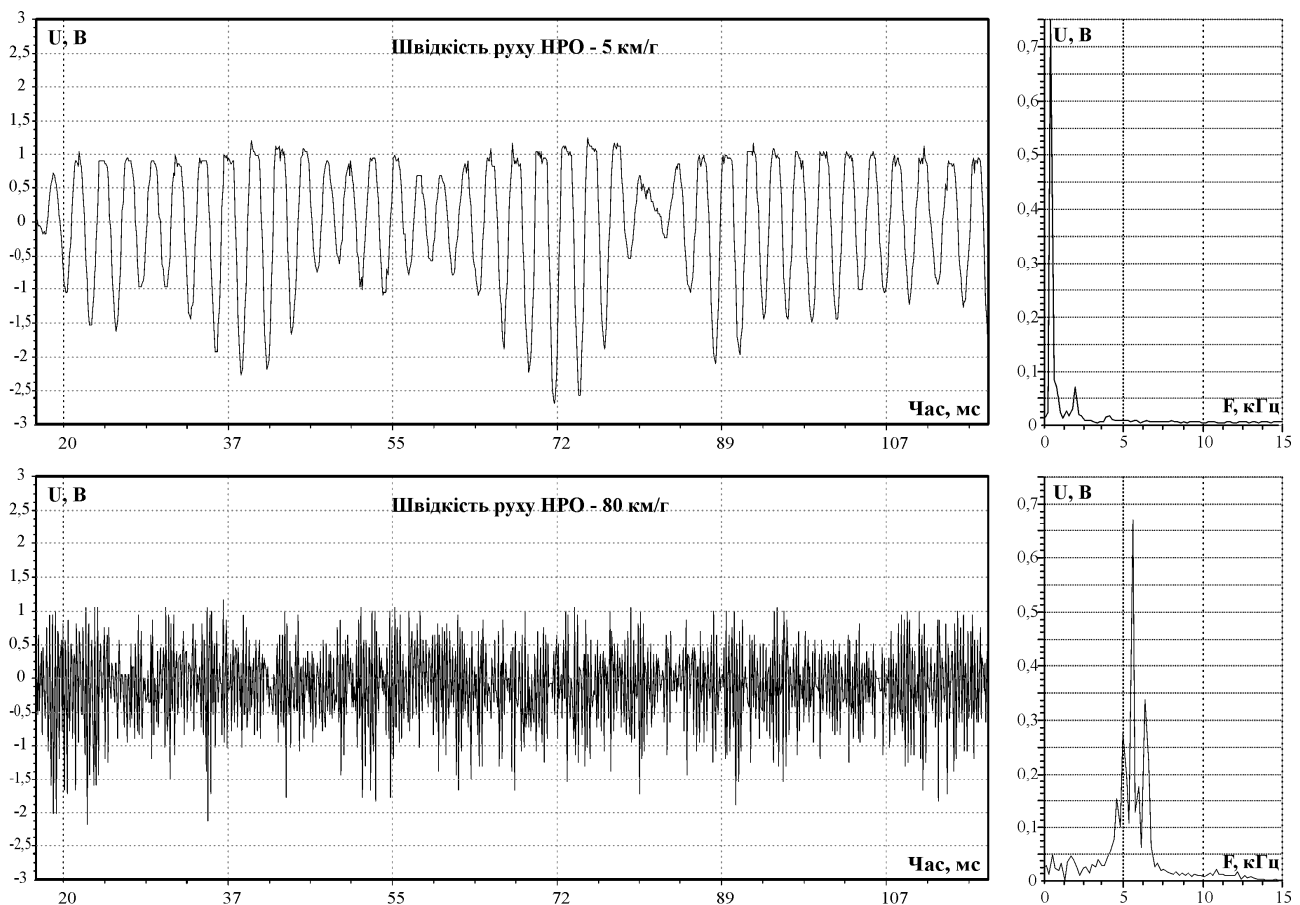


Рис. 5. Експериментальні осцилограми форми та спектру сигналів на виході ПІМ РВПР

Ці результати надають підставу для розробки алгоритмів його обробки і на її основі визначення параметрів руху НРО.

Висновки

Визначені аналітичні залежності для частот первинного і вторинного ефекту Доплера сигналів, що формуються на виході ППМ РВПР. Знайдені співвідношення між цими частотами для конкретної реалізації ППМ. Результати експерименту підтвердили теоретичні висновки, а також засвідчили наявність вторинного ефекту Доплера за рахунок

кінцевої ширини діаграми спрямованості приймально-передавальних антен РВПР.

Напрямок подальших досліджень – підвищення точності і завадозахищеності автономних систем навігації та топогеодезичної прив'язки шляхом структурно-алгоритмічної оптимізації радіолокаційного вимірювача параметрів руху наземних рухомих об'єктів, а саме: зменшення впливу фазових флуктуацій сигналів, що відбиваються від земної поверхні, на точність вимірювання; розробка алгоритмів обробки сигналів РВПР і на її підставі визначення параметрів руху НРО.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Требования к подсистемам топогеодезического и навигационно-временного обеспечения автоматизированных систем управления военного назначения. Наука и военная безопасность. – № 2/2007. – С. 43–48.
2. Льяшов О.А. Тенденції розвитку збройної боротьби у війнах четвертого-шостого поколінь / О.А. Льяшов // Наука і оборона, 2009. – № 3. – С. 43–49.
3. Корольов В.М. Аналіз світових тенденцій розвитку систем навігації для сухопутних військ / В.М. Корольов та ін. // Військово-технічний збірник. – Львів: НАСВ, 2011. – № 2 (5). – С. 19–29.
4. Сопільник Л.І. Методи підвищення точності оцінки місцеположення наземних рухомих об'єктів. /Л. Сопільник, Р. Заяць, Ю. Бударецький, Ю. Підвірний // Вимірювальна техніка та метрологія. – № 72. – 2011. – С. 137–141.
5. Бударецький Ю.І. Особливості побудови підсистеми визначення шляху та експериментальні дослідження її складових частин / Ю.І. Бударецький, М.Г. Грубель, М.І. Гладкий, С.М. Назаркевич // Розроблення та модернізація ОВТ. – 2009. – С. 31–35.
6. Кривов'яз А.Т. Методи побудови завадозахищених навігаційних систем для визначення місцеположення наземних рухомих об'єктів. / Кривов'яз А.Т., Бударецький Ю.І., Бахмат М.В. // Науковий вісник національного лісотехнічного університету України: Збірник науково-технічних праць. – Львів: РВВ НЛТУ України, 2015. – Вип. 25.5. – С. 321–327.
7. Бударецький Ю.І. Економічна ефективність радіолокаційного вимірювача параметрів руху об'єктів РВіА та бронетехніки. / Ю.І. Бударецький, Л.І. Сопільник, С.Ю. Бударецький, М.В. Бахмат // Журнал “Наукові записки Львівського університету бізнесу та права.” – № 21/2019. – Львів: ЛУБП, 2019. – С. 21–28.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М. А. Павленко,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 16.09.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.10.2019

Теоретические и экспериментальные исследования спектра доплеровского сигнала на выходе приёмно-передающего модуля радиолокационных измерителей параметров движения

М. В. Бахмат, Ю. І. Бударецький, Т. В. Лаврут, В. В. Бондарев

Цель статьи – аналитическое и экспериментальное определение спектра доплеровского сигнала на входе приемно-передающего модуля радиолокационного измерителя параметров движения. **Результаты исследования.** В статье приведены структурные схемы радиолокационного измерителя параметров движения, который предназначен для использования в автономных подсистемах навигации и топогеодезической привязки наземных подвижных объектов. Приведенные экспериментальные данные подтверждают основные положения аналитических исследований. Показано, что ширина спектра доплеровского сигнала однозначно определяется шириной диаграммы направленности приемно-передающих антенн. **Вывод.** Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают основные положения аналитических соотношений. Результаты, полученные в процессе исследования предназначены для дальнейшей разработки на их основании близких к оптимальным алгоритмов определения параметров движения наземных подвижных объектов.

Ключевые слова: навигационная система, измеритель параметров движения.

Theoretical and experimental studies of the spectrum of the Doppler signal at the output transmit-receive module of radar measuring instruments of motion parameters

M. Bakhmat, Y. Budaretsky, T. Lavrut, V. Bondarev

The purpose of the article is the analytical and experimental determination of the Doppler signal at the output of the transmitter module of the radar meter of motion parameters. **Results of a research.** The article presents the structural diagrams of a radar meter of motion parameters, which is intended for use in autonomous navigation subsystems and topographic and geodetic reference of ground moving objects. The given experimental data confirm the main points of analytical studies. It is shown that the width of the spectrum of the Doppler signal is uniquely determined by the width of the radiation pattern of the transceiver antennas. **Conclusion.** The above experimental results confirm the main points of the analytical relationships. The results obtained during the study are intended for further development on their basis close to optimal algorithms for determining the motion parameters of ground moving objects.

Keywords: navigation system, radio locating instrument of movement measuring.