

УДК 621.396.96

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229221

Розробка методу оптимізації вимірювання частоти доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів

С. П. Євсєєв, О. Л. Кузнєцов, С. В. Герасимов, С. А. Горєлишев,
А. Д. Карлов, І. І. Ковальов, О. В. Коломійцев, О. В. Лукашук, О. В. Мілов,
В. Ю. Панченко

Обґрунтовано необхідність оцінювання ступеня зниження точності вимірювання інформативних параметрів радіолокаційного сигналу в реальних умовах його поширення та відбиття. Результати оцінювання дозволять визначити вимоги для оптимізації такого вимірювання для забезпечення необхідної ефективності. Викладено чисельний аналіз зниження точності вимірювання частоти Доплера когерентної пачки залежно від статистичних характеристик флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів. Наведено вирази для розрахунку флуктуаційної складової похибки вимірювання частоти пачки радіоімпульсів для різних коефіцієнтів міжімпульсної кореляції фазових флуктуацій. Проведено оцінювання можливості підвищення точності вимірювання частоти Доплера, що може бути забезпечено шляхом статистичної оптимізації алгоритму часо-частотної обробки даного радіолокаційного сигналу за рахунок врахування його фазових флуктуацій. Обґрунтовано умови мультиплікативного впливу фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки, які визначають ефективність оптимізації вимірювання її частоти Доплера.

За результатами дослідження запропоновано метод оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів. Оцінено точність вимірювання частоти Доплера за наявності впливу як внутрішнього шуму приймального пристрою радіолокатора так й корельованих фазових флуктуацій її радіоімпульсів. Оцінено ефективність оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів шляхом комп'ютерного моделювання. Доведено, що при впливі фазових флуктуацій підвищення точності вимірювання частоти Доплера за рахунок проведеної оптимізації може складати від 1.86 до 6.29 разів. Це відкриває шлях до удосконалення існуючих алгоритмів вимірювання вищих похідних дальності за часом для підвищення якості супроводження складних аеродинамічних об'єктів, що маневрують. Цим зумовлена важливість та корисність роботи для теорії радіолокації.

Ключові слова: аеродинамічний об'єкт, когерентна пачка радіоімпульсів, радіолокатор, середньоквадратична похибка, частота Доплера.

1. Вступ

Забезпечення високої точності вимірювання координат та параметрів руху об'єктів радіолокаційного спостереження є актуальним завданням для сучасних радіолокаторів [1–3]. Так, зростають маневрені можливості аеродинамічних

об'єктів, зменшується їх радіолокаційна помітність і збільшуються спроможності виконання ними завдань за призначенням на малих та гранично малих висотах з огинанням рельєфу місцевості на фоні значних внутрішніх шумів приймального пристрою радіолокаторів [4–6]. Це обумовлює необхідність оцінювання їх похідних дальності за часом: радіальної швидкості та радіального прискорення з високою точністю.

На практиці для забезпечення вказаної вимоги широко використовується когерентна пачка радіоімпульсів. Зокрема, в основу операції вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту покладено оцінювання частоти радіолокаційного сигналу. Така частота сигналу може бути визначена з відповідного закону зміни його фази й розрахована як перша похідна фази за часом [1].

Флуктуації фазового фронту хвилі прийнятого сигналу, які виникають внаслідок впливу реальних умов поширення та відбиття радіохвиль, призводять до порушення його когерентності, що обмежує точність вимірювання інформативних параметрів.

На даний час відомі методи статистичної оптимізації вимірювання параметрів радіолокаційного сигналу не передбачають врахування мультиплікативного впливу флуктуацій його фазової структури. Внаслідок цього з'явилась необхідність в оцінюванні ступеня впливу умов поширення та відбиття радіолокаційного сигналу на зниження точності вимірювання його параметрів з метою подальшого обґрунтування доцільності оптимізації алгоритмів обробки прийнятого сигналу. Це вказує на практичну користь проведення чисельного оцінювання впливу флуктуацій фази радіоімпульсів прийнятої пачки на зниження точності вимірювання її частоти Доплера.

Таким чином, актуальність наукового дослідження полягає у визначенні ступеня впливу фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки на зниження точності вимірювання її частоти Доплера. Відповідна статистична оптимізація вимірювання фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки має практичну спрямованість для розв'язання завдання супроводження складних аеродинамічних об'єктів, які маневрують.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

В роботах [1–4] розглянуто особливості обробки сигналу на фоні лише внутрішніх шумів приймального пристрою. Фундаментальні основи обробки радіолокаційного сигналу [1] та їх технічна реалізація, яка пов'язана з побудовою відповідних пристроїв [2], передбачають врахування лише адитивного завадового впливу на корисний сигнал та не враховують вплив корельованих флуктуаційних складових параметрів сигналу. Особливості даних питань відносно багатоканального прийому та обробки сигналу розглянуто у роботі [3]. Забезпечувані при цьому точності вимірювання параметрів прийнятого сигналу можна вважати потенційними. Наведені в даних роботах алгоритми обробки радіолокаційного сигналу не передбачають врахування мультиплікативного завадового впливу корельованих фазових флуктуацій, які викликані впливом реальних умов його поширення та відбиття. Дані флуктуації здатні призвести до зниження точності вимірювання частоти Доплера радіолокаційного сигналу за

рахунок відсутності врахування їх статистичних характеристик. Спроби проведення статистичного аналізу стосовно випадковості параметрів радіолокаційного сигналу надані в роботі [4], однак отримані результати стосуються лише питань перевірки та контролю радіотехнічних пристроїв та не поширюються на завдання оптимізації вимірювання невідомих координат та параметрів руху об'єктів локації.

Причинами виникнення таких флуктуацій є наявність неоднорідностей в атмосфері Землі, складність форми аеродинамічного об'єкта та інтерференція прямої та відбитої від поверхні розділу середовищ радіохвиль.

Вплив турбулентності атмосфери призводить до флуктуацій фази сигналу внаслідок випадкових змін показника її заломлення. Флуктуаційні явища, обумовлені впливом середовища поширення радіохвиль розглянуті у роботах [1, 5–10]. Так, у роботі [5] надано традиційний математичний апарат, який доцільно використовувати для вирішення завдання дослідження. У роботі [6] розв'язано завдання обґрунтування характеристик радіохвиль для виявлення та супроводження складних аеродинамічних об'єктів, які мають зменшений рівень помітності, що характерно для сучасних літальних апаратів. У роботі [7] проаналізовано характер викривлень структури сигналу при прискороному русі об'єкта в іоносфері стосовно як поодиноких так й пачкових радіосигналів. Результати даної роботи безумовно корисно враховувати як відправні при проведенні досліджень. Однак розглянута у роботі [7] трансформація структури сигналу не враховує флуктуаційних змін його фази внаслідок впливу середовища поширення радіохвиль. Врахування даних флуктуаційних змін для випадку їх довільної кореляції при вимірюванні радіальної швидкості та кутової координати об'єкта локації розглянуто у роботі [8]. Однак в даній роботі бракує чисельного аналізу можливих значень статистичних характеристик фазових флуктуацій (дисперсії та інтервалу кореляції) в практичних випадках та відсутнє оцінювання ступеня їх впливу на точність вимірювання частоти Доплера. Для усунення цього недоліку та врахування флуктуацій фази, обумовлених нестабільністю параметрів атмосфери, доцільно скористатися даними [9] та відомими методами оптимізації просторово-часової обробки впровадженими у сучасні радіотехнічні системи різного призначення [10]. Стосовно доплерівських радіолокаторів такі методи надані у роботі [10], які потребують подальшої оптимізації в напрямку врахування статистичних характеристик корельованих фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу.

Складність форми аеродинамічного об'єкта під час руху призводить до зміни просторового положення його складових елементів та появи флуктуацій сумарного відбитого сигналу. Складна форма повітряного об'єкта та його здатність до виконання раптового маневру обумовлює блукання радіолокаційного центру та, як слід, появи фазових викривлень прийнятого сигналу, що розглянуто у роботах [1, 11–13]. Спираючись на основні підходи врахування руху об'єкта спостереження [11] та використовуючи дані [12] та [13] щодо ідентифікації сигналів, відбитих від елементів складних об'єктів, необхідно поширити наведені результати на визначення та врахування статистичних характеристик фазових флуктуацій сигналу, обумовлених блуканням радіолокаційного центру об'єкта спостереження.

Інтерференція прямої та відбитої від поверхні розділу середовищ радіохвиль є причиною виникнення фазових флуктуації прийнятого сигналу внаслідок його відбиття від нерівномірних ділянок місцевості або схвильованої поверхні моря. Питання виникнення фазових викривлень при багатопроміневому поширенні радіолокаційного сигналу розглянуто у роботах [1–3, 5, 9, 11, 14–16]. Питання оптимізації прийому сигналу в даних умовах розглядалися у роботі [14], а особливості можливої частотної трансформації сигналу висвітлені у роботі [15]. Вдосконалення частотного аналізу шляхом використання переваг швидкодіючих алгоритмів обчислень надано у роботі [16]. Шляхи покращення якості частотних вимірювань розглядалися в роботах [17, 18], але питання статистичного аналізу можливостей врахування флуктуацій фазової структури сигналу у наведених вище умовах потребують подальших досліджень.

Таким чином, у наведених вище джерелах не розглядалися питання оцінювання впливу фазових флуктуацій радіолокаційного сигналу на точність вимірювання його інформативних параметрів, зокрема частоти Доплера. Зокрема, у цих роботах бракує оцінювання значень статистичних характеристик фазових флуктуацій, за яким їх вплив потребує оптимізації алгоритмів обробки радіолокаційного сигналу. Вказане свідчить про необхідність такого оцінювання з визначенням діапазону зміни статистичних характеристик фазових флуктуацій за яким їх вплив є найбільш небезпечним і потребує обов'язкового врахування. Тому доцільним є подальший розвиток даних досліджень в напрямку розгляду як зондувального сигналу когерентної пачки радіоімпульсів, фазові флуктуації яких можуть бути описані довільною кореляційною функцією.

В роботі [19] розглянуто можливості оптимального оцінювання частоти пачки з врахуванням мультиплікативного впливу фазових флуктуацій її радіоімпульсів. Однак в цій роботі наведено лише постановка задачі оптимального вимірювання, причому виключно для найпростіших випадків дискретно убутного та знаковмінного законів зміни кореляції фазових флуктуацій без конкретизації вигляду коефіцієнта міжімпульсної кореляції. В роботі [20] розглянуто випадок сумісного впливу внутрішнього шуму приймального пристрою та корельованих фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки з осцилюючою кореляційною функцією. Показано, що для сучасних когерентно-імпульсних радіолокаторів флуктуаційні складові середньоквадратичної похибки вимірювання частоти пачок з (8...16) радіоімпульсів у тропосфері можуть складати (67.1...95.5) Гц, а у іоносфері – (7.8...11.3) Гц, що здатні обумовити середньоквадратичні похибки вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкта когерентно-імпульсними радіолокаторами у декілька м/с. При цьому, потрібна середньоквадратична похибка вимірювання радіальної швидкості об'єкта радіолокаційного спостереження для практичних випадків повинна складати до 1 м/с. Тому, з практичної точки зору представляє користь подальше рішення задачі оптимізації вимірювання частоти Доплера для довільного вигляду кореляційної функції фазових флуктуацій з визначенням статистичних характеристик фазових флуктуацій при яких їх врахування вважається необхідним. Важливість даного рішення обумовлена можливістю суттєвих змін параметрів кореляційної функції фазових флуктуацій внаслідок швидкої зміни умов

радіолокації при польоті аеродинамічних об'єктів на малих та гранично малих висотах особливо над морською поверхнею. Отже, потрібно розробити метод оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів. Оцінювання можливого підвищення точності вимірювання доплеровського зсуву частоти пачки за рахунок врахування фазових флуктуацій її радіоімпульсів дозволить визначити ступінь ефективності розробленого методу оптимізації.

3. Мета і завдання дослідження

Дослідження мали за мету розробити метод оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки для підвищення точності її вимірювання за рахунок врахування фазових флуктуацій її радіоімпульсів з довільною кореляційною функцією.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- оцінити значення статистичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки, які необхідно враховувати при вимірюванні частоти Доплера;
- розглянути метод оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів з довільною кореляційною функцією;
- оцінити ефективність методу оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів.

4. Матеріали та методи дослідження

Розглядається вимірювання частоти Доплера когерентної пачки радіоімпульсів. Даний вигляд радіолокаційного сигналу обирається як зондувальний в когерентно-імпульсних радіолокаторах внаслідок його можливості забезпечити високу роздільну здатність за частотою Доплера та високу точність вимірювання даного параметру.

Діапазон довжин хвиль радіолокаторів даного типу обирається сантиметровим (довжина хвилі від 3 см до 10 см), при якому вплив тропосфери та складної форми об'єктів локації є суттєвим. Для метрового діапазону довжин хвиль радіолокаторів (довжина хвилі від 1 м до 2 м) вплив іоносферних неоднорідностей та підстильної поверхні є значним [20].

Для когерентно-імпульсних радіолокаторів оглядового типу сантиметрового діапазону довжин хвиль частота повторення радіоімпульсів пачки може змінюватись від 680 Гц до 1700 Гц, а метрового діапазону – від 20 Гц до 30 Гц [20]. У радіолокаторах супроводження використовуються квазібезперервні зондувальні сигнали з частотою повторення від 20 кГц до 100 кГц [21].

Вважається, що фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом з нульовим математичним сподіванням. У випадках поширення радіохвиль в реальних умовах, кореляція фазових флуктуацій може бути описана експонентною або осцилюючою залежностями [20, 22].

Фазові флуктуації можуть бути породжені сукупністю факторів. Однією із причин виникнення фазових флуктуацій, що призводять до порушення просторово-часової когерентності прийнятого сигналу, є випадкові неоднорідні сере-

довища поширення радіохвиль. Турбулентність атмосфери викликає флуктуації коефіцієнта її заломлення, що, у свою чергу, призводить до флуктуацій параметрів радіохвиль, які поширюються в атмосфері.

У тропосфері, як відомо, флуктуації коефіцієнта заломлення обумовлені флуктуаціями температури, тиску та вологості, викликаними турбулентним перемішуванням її неоднорідностей. Неоднорідності мають різну форму й розміри, вони змінюються в часі й просторі та рухаються з потоком повітряних мас. Розміри неоднорідностей змінюються в широких межах. Товщина шарів характеризується величинами від десятих часток метра до декількох сотень метрів, а їх горизонтальні розміри – від десятків метрів, до десятків кілометрів і більше. У тропосфері величина дисперсії флуктуацій коефіцієнта заломлення становить $\sigma_n^2 = 0.25 (10^{-12} \dots 10^{-10}) \text{ rad}^2$. Відмітимо, що перша цифра відповідає середнім умовам, а друга є максимально можливою.

З урахуванням припущень методу геометричної оптики та гаусівської функції кореляції коефіцієнта заломлення в роботах [7, 21] величини дисперсії флуктуації фази сигналу σ_ϕ^2 , що пройшов обурену тропосферу та іоносферу Землі. Так, показано, що у тропосфері для довжин хвиль радіолокатору від 3 см до 1 м та пройдено шляху хвилею від 50 км до 200 км, дисперсія флуктуації фази сигналу приймає значення від 0,0044 rad^2 до 19,4 rad^2 . У іоносфері коефіцієнт заломлення визначається електронною концентрацією. Турбулентне перемішування атмосферних мас, сонячна активність, наявність метеорів, які проходять крізь верхні шари іоносфери, призводять до флуктуацій електронної концентрації та обумовлюють випадкові зміни коефіцієнта заломлення та відповідно фази радіосигналу. Для довжин хвиль радіолокатору від 50 см до 2 м та розмірах неоднорідностей до 500 км дисперсія флуктуації фази сигналу приймає значення від 0,0013 rad^2 до 8 rad^2 .

Відомі методи обробки радіолокаційного сигналу не передбачають врахування мультиплікативного завадового впливу корельованих фазових флуктуацій, які викликані впливом реальних умов його поширення та відбиття. Отже, використання відомих методів оптимізації вимірювання частоти Доплера когерентної пачки радіоімпульсів може призвести до зниження точності вимірювання цієї частоти Доплера за рахунок відсутності врахування їх статистичних характеристик. Запропонований метод дозволить виявити вплив фазових флуктуацій на точність вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів. Це можливо за рахунок додаткового врахування значень статистичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки при вимірюванні частоти Доплера.

5. Результати розробки методу оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів

5.1. Оцінювання значень статистичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки, які необхідно враховувати при вимірюванні частоти Доплера

Випадковий рух протяжного об'єкта призводить до виникнення його доплеровського шуму, що викликає розширення доплеровського спектра та зміни його форми, а також до його додаткового зсуву внаслідок зміни середньої раді-

альної швидкості. Також, складові сигналу, відбитого від елементів об'єкта, що обертаються та коливаються, обумовлюють виникнення доплеровських ліній на частотах, які зміщені відносно доплеровського спектра корпусу об'єкта локації. В цьому випадку, у доплеровському радіолокаторі для системи стеження за частотою визначеної лінії спектра сигналу можливим є захоплення хибної лінії спектру. Причиною виникнення фазових флуктуацій може служити також багатотрасовість поширення радіохвиль, оскільки при локації низьковисотних об'єктів прийнятий радіолокаційний сигнал додатково відбивається від елементів шорсткої підстильної поверхні. Це призводить до додаткових викривлень його фазової структури. Дисперсія фазових флуктуацій внаслідок зазначених причин може досягати одиниць rad^2 .

Результати теоретичних і експериментальних досліджень свідчать про те, що фазові флуктуації мають близький до нормального закон розподілу. Кореляційна функція фазових флуктуацій може бути апроксимована експонентною або осцилюючою залежностями [8, 20]. Інтервал кореляції фазових флуктуацій знаходиться в границях від десятих долів секунди до одиниць секунд, а спектр фазових флуктуацій є низькочастотним.

Потрібно розглянути питання можливого зниження точності вимірювання частоти Доплера внаслідок впливу фазових флуктуацій радіосигналу порівняно з потенційно можливою точністю вимірювання даного параметру за наявності впливу лише внутрішнього гаусівського шуму. Крім того, потрібно визначити величини статистичних характеристик фазових флуктуацій, при яких їх вплив є переважним і потребує врахування в алгоритмах часо-частотної обробки.

Оцінюванню підлягає кругова частота Доплера ω прийнятого сигналу за максимумом відношення правдоподібності $L(\omega)$ або його натурального логарифма [1, 4, 19, 20]

$$\hat{\omega} = \arg \max \ln L(\omega). \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi(f - f_0)$ – різниця частот очікуваного f і дійсного f_0 радіолокаційних сигналів.

Вважається, що на вхід приймального пристрою надходить сигнал з випадковою амплітудою A і початковою фазою B , за рахунок адитивного впливу внутрішнього гаусівського шуму.

Незалежний випадковий характер амплітуди та початкової фази радіолокаційного сигналу обумовлює необхідність окремого усереднення відношення правдоподібності за даним параметрам та переходу до подвійного інтегралу вигляду

$$L(\omega) = \iint_{A B} L(\omega / A, B) p(A) p(B) dA dB, \quad (2)$$

де $L(\omega/A, B)$ – відношення правдоподібності при визначених параметрах A і B ; $p(A)$, $p(B)$ – відповідні щільності ймовірності розподілу даних випадкових параметрів.

Відношення правдоподібності, яке визначено згідно (2) для моделі сигналу з випадковою амплітудою та початковою фазою надано у [4, 19, 20].

Дисперсія похибки вимірювання частоти прийнятого радіосигналу визначається за методом найбільшої правдоподібності [1, 4]

$$\sigma_{\omega}^2 = -\frac{1}{\ln L''(0)}, \quad (3)$$

де $L''(0)$ – друга похідна відношення правдоподібності (2) при відсутності розузгодження за частотою очікуваного та дійсного радіолокаційних сигналів.

З метою забезпечення високої точності вимірювання частоти радіолокаційного сигналу та високої міри роздільної здатності за частотою, за зондувальний сигнал радіолокатору доцільно використовувати когерентну пачку радіоімпульсів [1, 4, 19, 20].

Дисперсія похибки вимірювання частоти (3) для пачки з прямокутною обвідною, згідно [20], має вигляд

$$\sigma_{\omega}^2 = \frac{12}{q^2 [4(n/2)^2 - 1] T^2}, \quad (4)$$

де q^2 – відношення сигнал/шум за потужністю; n – кількість радіоімпульсів у пачці; T – період слідування радіоімпульсів пачки.

За результатами досліджень, у випадках поширення радіохвиль в реальних умовах, кореляція фазових флуктуацій може бути описана експонентною або осцилюючою залежностями [19, 21] згідно виразів:

$$K_{ex}(T) = e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)}, \quad (5)$$

$$K_{os}(T) = e^{-\left(\frac{T}{\tau}\right)} \cos(\nu T), \quad (6)$$

де τ – інтервал кореляції фазових флуктуацій; $\nu = 2\pi/T_{fl}$ – частота осциляцій коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій; T_{fl} – період осциляцій коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій.

Представляє практичну користь оцінити дисперсію флуктуаційної складової похибки вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів σ_{fl}^2 та порівняти її з шумовою складовою даної дисперсії σ_{ω}^2 , яка визначається виразом (4). Результат даного порівняння дозволить оцінити ступінь впливу фазових флуктуацій на точність вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів. Даний результат можна виразити як відношення вказаних дисперсій $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ та з його використанням визначити у скільки разів дисперсія помилки вимірювання час-

тоти Доплера, що обумовлена впливом корельованих фазових флуктуацій, буде перевершувати дисперсію похибки вимірювання частоти Доплера за наявності впливу лише внутрішнього шуму.

З урахуванням результатів [19, 20], для коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій експонентного вигляду (5), дисперсія флуктуаційної складової похибки вимірювання частоти Доплера пачки з прямокутною обвідною визначається виразом

$$\sigma_{fl}^2 = \frac{18\sigma_{\varphi}^2}{(n/2)^2 [4(n/2)^2 - 1] T^2} \times \left[\sum_{k=1}^{n/2} (2k-1)^2 \{1 - K_{ex}[T(2k-1)]\} + 2 \sum_{l=1}^{n/2-k} K_{ex}(Tl) \sum_{k=1}^{n/2-1} (2k-1)(2k+2l-1) \{1 - K_{ex}[T(2k-1)]\} \right], \quad (7)$$

де σ_{φ}^2 – дисперсія флуктуацій фаз радіоімпульсів пачки.

Згідно [20], для фазових флуктуацій, які описуються коефіцієнтом кореляції осцилюючого вигляду (6) вказана дисперсія визначається наступним чином

$$\sigma_{fl}^2 = \frac{18\sigma_{\varphi}^2}{(n/2)^2 [4(n/2)^2 - 1] T^2} \times \left[\sum_{k=1}^{n/2} (2k-1)^2 [1 - K_{os}(2k-1)] + 2 \sum_{l=1}^{n/2-k} K_{ex}(Tl) \times \sum_{k=1}^{n/2-1} (2k-1)(2k+2l-1) \times \left\{ \cos(k\nu T) - K_{ex}(2k-1) \cos[(2k+l-1)\nu T] \right\} \right]. \quad (8)$$

Отримані вирази (7), (8) дозволяють визначити дисперсію похибки вимірювання частоти Доплера пачки без врахування корельованих фазових флуктуацій її радіоімпульсів.

З урахуванням виразів (4), (7), (8), відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ буде визначатися для експонентного коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій (5) виразом

$$\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2 = \frac{3q^2 \sigma_{\varphi}^2}{2(n/2)^2 [4(n/2)^2 - 1]} \left[\sum_{k=1}^{n/2} (2k-1)^2 \{1 - K_{ex}[T(2k-1)]\} + 2 \sum_{l=1}^{n/2-k} K_{ex}(Tl) \sum_{k=1}^{n/2-1} (2k-1)(2k+2l-1) \times \{1 - K_{ex}[T(2k-1)]\} \right], \quad (9)$$

а для осцилюючого коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій (5) виразом

$$\begin{aligned} \sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2 &= \frac{3q^2 \sigma_{\phi}^2}{2(n/2)^2 [4(n/2)^2 - 1]} \times \\ &\times \left\{ \sum_{k=1}^{n/2} (2k-1)^2 [1 - K_{os}(2k-1)] \right\} + 2 \sum_{l=1}^{n/2-k} K_{ex}(Tl) \times \\ &\times \left\{ \sum_{k=1}^{n/2-1} (2k-1)(2k+2l-1) (\cos(k \nu T) - K_{ex}(2k-1) \cos[(2k+l-1) \nu T]) \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

При когерентній обробці послідовностей радіоімпульсів в більшості сучасних радіолокаторів забезпечується когерентне накопичення пачок до 20 радіоімпульсів. При цьому, їх кількість є парною, що обумовлено особливостями цифрової обробки радіолокаційних сигналів та реалізації алгоритмів дискретного та швидкого перетворення Фур'є. Тому аналіз проводиться для когерентних пачок з (8...16) радіоімпульсів, які широко застосовуються у радіолокаційній практиці. Згідно даних [1, 17, 21], вплив наведених вище факторів виникнення фазових флуктуацій спотворює інтервал кореляції даних флуктуацій $\tau=(0.1...1)$ с. Дисперсія фазових флуктуацій для проведення оцінювання їх впливу обирається в межах $\sigma_{\phi}^2 = (0.01...10)$ rad^2 залежно від довжини хвилі радіолокатору. Оцінювання доцільно провести для випадків, коли коефіцієнт розрізненості $K_r=10 \lg(q^2/2)$ приймає значення від 17 дБ до 27 дБ. Ці дані є характерними для радіолокаторів оглядового типу та супроводження та підтверджені оцінками показників якості виявлення, наведеними, наприклад, в роботі [21]. З урахуванням характеристик когерентно-імпульсних радіолокаторів, відношення періоду слідування радіоімпульсів прийнятої пачки до інтервалу кореляції фазових флуктуацій може знаходитися в границях $T/\tau=(10^{-5}...10^{-2})$. Згідно виразів (5), (6), це відповідає зниженню коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій на 1 %, що має місце у звичайних умовах функціонування радіолокатору.

На рис. 1 наведені графіки відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ від T/τ згідно виразу (10).

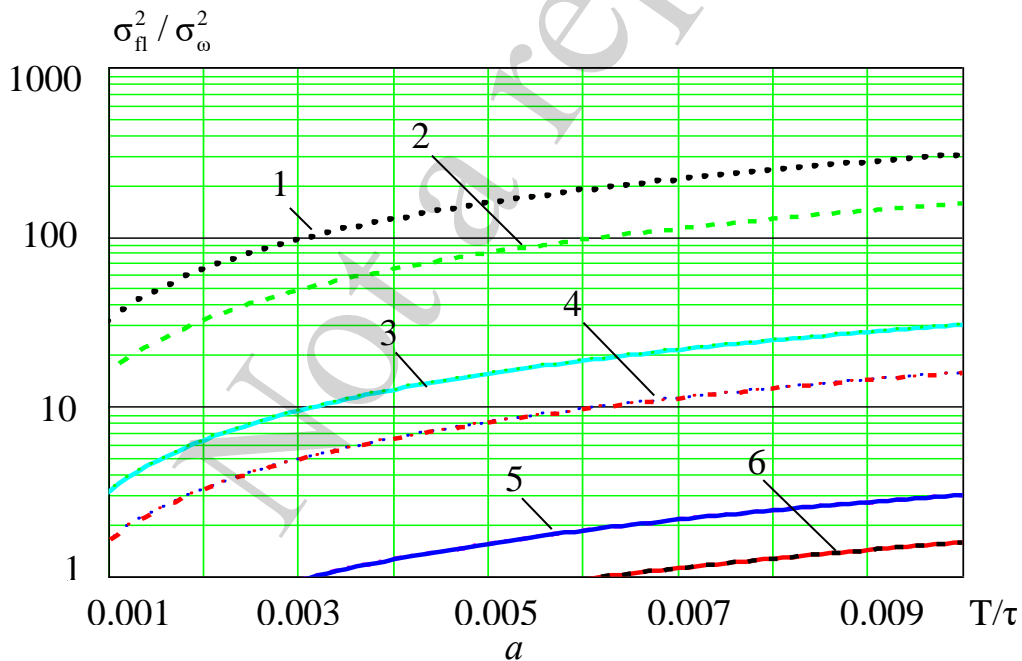
На рис. 1, а графіки отримані згідно виразу (9) для коефіцієнта кореляції фази (5) і відповідають наступним випадкам: 1 – $n=16$; $K_r=27$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 10 \text{ rad}^2$; 2 – $n=8$; $K_r=27$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 10 \text{ rad}^2$; 3 – $n=16$; $K_r=17$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 10 \text{ rad}^2$ та $n=16$; $K_r=27$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 1 \text{ rad}^2$; 4 – $n=8$; $K_r=17$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 10 \text{ rad}^2$ та $n=8$; $K_r=27$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 1 \text{ rad}^2$; 5 – $n=16$; $K_r=17$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 1 \text{ rad}^2$ та $n=16$; $K_r=27$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 0.1 \text{ rad}^2$; 6 – $n=8$; $K_r=17$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 1 \text{ rad}^2$; та $n=8$; $K_r=27$ дБ; $\sigma_{\phi}^2 = 0.1 \text{ rad}^2$.

На рис. 1, б графіки відповідають аналогічним рис. 1, а умовам, та отримані для коефіцієнта кореляції фази (10) з періодом осциляцій обраним а умовою $T_{fl}/\tau=3$, що підтверджується результатами експериментальних досліджень [21].

Спочатку доцільно проаналізувати вплив енергетичних характеристик когерентної пачки радіоімпульсів на величину відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$. Збільшення коефіцієнта розрізненості з 17 дБ до 27 дБ викликає відповідне збільшення відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ в 10 разів, що видно при порівнянні кривих 1 і 3; 2 і 4; 3 і 5; 4 і 6 (для коефіцієнтів кореляції фази (5) – рис. 1, а та (6) – рис. 1, б).

Перехід від когерентного накопичення пачки з $n=8$ радіоімпульсів до когерентного накопичення пачки з $n=16$ радіоімпульсів викликає збільшення відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ у 1.9 рази відповідно до порівняння кривих 1 і 2, 3 і 4, 5 і 6 для коефіцієнта кореляції фази (5) – рис. 1, а та у 2.1 рази для аналогічних кривих при коефіцієнті кореляції фази (6) – рис. 1, б.

Нижче розглядається аналіз впливу на величину відношення дисперсій $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ статистичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки. Вплив збільшення дисперсії фазових флуктуацій σ_{ϕ}^2 з 0.1 rad^2 до 1 rad^2 та з 1 rad^2 до 10 rad^2 , тобто на порядок, викликає збільшення відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ також на порядок, в чому можна перекоонатися шляхом порівняння кривих 4 і 6; 3 і 5; 1 і 3; 2 і 4 (для коефіцієнтів кореляції фази згідно виразу (5) – рис. 1, а та згідно виразу (6) – рис. 1, б).



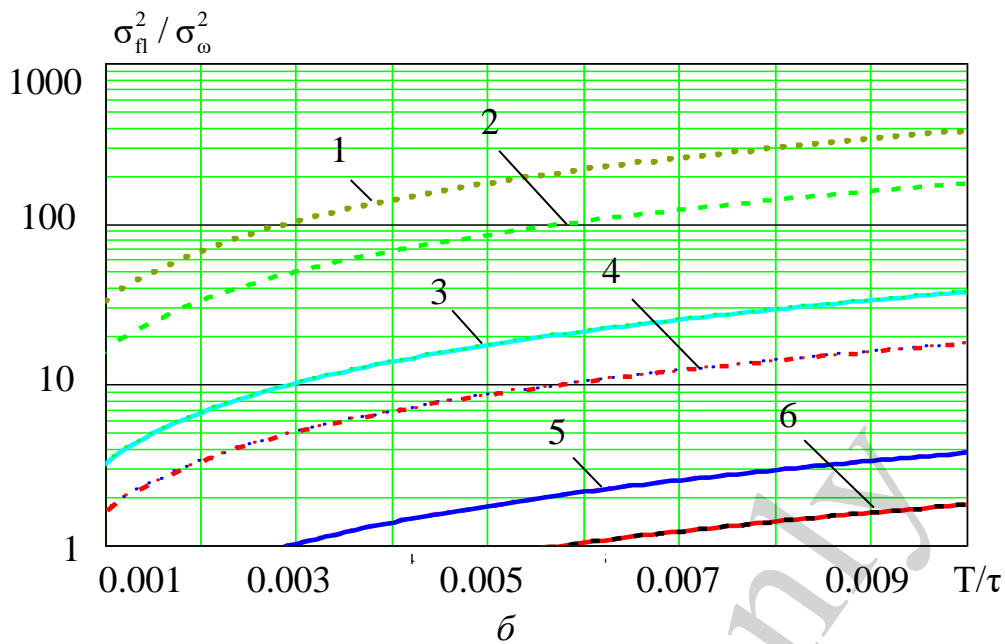


Рис. 1. Графіки залежності $\sigma_{п}^2 / \sigma_{\omega}^2$ від T/τ для випадків визначення відношення $\sigma_{п}^2 / \sigma_{\omega}^2$: а – згідно виразу (9); б – згідно виразу (10)

5. 2. Розгляд методу оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів з довільною кореляційною функцією

Розглядається випадок переважного впливу корельованих фазових флуктуацій радіоімпульсів пачки над впливом внутрішнього шуму приймального пристрою. При достатньо сильному радіосигналі точність вимірювання частоти Доплера визначається верхньою частиною максимуму часо-частотної функції розузгодження. За наявності флуктуацій фази радіосигналу відбувається розширення максимуму даної функції та його відхилення відносно початку координат, що призводить до погіршення точності вимірювання частоти Доплера. Оптимізація полягає у знаходженні відношення правдоподібності з врахуванням статистичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятого пачкового радіосигналу, які описуються кореляційною функцією довільного вигляду. Дане врахування обумовлює мінімізацію дисперсії флуктуаційної складової похибка вимірювання частоти Доплера і, як слід, підвищення точності її вимірювання.

Вважаємо, що когерентна пачка радіоімпульсів частково втратила когерентність внаслідок впливу атмосферних неоднорідностей, земної (морської) поверхні та відбивних властивостей об'єктів радіолокації.

Наявність у фазах прийнятих радіоімпульсах пачки флуктуаційних складових f_k ($k=1, 2, \dots, n$ – номер радіоімпульсу) вимагає додаткового усереднення відношення правдоподібності $L(\omega)$ (2) за даними флуктуаційними складовими. Шляхом використання методики, викладеної у [19], для пачок з симетричним розподілом амплітуд радіоімпульсів, результат вказаного усереднення має вигляд

$$\bar{L}_{opt}(\omega) = \int_{\vec{\phi}} L(\omega) p(\Delta\vec{\phi}) d\Delta\vec{\phi}, \quad (11)$$

де $\vec{\phi} = \|\phi_k\|$ – вектор значень флукуаційних складових фаз радіоімпульсів пачки; $p(\Delta\vec{\phi})$ – закон розподілу різниць флукуаційних складових фаз радіоімпульсів, симетричних відносно центру пачки; $d\Delta\vec{\phi} = d\Delta\phi_1 d\Delta\phi_2 \dots d\Delta\phi_{n/2}$.

Завдання оптимізації вимірювання кругової частоти Доплера пачки радіоімпульсів може бути вирішено шляхом визначення аргументу максимуму натурального логарифма відношення правдоподібності (11) $\bar{L}_{opt}(\omega)$:

$$\hat{\omega}_{opt} = \arg \max \ln \bar{L}_{opt}(\omega). \quad (12)$$

Отже, інформація про оптимальне значення частоти пачки міститься в різниці фаз її симетричних радіоімпульсів.

При цьому, як показано у [7], довільність форми коефіцієнта кореляції фазових флукуацій може бути врахована введенням у розгляд матриці

$$\bar{M} = \begin{pmatrix} 1 & K_1(T) & K_2(T) & \dots & K_{n-2}(T) & K_{n-1}(T) \\ K_1(T) & 1 & K_1(T) & \dots & K_{n-3}(T) & K_{n-2}(T) \\ K_2(T) & K_1(T) & 1 & \dots & K_{n-4}(T) & K_{n-3}(T) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{n-2}(T) & K_{n-3}(T) & K_{n-4}(T) & \dots & 1 & K_1(T) \\ K_{n-1}(T) & K_{n-2}(T) & K_{n-3}(T) & \dots & K_1(T) & 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де K_{n-i} – коефіцієнт кореляції фазових флукуацій радіоімпульсів пачки, рознесених на інтервал часу $(n-i)T$, довільного вигляду.

Відповідно до [7], закон розподілу різниць флукуаційних складових фаз симетричних радіоімпульсів пачки для довільного коефіцієнта кореляції фазових флукуацій має вигляд

$$p(\Delta\phi_1, \Delta\phi_2, \dots, \Delta\phi_{n/2}) = \frac{D^{\frac{n/2-1}{2}}}{(2\sigma_\phi)^{n/2} \pi^{n/4} \sqrt{|Q|}} \times \quad (14)$$

$$\times \exp \left[-\frac{1}{4\sigma_\phi^2 D} \sum_{l=1}^{n/2} \sum_{k=1}^{n/2} (D_{n/2+1-l, n/2+1-k} - D_{n/2+1-k, n/2+1-l}) \Delta\phi_l \Delta\phi_k \right],$$

$$\Delta\phi_l = \phi_{n/2+1-l} - \phi_{n/2+1+l}, \quad (15)$$

$$\Delta\phi_k = \phi_{n/2+1-k} - \phi_{n/2+k}, \quad (16)$$

де $D = |\bar{M}|$; $D_{i,k}$ – алгебраїчне доповнення елемента $M_{i,k}$ матриці \bar{M} ; $\Delta\phi_l, \Delta\phi_k$ – різниці флуктуаційних складових фаз радіоімпульсів l -ої і k -ої симетричної пари відповідно; $|Q|$ – визначник матриці коефіцієнтів при членах другого ступеня квадратичної форми під знаком подвійного сумування.

Визначник $|Q|$ має вигляд

$$|Q| = \begin{vmatrix} D_{n/2, n/2} + D_{n/2, n/2+1} & \cdot & \cdot & D_{1, n/2} + D_{1, n/2+1} \\ D_{n/2-1, n/2} + D_{n/2-1, n/2+1} & \cdot & \cdot & D_{1, n/2-1} + D_{1, n/2+2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ D_{1, n/2} + D_{1, n/2+1} & \cdot & \cdot & D_{1, 1} + D_{1, n} \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Отримані співвідношення (11)–(17) представляють метод оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів з довільною кореляційною функцією.

Оцінимо ефективність методу оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки за рахунок врахування корельованих фазових флуктуацій її радіоімпульсів шляхом оцінювання можливостей підвищення точності вимірювання частоти Доплера пачки.

5.3. Оцінювання ефективності методу оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів

Знаходження відношення правдоподібності (11), усередненого за флуктуаційними складовими фаз радіоімпульсів пачки дозволяє перейти до оцінювання дисперсії похибки оптимального вимірювання частоти Доплера прийнятої пачки при врахуванні фазових флуктуацій її радіоімпульсів. Порівняння даної дисперсії з дисперсіями похибки вимірювання частоти Доплера за відсутності врахування фазових флуктуацій радіоімпульсів пачки, які визначаються виразами (7), (8), дозволяє довести ефективність запропонованого методу оптимізації вимірювання частоти Доплера.

Аналогічно виразу (3), дисперсія похибки оптимального вимірювання частоти прийнятої пачки з врахуванням фазових флуктуацій її радіоімпульсів може бути отримана згідно виразу

$$\sigma_{\omega_{opt}}^2 = -\frac{1}{\ln \bar{L}_{opt}''(0)}, \quad (18)$$

де $\bar{L}_{opt}''(0)$ – друга похідна відношення правдоподібності (11) при відсутності розузгодження за частотою.

Якщо фазові флуктуації є суттєвими та їх вплив значно перевершує вплив внутрішнього шуму приймального пристрою, вираз (18) має рішення наступного вигляду:

$$\sigma_{\omega_{opt}}^2 = \frac{2\sigma_{\phi}^2 [1 + K(T)]}{T^2 [1 - K(T)](n-1)} \times \left[\frac{[1 - K(T)]^2}{[4(n-1)^2 - 1][1 - K(T)]^2 + [n-1 - (n-3)K(T)]} \right]. \quad (19)$$

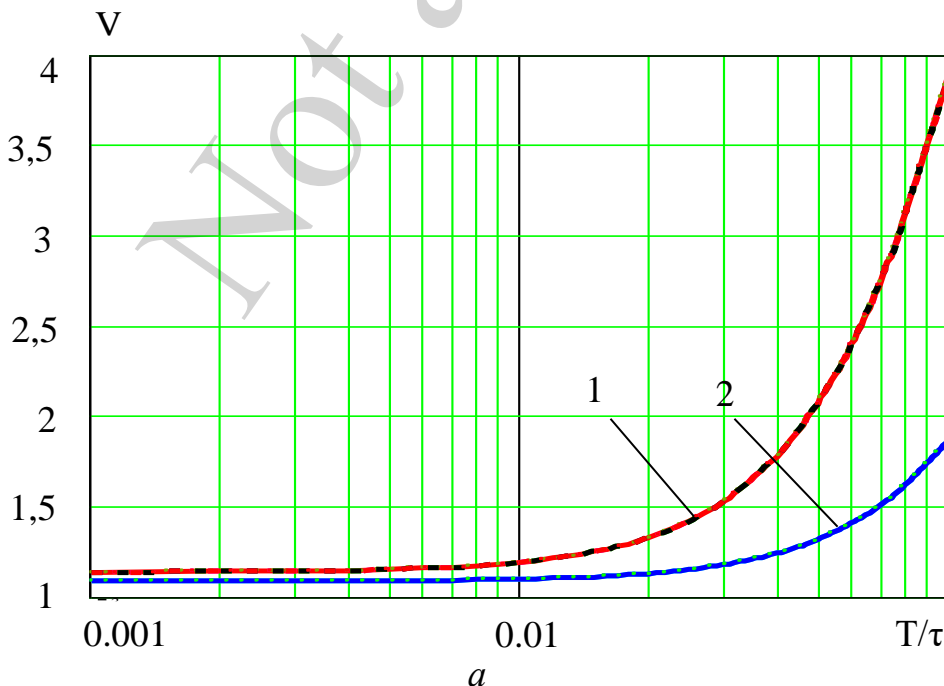
Вираз (19) отримано для довільного вигляду коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій.

Ефективність оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки шляхом врахування флуктуацій фаз її радіоімпульсів пропонується оцінювати за допомогою відношення

$$V = \frac{\sigma_{fl}^2}{\sigma_{\omega_{opt}}^2}. \quad (20)$$

З метою оцінювання можливої ефективності застосування запропонованого оптимального алгоритму, доцільно застосувати вираз (20) для коефіцієнтів кореляції фазових флуктуацій згідно виразів (5), (6), відповідно для σ_{fl}^2 визначаються за формулами (7), (8).

На рис. 2 наданні графіки залежностей ефективності V від відношення T/τ , якщо фазові флуктуації радіоімпульсів прийнятої пачки характеризуються розглянутими вище коефіцієнтами кореляції (5) – рис. 2, а та (6) – рис. 2, б.



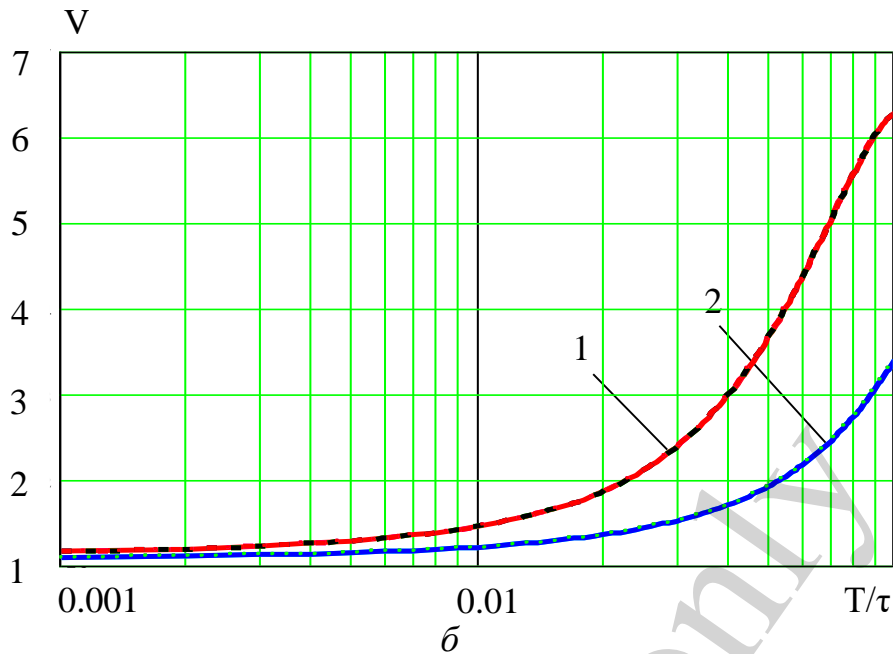


Рис. 2. Ефективність оптимізації вимірювання частоти пачки радіоімпульсів для фазових флуктуацій з коефіцієнтами кореляції: *a* – згідно виразу (5); *б* – згідно виразу (6)

На графіках рис. 2, *a* крива 1 отримана для $n=16$ за наступних умов:

1) $K_r=27$ дБ, $\sigma_\phi^2 = 10, 1, 0.1 \text{ rad}^2$; 2) $K_r=17$ дБ, $\sigma_\phi^2 = 10, 1 \text{ rad}^2$; що відповідає кривим 1, 3 та 5 на рис. 1, *a*. Крива 2 отримана для $n=8$ за аналогічних умов та відповідає кривим 2, 4 та 6 на рис. 1, *a*. Криві, які наведені на рис. 2, *б* мають таку ж саму відповідність кривим, наведеним на рис. 1, *б*.

Випадок звичайних умов функціонування радіолокатору відповідає значенням $T/\tau=(10^{-5} \dots 10^{-2})$. Для таких умов ефективність врахування фазових флуктуацій з експонентною та осцилюючою кореляційними функціями є незначною: 1.1...1.19 разів (рис. 2, *a*), та 1.21...1.45 разів (рис. 2, *б*).

Умови значного впливу фазових флуктуацій внаслідок обуреного стану тропосфери або іоносфери Землі, суттєвого впливу земної (морської) поверхні та виконання об'єктами радіолокації складного маневрування відповідають значенням $T/\tau=(10^{-2} \dots 10^{-1})$. В цьому випадку ефективність може досягати 1.86...3.86 разів (рис. 2, *a*), та 3.39...6.29 разів (рис. 2, *б*).

Дані результати вказують на те, що найбільш суттєвим фактором, який визначає доцільність оптимізації часочастотної обробки радіолокаційного сигналу, є оцінювання ступеня часової декореляції його фази.

На рис. 3 відображено зміна коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій, експонентного (крива 1) та осцилюючого (крива 2) вигляду в границях відношення $T/\tau=(10^{-2} \dots 10^{-1})$.

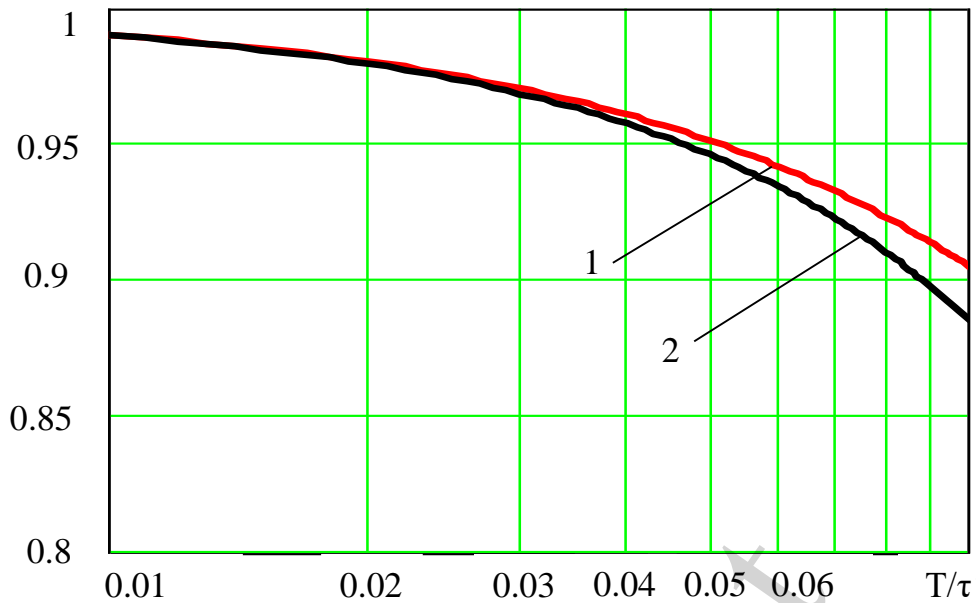


Рис. 3. Зміна коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій

6. Обговорення результатів оцінювання ефективності методу оптимізації вимірювання частоти Доплера прийнятої пачки

Проведемо аналіз отриманих графіків (рис. 1–3). Для випадку збільшення відношення періоду слідування радіоімпульсів прийнятої пачки до інтервалу кореляції фазових флуктуацій T/τ до 10^{-2} (зменшенні коефіцієнта кореляції фази на 1 %). Відбувається зростання відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ (рис. 1, а) у рази: 300 (крива 1); 157 (крива 2); 30 (крива 3); 15 (крива 4); 3 (крива 5) та 1.5 (крива 6). Для коефіцієнта кореляції фази (11) дане зростання у рази: (рис. 1, б): 373 (крива 1); 177 (крива 2); 37 (крива 3); 17 (крива 4); 4 (крива 5) та 1.7 (крива 6). Наявність флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу викликає перевищення дисперсії флуктуаційної складової похибки вимірювання частоти пачки σ_{fl}^2 над дисперсію σ_{ω}^2 шумової складової даної похибки у сотні разів. Це справедливо для флуктуацій, які виникають при впливу реальних умов поширення та відбиття радіолокаційного сигналу, тобто при знаходженні відношення T/τ в границях ($10^{-3} \dots 10^{-2}$). При цьому найбільший вплив на значення досліджуваного відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ здійснюють саме статистичні характеристики фазових флуктуацій – дисперсія σ_{ϕ}^2 та коефіцієнт кореляції фази $K(T)$. При експонентному (5) та осцилюючому (6) коефіцієнтах кореляції фазових флуктуацій відношення $\sigma_{fl}^2 / \sigma_{\omega}^2$ приймає близькі значення.

При дисперсії фазових флуктуацій $\sigma_{\phi}^2 = (1 \dots 10) \text{ rad}^2$ та збільшенні відношення T/τ до 10^{-2} і вище вплив фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки над впливом внутрішнього шуму можна вважати переважним. При цьому, значення середньоквадратичних похибок вимірювання радіальної швидкості об'єктів радіолокаційного спостереження, які обумовлені впливом тропосфе-

ри для радіолокаторів сантиметрового діапазону та іоносфери для радіолокаторів метрового діапазону, можуть досягати одиниць м/с.

Радіолокаційне спостереження повітряних об'єктів часто супроводжується зміною умов локації, що, у свою чергу, призводить до зміни закону кореляції фазових флуктуацій. Вказане вимагає оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів з врахуванням фазових флуктуацій при їх довільній кореляційній функції

Як показують результати оцінювання, наведені на рис. 1, 2, навіть при великій інтенсивності фазових флуктуацій $\sigma_{\varphi}^2 = (1 \dots 10) \text{ rad}^2$ їх висока часова кореляція $T/\tau = (10^{-5} \dots 10^{-2})$ ($K(T) > 0.99$) обумовлює можливе підвищення точності вимірювання частоти Доплера лише на одиниці-десятки відсотків.

З графіків на рис. 3 видно, що при $T/\tau \leq 10^{-2}$, значення коефіцієнтів кореляції фази (5) – крива 1 та (6) – крива 2 майже співпадають $K(0.01) \sim 0.99$.

Для випадку суттєвої часової декореляції фази прийнятих радіоімпульсів пачки інтервал відношення становить $T/\tau = (10^{-2} \dots 10^{-1})$. Значення коефіцієнтів кореляції фази (5), (6) суттєво зменшуються та починають відрізнятися за величиною $K(0.1) \sim 0.9$ та $K(0.1) \sim 0.88$ відповідно.

У визначеному діапазоні $T/\tau = (10^{-2} \dots 10^{-1})$ спостерігається суттєве підвищення ефективності згідно виразу (20) у декілька разів. Це відбувається за рахунок врахування характеру зміни кореляції фазових флуктуацій, що доводить доцільність оптимізації часочастотної обробки радіолокаційного сигналу в даних умовах.

Обмеження даного дослідження полягає у оцінюванні радіолокатором середньої радіальної швидкості при локації низьковисотних об'єктів. Як відмічалось вище, при цьому радіолокаційний сигнал додатково відбивається від елементів шорсткої підстильної поверхні та є причиною виникнення фазових флуктуацій.

Отримані результати мають шлях подальшого розвитку в напрямку оптимізації алгоритмів просторової обробки радіолокаційного сигналу з метою підвищення точності вимірювання кутових координат аеродинамічних об'єктів. Дане завдання є практично важливим для радіолокаторів, що забезпечують вимірювання висоти в умовах тропосферної рефракції [22]. При цьому, особливої актуальності врахування корельованих фазових флуктуацій набуває для радіолокаторів з фазованими антенними решітками, в яких реалізовано фазовий метод визначення кутових координат.

7. Висновки

1. Проведено оцінювання значень статистичних характеристик фазових флуктуацій радіоімпульсів прийнятої пачки за якими їх врахування при вимірюванні частоти Доплера є необхідним. Результати отримано для пачок з типовою кількістю радіоімпульсів (8...16), що використовуються у когерентно-імпульсних радіолокаторах. Визначено діапазони зміни дисперсії та інтервалу кореляції фазових флуктуацій за якими перевищення дисперсії флуктуаційної складової похибки вимірювання частоти пачки над дисперсію шумової складової даної похибки досягає сотень разів, що визначає умови необхідності врахування фазових флуктуа-

цій в алгоритмах когерентної обробки даного радіолокаційного сигналу. Встановлено, що це відбувається при зміні дисперсії фазових флуктуацій в границях від 1 rad^2 до 10 rad^2 та відношенні періоду слідування радіоімпульсів пачки до інтервалу кореляції фазових флуктуацій сигналу 10^{-2} і вище.

2. Розглянуто метод оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів з довільною кореляційною функцією. Оптимізація полягає у знаходженні відношення правдоподібності з врахуванням закону розподілу різниць флуктуаційних складових фаз симетричних радіоімпульсів пачки для довільного коефіцієнта кореляції фазових флуктуацій. Дана оптимізація забезпечує мінімізацію дисперсії флуктуаційної складової похибки вимірювання частоти Доплера.

3. Оцінено ефективність методу оптимізації вимірювання частоти Доплера пачки з врахуванням флуктуацій початкових фаз її радіоімпульсів. Доведено, що при впливі фазових флуктуацій підвищення точності вимірювання частоти Доплера за рахунок проведеної оптимізації може складати від 1.86 до 6.29 разів. Визначено, що найбільш суттєвим фактором, який визначає доцільність оптимізації часочастотної обробки радіолокаційного сигналу, є ступінь часової декореляції його фази.

Подяка

Отримані результати спираються на наукові досягнення доктора технічних наук професора Мінервіна Миколи Миколайовича та видатного вченого в області теорії радіолокації доктора технічних наук професора Ширмана Якова Давидовича.

Авторський колектив бажає виразити особливу подяку завідувачу кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Заслуженому діячу науки і техніки України, доктору технічних наук, професору Карлову Володимирі Дмитровичу за консультаційну та практичну допомогу в ході опрацювання матеріалів дослідження.

Література

1. Zohuri, B. (2020). Fundamentals of Radar. Radar Energy Warfare and the Challenges of Stealth Technology, 1–110. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-40619-6_1
2. Melvin, W. L., Scheer, J. (Eds.) (2012). Principles of Modern Radar: Advanced techniques. IET. doi: <https://doi.org/10.1049/sbra020e>
3. Klemm, R., Nickel, U., Gierull, C., Lombardo, P., Griffiths, H., Koch, W. (Eds.) (2017). Novel Radar Techniques and Applications Volume 1: Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar. IET. doi: <https://doi.org/10.1049/sbra512f>
4. Herasimov, S., Roshchupkin, E., Kutsenko, V., Riazantsev, S., Nastishin, Yu. (2020). Statistical analysis of harmonic signals for testing of Electronic Devices. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 8 (7), 3791–3798. doi: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/143872020>

5. Barton, D. K. (2012). *Radar Equations for Modern Radar*. Artech House, 264.
6. Herasimov, S., Belevshchuk, Y., Ryapolov, I., Volkov, A., Borysenko, M., Tokar, O. (2020). Modeling technology of radar scattering of the fourth generation EF-2000 Typhoon multipurpose aircraft model. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8 (9), 5075–5082. doi: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/30892020>
7. Минервин, Н. Н., Карлов, Д. В., Коновалов, В. М. (2013). Особенности влияния ионосферы на радиолокационные сигналы при ускоренном движении космических объектов. *Прикладная радиоэлектроника*, 12 (4), 530–532.
8. Минервин, Н. Н., Кузнецов, А. Л. (2013). Оптимальные алгоритмы измерения радиальной скорости цели и угла прихода принимаемого радиосигнала с учетом фазовых флуктуаций, описываемых произвольной корреляционной функцией. *Прикладная радиоэлектроника*, 12 (4), 514–517.
9. Volosyuk, V. K., Gulyaev, Y. V., Kravchenko, V. F., Kutuza, B. G., Pavlikov, V. V., Pustovoit, V. I. (2014). Modern methods for optimal spatio-temporal signal processing in active, passive, and combined active-passive radio-engineering systems. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 59 (2), 97–118. doi: <https://doi.org/10.1134/s1064226914020090>
10. Klochko, V. K. (2016). Algorithms of 3D radio-wave imaging in airborne Doppler radar. *Radioelectronics and Communications Systems*, 59 (8), 335–343. doi: <https://doi.org/10.3103/s0735272716080021>
11. Richards, M. A. (2014). *Fundamentals of Radar Signal Processing*. McGraw-Hill Education.
12. O'Neill, C. R., Arena, A. S. (2005). Time Domain Training Signals Comparison for Computational Fluid Dynamics Based Aerodynamic Identification. *Journal of Aircraft*, 42 (2), 421–428. doi: <https://doi.org/10.2514/1.6424>
13. Singh, M., Bhoi, S. K., Khilar, P. M. (2017). Short-Range Frequency-Modulated Continuous Wave (FMCW) Radar Using Universal Software-Defined Radio Peripheral (USRP). *Progress in Intelligent Computing Techniques: Theory, Practice, and Applications*, 559–565. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-10-3376-6_60
14. Wu, X., Tian, Z., Davidson, T., Giannakis, G. (2006). Optimal waveform design for UWB radios. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 54 (6), 2009–2021. doi: <https://doi.org/10.1109/tsp.2006.872556>
15. Karimi-Ghartemani, M., Iravani, M. R. (2005). Measurement of harmonics/inter-harmonics of time-varying frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (1), 23–31. doi: <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2004.837674>
16. Valenzuela, J., Pontt, J. (2009). Real-time interharmonics detection and measurement based on FFT algorithm. *2009 Applied Electronics*, 259–264.
17. Tian, X., Zhang, T., Zhang, Q., Xu, H., Song, Z. (2018). Pulse Compression Analysis for OFDM-Based Radar-Radio Systems. *Machine Learning and Intelligent Communications*, 381–390. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73447-7_42
18. Herasimov, S., Tymochko, O., Kolomiitsev, O., Aloshin, G., Kriukov, O., Morozov, O., Alekseyev, V. (2019). Formation Analysis of Multi-Frequency Sig-

nals of Laser Information Measuring System. EUREKA: Physics and Engineering, 5, 19–28. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00984>

19. Карлов, В. Д., Кузнєцов, О. Л., Артеменко, А. М. (2018). Постановка задачі оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при врахуванні корельованих флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 3, 115–121. doi: <https://doi.org/10.30748/zhups.2018.57.17>

20. Kuznietsov, O., Karlov, V., Karlov, A., Kiyko, A., Lukashuk, O., Biesova, O., Petrushenko, M. (2020). Estimation of the Dispersion of the Error in Measuring the Frequency of a Pack with Correlated Fluctuations in the Initial Phases of its Radio Pulses. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW). doi: <https://doi.org/10.1109/ukrmw49653.2020.9252588>

21. Сєдишев, Ю. М., Карпенко, В. І., Атаманський, Д. В. та ін. (2010). Радіоелектронні системи. Х.: ХУПС, 418.

22. Mogyła, A. A. (2014). Application of stochastic probing radio signals for the range-velocity ambiguity resolution in doppler weather radars. Radioelectronics and Communications Systems, 57 (12), 542–552. doi: <https://doi.org/10.3103/s0735272714120036>

23. Ghasemi, A., Abedi, A., Ghasemi, F. (2012). Propagation of Radar Waves. Propagation Engineering in Radio Links Design, 299–365. doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5314-7_6
219, м. Чернівці, Україна, 58012