

ВИЯВЛЕННЯ І ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛІВ ЦІЛІ З РОЗСПОВАННЯМ ЗА ЧАСТОТОЮ І ЗАТРИМКОЮ В ПРИСУТНОСТІ СИГНАЛОПОДІБНИХ ПЕРЕШКОД

У статті запропонований метод розв'язання задачі оптимального виявлення і фільтрації сигналу цілі на фоні сигналподібних перешкод. Показано, що найбільш стійким до відмітності дійсного розподілу від модельного є критерій відстані. Для забезпечення методу мінімізації метричного простору розглянуті питання, які необхідно вирішити.

Особливістю сучасної радіолокації є ускладнення типу цілей і перешкодової обстановки. При цьому не завжди можуть бути доведені до оптимальної алгоритмічної розв'язуваності задачі виявлення і фільтрації таких сигналів цілей (СЦ), для яких несправедливі припущення про точковий їх характер за всіма аргументами або про можливість апроксимації прийнятого сигналу моделлю дельта-корельованої за всіма аргументами випадкової функції [1]–[4]. Наслідки відмітності істинних розподілів СЦ і перешкод від їхніх модельних зображень в окремих випадках можуть бути зменшені використанням робастних (стійких) процедур [5], [6]. Однак і в цьому разі відмітність форм розподілів від симетричних знижує ефективність цих процедур [6, с. 303].

Найбільш стійким до відмітності дійсного розподілу від модельного під час виявлення і фільтрації СЦ у присутності перешкод є критерій відстані [6, с. 224]. Суть його полягає у визначенні деякої досить загальної міри близькості (відстані) між двома функціями розподілення й оцінювання цієї близькості (відстані).

Відомо [7, с. 34], що найефективнішим способом завдання метричної відстані є аксіоматичне введення скалярного добутку векторів. Якщо метрика, породжувана скалярним добутком, є метрикою L_2 , то функціональний зв'язок між скалярним добутком і нормою в метричному просторі має вигляд:

$$(f, f) = \|f\|^2; (g, g) = \|g\|^2,$$

тоді

$$\|f - g\|^2 = (f - g, f - g).$$

Розкриваючи скалярний добуток, одержуємо:

$$(f - g, f - g) = (f, f) - (f, g) - (g, f) + (g, g).$$

Оскільки $(g, f) = (f, g)^*$, то маємо:

$$\begin{aligned} -(f, g) - (g, f) &= -[(f, g) + (g, f)] = -[(f, g) + (f, g)^*] = \\ &= -\{\operatorname{Re}[(f, g)] + j \operatorname{Im}[(f, g)] + \operatorname{Re}[f, g] - j \operatorname{Im}[(f, g)]\} = -2 \operatorname{Re}[(f, g)] \end{aligned}$$

Тоді

$$\|f - g\|^2 = (f, f) - 2 \operatorname{Re}[(f, g)] + (g, g). \quad (1)$$

В умовах, коли $(f, f) = \|f\|^2 = 1$ і $(g, g) = \|g\|^2 = 1$, перепишемо (1) у вигляді

$$\|f - g\|^2 = 2\{1 - \operatorname{Re}[(f, g)]\}. \quad (2)$$

У загальному випадку

$$\left\| \frac{f}{\|f\|} - \frac{g}{\|g\|} \right\|^2 = 2 \left\{ 1 - \frac{\operatorname{Re}[(f, g)]}{\|f\| \cdot \|g\|} \right\}. \quad (3)$$

Таким чином, мінімізація метричної відстані між двома функціями (у даному випадку між f і g) зводиться до максимізації дійсної частини їхнього скалярного добутку.

За визначенням [8, с. 132] для окремого випадку Гільбертового простору, а саме: функціонального простору L_2 – скалярний добуток визначається в такий спосіб:

$$(f, g) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) f^*(t, \alpha) dt, \quad (4)$$

де $f(t, \alpha)$ – відома функція часу і параметрів α , що описує очікуваний сигнал;

α – фіксуючий під час виявлення і фільтрації параметр або сукупність параметрів (час запізнювання, доплерівський зсув частоти і т.ін.);

$g(t)$ – результуючий сигнал (суміш СЦ і перешкод) на вході пристрою обробки.

З виразу (3) випливає, що визначення оптимальних методів обробки можливе як безпосередньо при алгоритмічній розв'язуваності задачі мінімізації метричної відстані між функціоналами f і g згідно з (2) і (3), так і при максимізації кореляційного інтеграла (4). Очевидно, що вибір того або іншого способу визначається повнотою і сталістю апіорної інформації про СЦ і перешкоди.

У ряді теоретичних досліджень, наприклад [1]–[4], [9], розроблені методи виявлення і фільтрації, оптимальні відповідно до критерію відносин правдоподібності, що являє собою відношення щільностей імовірності реалізації вхідного сигналу $g(t)$ за двох умов: коли діє суміш СЦ і перешкоди та коли діє тільки перешкода:

$$I(g) = \frac{P_{cn}(g)}{P_n(g)}. \quad (5)$$

Допустимість тієї або іншої апроксимації відносно розподілу суміші СЦ із перешкодою і розподілу перешкоди дозволяє визначити оптимальну процедуру виявлення і фільтрації згідно з критерієм максимуму відносин правдоподібності (метод максимальної правдоподібності (ММП)). Наприклад при точковій одношвидкісній і одномодовій цілі, для якої відбитий сигнал є точною копією зондувального сигналу (ЗС), але що має фіксований зсув за частотою і затримкою, і при впливі білого шуму оптимальна за ММП обробка зводиться до обчислення кореляційного інтеграла. У цьому разі опорний сигнал є комплексно-спряженим із ЗС і для кожного елемента поля аналізу має фіксований зсув за доплерівською частотою і затримкою [2], [3], [4].

Особливе місце в радіолокаційних задачах займає випадок, коли прийнятий сигнал $g(t)$ можна розглядати як процес (випадкову функцію) дельта-корельований або за часом [9], або за доплерівським зсувом, або за затримкою і т.ін. [2].

У багатьох випадках така апроксимація має чітке фізичне трактування. Однак, як зазначається в [9], дельта-корельованих процесів у природі не існує, і ступінь допустимості такої апроксимації визначається відношенням часу або радіуса кореляції випадкової функції до часу спостереження або до інших характерних часових, швидкісних або просторових масштабів задачі. Усі реальні процеси характеризуються ненульовим радіусом кореляції і дельта-корельована випадкова функція – результат асимптотичного розкладання за параметром, пов'язаним з його радіусом кореляції. Лише при досить жорстких обмеженнях, наприклад в умовах статистичної незалежності амплітуди і фази огинаючого сигналу, що приймається як обов'язкова й абсолютна апіорна інформація [1]–[4], [9], при статистичній незалежності СЦ і перешкод, а також при цілком відомих щільностях розподілів цілей і перешкод вдається одержати за ММП замкнуті розв'язки для відповідних динамічних систем.

Що стосується ММП, то за сучасними уявленнями [10, с. 483] в основі цього методу „не лежать ніякі чітко виражені розуміння оптимальності, і широко розповсюджена віра в його високу якість базується на великому успіху, з яким ММП застосовувався до численних конкретних задач”. Зазвичай це – такі задачі [1]–[4], [9], за умовами яких допускаються згадані раніше апроксимації.

Посилання на оцінку ММП [10], що цитується, наведені для того, щоб застерегти від надмірного захоплення брати за еталонні результати, отримані з використанням ММП, при зіставленні з результатами за іншими методами. У критерії відстаней розуміння оптимальності виражене наочно і чітко використання ж ММП у кожному конкретному випадку вимагає ретельного розгляду фізичної моделі формування СЦ і перешкод з метою обґрунтування тих або інших задач передумов, що спрощують постановку.

У ряді задач локації можуть бути нездоланими спроби обґрунтування використання апроксимації цілей точковими моделями або прийнятим сигналом – дельта-корельованими випадковими функціями. Наприклад, під час оцінювання параметрів збурювальних впливів (ЗВ) на трасах радіозв'язку [11] при локації цілей типу турбулентностей струменя вихлопних газів (ТВГ) високолітальних ракет [12], в умовах статистичної неоднорідності каналів розповсюдження [13], [14], форми і параметри розподілів СЦ і перешкод змінюються в настільки широкому інтервалі, а кореляційні зв'язки – настільки складні, що розумні їхні апроксимації точковими цілями або дельта-корельованими випадковими функціями не є можливими.

У роботі [15] було показано, зокрема, що для вищезгаданих умов [11]–[14] інформативність доплерівського спектра прийнятого сигналу щодо щирих параметрів ЗВ може погіршуватися в десятки разів. Крім того, для цих умов характерна наявність перешкод типу відображень від підстилаючої поверхні так званих пасивних перешкод (ПП) [13] або реверберація [2] у гідролокації і т.ін. Статистичні характеристики ПП корельовані з характеристиками СЦ для ЗВ і ТВГ та погано апроксимуються гауссівськими моделями [16].

У роботі розглянемо ряд питань, пов'язаних з можливістю алгоритмічної розв'язуваності задачі оптимального виявлення і фільтрації сигналу цілі на фоні сигналподібних перешкод (СПП). Думатимемо, що ціль і канал розповсюдження мають "м'яку" структуру [2], тобто структуру з нефіксованими і змінними у часі параметрами, і описуються функціями розсіювання за частотою і затримкою.

Модель розглянутої системи радіолокації наведена на рис. 1. На рисунку і далі по тексту аббревіатурою ЗВ позначатимемо об'єкти локації з "м'якою" структурою, у тому числі і типу ТВГ.

Ошибка!

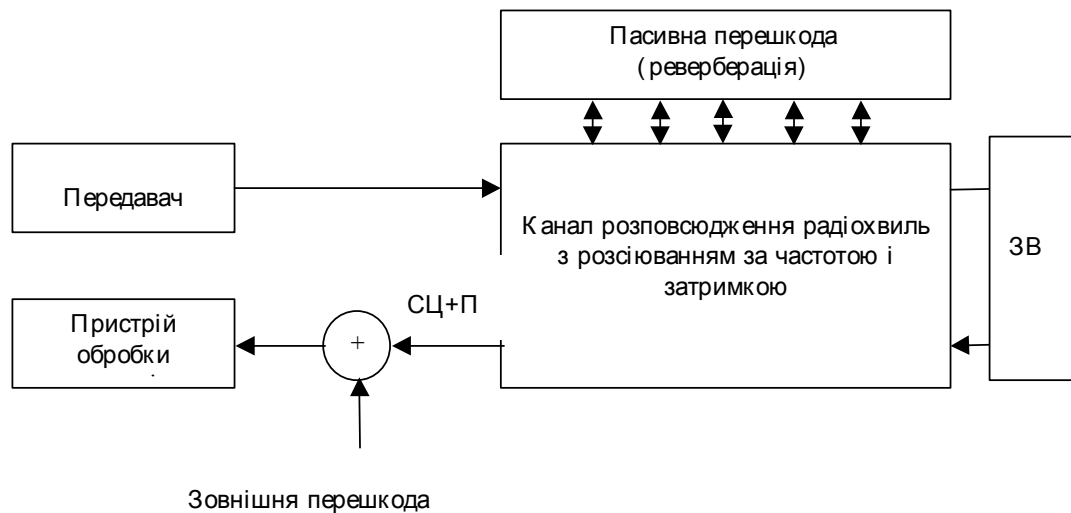


Рис. 1

Як критерій оптимальності виявлення і фільтрації виберемо метод мінімізації метричної відстані (ММВ) між прийнятим сигналом і його стохастичною моделлю. Особливостями, що зумовлюють необхідність використання методу ММП, є:

1) неможливість використання як обов'язкової й абсолютної апріорної інформації, умови статистичної незалежності амплітуди і фази, що обгинає прийнятий сигнал, тобто неможливість використання допущення про дельта-корельованість прийнятого сигналу як випадкової функції;

2) випадковий характер СЦ і перешкод з нефіксованими щільностями розподілів, у тому числі з невідомими значеннями їхніх математичних сподівань;

3) необхідність використання апріорної інформації про характеристики і параметри ЗВ і каналу розповсюдження радіохвиль, що уточнюється за результатами оперативного оцінювання і за вибірковими реалізаціями. Така необхідність пов'язана з некоректним характером обернених задач із усіма, що впливають з цього, особливостями їхнього розв'язання [17], [20];

4) необхідність наявності адекватного оцінювання похибки вибірки або адекватного оцінювання міри близькості розподілів прийнятого сигналу і його стохастичної моделі, що також пов'язано з некоректним характером задачі виявлення і фільтрації;

5) сигналподібний характер пасивних перешкод, відображень від місцевих предметів, реверберації;

6) ускладнення можливості розв'язання задачі, що зумовлені обмеженнями на параметри імпульсної послідовності ЗС і призводять до істотної шумоподібності сигналу ЗВ і сигналподібності перешкод;

7) необхідність подання результату фільтрації неєдиним значенням кожного з оцінюваних параметрів і розподілом імовірності прийнятого рішення про виявлення.

Для забезпечення можливості використання методу ММВ слід розглянути такі питання:

– виявлення функціональної взаємодії між різними факторами, що визначають особливості моделі СЦ і перешкод (тут і далі, якщо не буде обговорено особливо, під перешкодами розумітимуть пасивні перешкоди, відображення від місцевих об'єктів, реверберація);

– розроблення стохастичної моделі радіолокаційного сигналу;

– розроблення методу оцінювання адекватності прийнятого сигналу і його стохастичної моделі, що обмежується сумарною похибкою оцінювання параметрів за вибіркою сигналу і ступенем повноти апріорної інформації, що уточнюється оперативно. До складу апріорної інформації (за значущістю найбільш важливої) включаються і наближені функціональні співвідношення, що визначають стохастичну модель сигналу, який надходить на вхід пристрою обробки;

– вибір способу мінімізації метричної відстані й розроблення критерію ухвалення рішення про виявлення і параметри ЗВ;

обґрунтування структурної схеми пристрою, що реалізує оптимальний алгоритм виявлення і фільтрації за критерієм ММВ.

У даний час вважається, що і метод МП і метод ММП ґрунтується на аксіоматичних визначеннях, не виведених один із одного. Однак, якщо метод МП дотепер визнається невиведеним з основних математичних концепцій, то метод ММВ виводиться з аксіом, пов'язаних з поняттями топологічної близькості. Крім цього, метод МП у традиційній постановці не є робасним (стійким) [5], у той час, як поняття метричної відстані зумовлює робасні процедури.

Для класу задач, що розглядають стохастичні сигнали цілей з розсіюванням у присутності СПП, істотно загострюються проблеми малості вибірки. Подолання проблеми малої вибірки може бути досягнуто ретельним дослідженням адекватності використовуваної апріорної інформації реальним фізичним процесам і виявленням додаткових ознак процесів для використання їх як апріорної інформації. Ця особливість малої вибірки відзначалася багатьма дослідниками, наприклад [21, с. 76]: “Зазначу в дужках, що сучасний апарат теорії малих вибірок, як тільки він виходить за рамки простого підрахунку своїх власних, спеціально визначених параметрів, і перетворюється в метод позитивних статистичних висновків для нових випадків, уже не вселяє мені ніякої довіри”. Як примітка, відзначимо один із сучасних критеріїв малості вибірки [19, с. 55], до якого повною мірою належить наведена цитата.

У нашому випадку орієнтація на малі вибірки зумовлює необхідність дослідження апріорної інформації аж до виявлення функціональних зв'язків між різними факторами, що визначають стохастичний характер прийнятого сигналу, оскільки подолання проблеми малої вибірки досягається в тих випадках, „... коли цей апарат (стилістичний вивід-авт.) застосовується статистиком, що явно знає або хоча б неявно відчуває основні елементи динаміки досліджуваної ситуації” [21, с. 76].

Ілюстрація способу і продуктивності застосування методу ММВ для алгоритмічної можливості розв'язання задачі виявлення і фільтрації стохастичних сигналів цілей з розсіюванням за частотою і затримкою в присутності СПП є метою даної статті.

Висновки

1. Метод максимальної правдоподібності в традиційній постановці неробасний (нестійкий), у той час, як поняття метричної відстані зумовлює робасні процедури.

2. Метод мінімізації метричної відстані, що використовує як процедуру зіставлення прийнятого радіолокаційного сигналу із сигнальною і перешкодовою інформацією процедури оцінювання міри близькості, є робасним (стійким) до вибірки і її розподілів. Ця міра близькості аксіоматично є більш оптимальною в порівнянні з іншими відомими критеріями зіставлення в умовах відсутності обмежень на вихідну інформацію.

3. Під час використання методу мінімізації метричної відстані ухвалення рішення про виявлення залежить не тільки від традиційної для радіолокації характеристики відносин “сигнал–перешкода” (q), але і від більш інформативної характеристики – похибка ухвалення рішення, що пов'язана як з q , так і з похибкою вихідної інформації.

4. Дозвіл цілей у методі мінімізації метричної відстані виробляється разом із процедурою виявлення, що відповідає сучасному уявленню про оптимальність методів спільного виявлення і дозволу в порівнянні з методами послідовного виявлення, а потім виміру характеристик.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Сосулин Ю.Г.* Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. – М.: Сов. радио, 1978. – 320 с.
2. *Ван Трис Г.* Теория обнаружения, оценок и модуляции. – Т. 3. – М.: Сов. радио, 1977. – 664 с.
3. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
4. *Ширман Я.Д., Манжос В.Н.* Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
5. *Хьюбер П.* Робастность в статистике. – М.: Мир, 1984. – 304 с.
6. *Кокс Д., Хинли Д.* Теоретическая статистика. – М.: Мир, 1978. – 560 с.
7. *Воеводин В.В., Кузнецов Ю.А.* Матрицы и вычисления. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1984. – 320 с.
8. *Ефимов А.В. и др.* Математический анализ (специальные разделы). Ч.II. Применение некоторых разделов математического и функционального анализа. – М.: Высшая школа, 1980. – 295 с.
9. *Кляцкин В.И.* Стохастические уравнения и волны в случайно неоднородных средах. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1980. – 336 с.
10. Математическая энциклопедия / Гл. ред. И.М. Виноградов. – Т.3. КОО – ОД. – М.: Сов. энциклопедия, 1982. – 1184 с.
11. УДК 519.64; 02830044102. Оптимизация определения параметров возмущающих воздействий (ВВ) на трассах дальней радиосвязи / Руководитель работы акад. А.Н. Тихонов. – М.: МГУ.
12. *Draper I.S., Iarvinen P.O., Conley T.D.* Analysis of radar return from turbulent high-altitude rocket exhaust plumes. AIAA I., 1970, Sept, vol. 8. – № 9, P. 1568–1573.

13. *Алебастров В.А., Гойхман Э.Ш., Заморин И.М. и др.* Основы загоризонтной радиолокации / Под ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.
14. *Благовещенский Д.В.* Распространение декаметровых радиоволн в высоких широтах. – М.: Наука, 1981. – 180 с.
15. *Герасимов Ю.С., Гордеев В.А., Кристаль В.С.* Оценка параметров возмущающих воздействий на трассах дальней радиосвязи // Радиотехника. – 1982. – Т. 37. – №9. – С. 70–73.
16. *Всехсвятская И.С.* Статистические свойства сигналов, отраженных от ионосферы. – М.: Наука, 1973. – 136 с.
17. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1979. – 288 с.
18. *Вапник В.Н.* Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1979. – 448 с.
19. Алгоритмы и программы восстановления эмпирических зависимостей / Под. ред. В.Н. Вапника. – М.: Наука. – ГРФМЛ, 1984. – 816 с.
20. *Василенко Г.И.* Теория восстановления сигналов. – М.: Сов. радио, 1979. – 272 с.
21. *Винер Н.* Кибернетика. – М.: Наука. – ГР изданий для зарубежных стран, 1973. – 344 с.

ПЛЬКЕВИЧ Ігор Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектроніки Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання складних систем;
- обробка радіолокаційної інформації на фоні перешкод.

E-mail: office@eu.zt.ua

Подано 29.09.2003

Пількевич І.А. Виявлення і фільтрація сигналів цілі з розсіюванням за частотою і затримкою в присутності сигналоподібних перешкод

Пилькевич И.А. Обнаружение и фильтрация сигналов цели с рассеянием по частоте и задержке в присутствии сигналоподобных помех

Pil'kevych I.A. The detection and filtration of target signals with frequency and delay dispersion in the presence of the signal interferences

УДК 621.391

Виявлення і фільтрація сигналів цілі з розсіюванням за частотою і затримкою в присутності сигналоподібних перешкод / І.А. Пількевич

У статті запропонований метод розв'язання задачі оптимального виявлення і фільтрації сигналу цілі на фоні сигналоподібних перешкод. Показано, що найбільш стійким до відмінності дійсного розподілу від модельного є критерій відстані. Для забезпечення методу мінімізації метричного простору розглянуті питання, які необхідно вирішити.

УДК 621.391

The detection and filtration of target signals with frequency and delay dispersion in the presence of the signal interferences / I.A. Pil'kevych

In the article the method of solving the task of the optimum detection & filtration of the target signal in the presence of the interferences that are similar to signal is represented. It is shown that the most stable to the difference of the actual distribution from the model one is the criterion of distance. The questions which must be solved for providing the method of minimization of the metric distance are represented.

УДК 621.391

Обнаружение и фильтрация сигналов цели с рассеянием по частоте и задержке в присутствии сигналоподобных помех / И.А. Пилькевич

В статье предложен метод решения задачи оптимального обнаружения и фильтрации сигнала цели на фоне сигналоподобных помех. Показано, что наиболее устойчивым к отклонению действительного распределения от модельного является критерий расстояния. Для обеспечения метода минимизации метрического расстояния рассмотрены вопросы, которые необходимо решить.