

УДК 621.396

Адаптивний виявляч Хотеллінга та дослідження його характеристик

Адаптивный обнаружитель Хотеллинга и исследование его характеристик

Adaptive detector Hotelling and investigation of its characteristics

Науковий керівник - кафедра радіоелектронних і телекомунікаційних систем;
доцент, кандидат технічних наук – Аверочкін В. О.,
магістранти – Седоченко В. А., Гойна А. О.

Научный руководитель – кафедра радиоэлектронных и телекоммуникационных систем;
доцент, кандидат технических наук – Аверочкин В. А.,
магистранты – Седоченко В. А., Гойна А. О.

Supervisor–department of radio–electronic and telecommunication systems;
associate professor, candidate of technical sciences – Averochkin V. O.,
masters – Sedochenko V. A., Hoina A. O.

Анотація. З метою зменшення обчислювальної складності для реалізації адаптивного виявляча Хотеллінга запропоновано використовувати ортогоналізатор Грама-Шмідта. Проведені дослідження показали, що ефективність розробленого алгоритму практично збігається з характеристиками адаптивного виявляча Хотеллінга, що використовує звернення усередненої оцінки коваріаційної матриці завад в квадратурних каналах.

Ключові слова: адаптивність, адаптивний виявляч Хотеллінга, показники ефективності виявлення, потенційні характеристики виявляча Хотеллінга, дослідження осереднених характеристик виявлення процедури Хотеллінга, критерії оптимальності виявлення, синтез, критерій Неймана-Пірсона.

Аннотация. С целью уменьшения вычислительной сложности для реализации адаптивного выявляча Хотеллинга предложено использовать ортогонализатор Грама-Шмидта. Проведенные исследования показали, что эффективность разработанного алгоритма практически совпадает с характеристиками адаптивного выявляча Хотеллинга, что использует обращение усредненной оценки ковариационной матрицы помех в квадратурных каналах.

Ключевые слова: адаптивность, адаптивный обнаружитель Хотеллинга, показатели эффективности обнаружения, потенциальные характеристики обнаружителя Хотеллинга, исследования усредненных характеристик обнаружения процедуры Хотеллинга, критерии оптимальности обнаружения, синтез, критерий Неймана-Пирсона.

Annotation. In order to reduce the computational complexity for the implementation of the adaptive Hotelling detector, it is proposed to use a Gram-Schmidt orthogonalizer. Studies have shown that the efficiency of the developed algorithm almost coincides with the characteristics of the adaptive Hotelling detector, which uses the treatment of the average estimate of the covariance matrix of interference in quadrature channels.

Keywords: adaptability, adaptive Hotelling detector, detection efficiency indicators, potential characteristics of Hotelling detector, study of averaged characteristics of Hotelling detection procedure, detection optimality criteria, synthesis, Neumann-Pearson criterion.

Задача забезпечення ефективного функціонування радіоелектронних систем в умовах діючих природних і навмисних завад є актуальною для сучасної радіолокації і по сьогоднішній день. Рішенню цієї проблеми присвячені безліч методів та способів, які мають свої переваги і недоліки.

У даній роботі запропоновано один з шляхів використання та проведено дослідження ймовірнісних характеристик вирішальної статистики Хотеллінга для обробки радіосигналів в умовах адитивної суміші корельованих та некорельованих завад.

В умовах апіорно невідомої завадової обстановки, виявляч Хотеллінга передбачає формування вирішальної статистики у вигляді квадратичної форми:

$$T^2 = X^T \hat{B}_X^{-1} X \underset{H_0}{\overset{H_1}{>}} T_0^2,$$

де $X^T = [X_D^T \quad M \quad X_F^T]$ – вектор відліків квадратурних складових вхідного сигналу; \hat{B}_X – оцінка невідомої коваріаційної матриці завад, отримана на основі m навчальних векторів X_i ($i = 1K m$) відліків квадратурних складових вхідних сигналів; T_0^2 – поріг, що забезпечує необхідне значення ймовірності помилкової тривоги F .

Класичний підхід реалізації в такому вигляді адаптивної процедури Хотеллінга передбачає оцінювання коваріаційних матриць завад в кожному квадратурному каналі, усереднення отриманих оцінок коваріаційних матриць завад і звернення усередненої оцінки з метою формування вирішальних статистик в кожному квадратурному каналі. При цьому операція звернення усередненої оцінки коваріаційної матриці завад вимагає істотних обчислювальних витрат і може служити основною перешкодою для практичної реалізації запропонованих алгоритмів виявлення.

Можливий підхід до виключення необхідності реалізації процедури звернення усередненої оцінки коваріаційної матриці полягає в декореляції складових кожного квадратурного каналу між собою з наступним формуванням вирішальної статистики. Так, якщо коваріаційні матриці завад у кожному квадратурному каналі рівні B_{IQ} , то застосовуючи до векторів сигналів квадратурних каналів Y_I і Y_Q декорелююче перетворення P отримаємо вектори:

$$U_I = PY_I, \quad U_Q = PY_Q,$$

кожен з яких має діагональну коваріаційну матрицю виду:

$$B_U = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & 0 & M & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & M & 0 \\ L & L & M & L \\ 0 & 0 & M & \sigma_N^2 \end{bmatrix},$$

де σ_i^2 , $i = 1K N$ дисперсії декорельованих складових сигналів квадратурних каналів.

Враховуючи структуру матриці B_U вирішальна статистика процедури Хотеллінга має вигляд:

$$Z = U_I^T B_U^{-1} U_I + U_Q^T B_U^{-1} U_Q = \sum_{i=1}^N \frac{U_{Ii}^2}{\sigma_i^2} + \sum_{i=1}^N \frac{U_{Qi}^2}{\sigma_i^2},$$

де $U_{Ii}, U_{Qi}, i = 1 \dots N$ складові сигналів кожного квадратурного каналу.

Структурна схема адаптивного виявляча Хотеллінга, що використовує ортогоналізатори Грама-Шмідта для декореляції складових квадратурних сигналів представлена на рисунку 1.

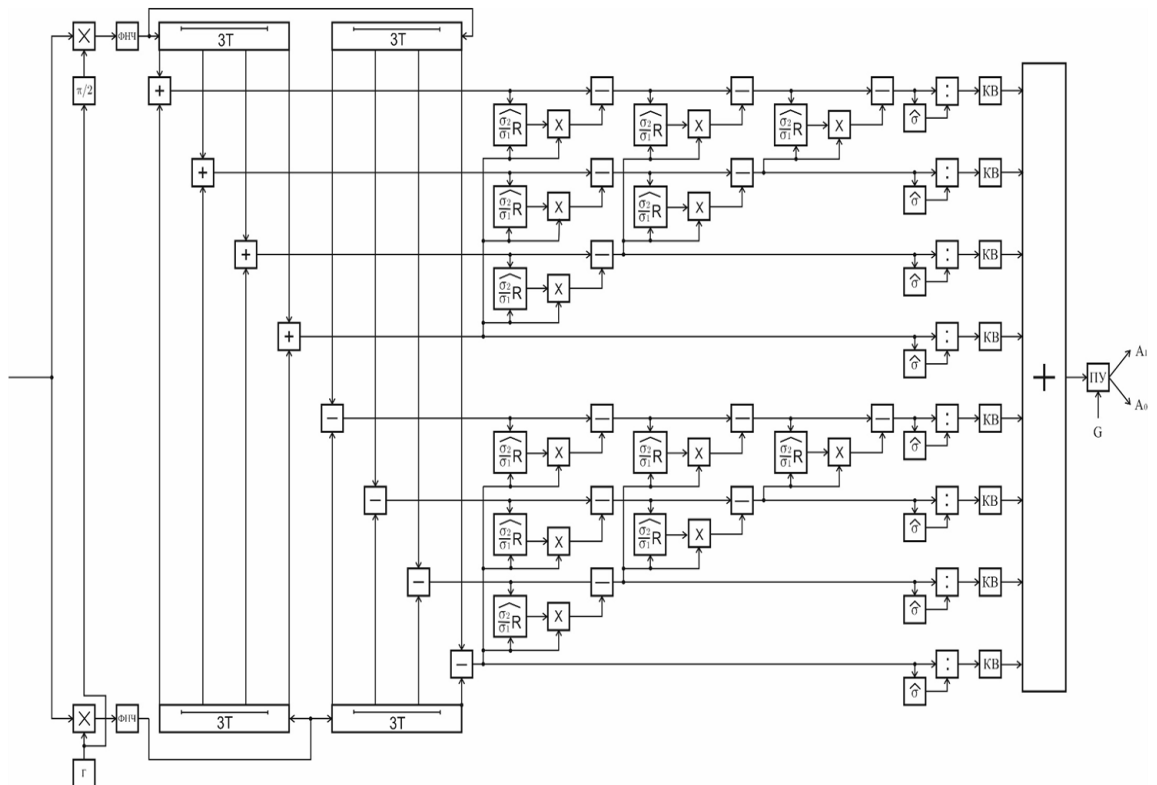


Рисунок 1 – Структурна схема адаптивного виявляча Хотеллінга, що використовує ортогоналізатори Грама-Шмідта для декореляції складових квадратурних сигналів

На даній схемі не складно показати, що ортогоналізатор Грама-Шмідта забезпечує декореляцію вихідних відліків Y_1, Y_2, \dots, Y_4 . Так, на першій ітерації, при переході від

$$X_1, X_2, X_3, X_4 \text{ до } X_5 = X_3 - \frac{\sigma_3}{\sigma_4} R_{34} X_4, X_6 = X_2 - \frac{\sigma_2}{\sigma_4} R_{24} X_4, X_7 = X_1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_4} R_{14} X_4, \text{ де}$$

реалізується декореляція відліку $X_4 = Y_4$ і відліків $X_5 = Y_3, X_6, X_7$. На другій ітерації, при переході від $X_5 = Y_3, X_6, X_7$ до X_8, X_9 , реалізується декореляція відліку $X_5 = Y_3$ і відліків $X_8 = Y_2, X_9$, і на третій ітерації, при переході від $X_8 = Y_2, X_9$ до Y_1 реалізується декореляція відліку $X_8 = Y_2$ і відліку Y_1 .

В умовах апріорної невизначеності щодо параметрів діючих завад і використанні адаптивного Байсового підходу до її подолання необхідності реалізації процедури

звернення усередненої оцінки коваріаційної матриці, де невідомі коефіцієнти регресії $\frac{\sigma_i}{\sigma_j} R_{ij}$ замінюються на їх максимально правдоподібними оцінками: $\frac{\hat{\sigma}_i}{\hat{\sigma}_j} R_{ij}$.

При цьому вирішальна статистика адаптивної процедури Хотеллінга визначається співвідношенням:

$$Z = \sum_{i=1}^N \frac{U_{1i}^2}{\hat{\sigma}_i^2} + \sum_{j=1}^N \frac{U_{2j}^2}{\hat{\sigma}_j^2},$$

де $\hat{\sigma}_i^2$ – оцінки максимальної правдоподібності дисперсій сигналів на виходах адаптивних ортогоналізаторов Грама-Шмідта.

Однак наведена структурна схема передбачає роздільну обробку сигналів квадратурних каналів. Динамічні характеристики адаптивного виявляча можуть бути поліпшені за рахунок усереднення однакових коефіцієнтів регресії використовуваних в ортогоналізаторі Грама-Шмідта та дисперсій відповідних сигналів на його виході.

Завдання визначення аналітичних співвідношень для ймовірностей помилкової тривоги і правильного виявлення, реалізованих адаптивним виявлячем Хотеллінга використовують ортогоналізатор Грама-Шмідта для декореляції складових квадратурних сигналів, пов'язана з істотними математичними труднощами знаходження умовних щільностей розподілу її вирішальної статистики. Тому розрахунки характеристик виявлення проводилися методом статистичного моделювання.

Результати розрахунків у разі виявлення сигналу відповідного «оптимальній» швидкості руху цілі на фоні нерухої завади з межперіодним коефіцієнтом кореляції R , експоненційної (ϵ) і гаусової (γ) формами кореляційної функції і обсязі навчальних вибірок використовуваних для оцінювання невідомих коефіцієнтів регресії і дисперсій сигналів квадратурних складових $m = 10$ наведені на рисунках 2 – 4 суцільними лініями. Пунктирними лініями наведені потенційні характеристики процедури Неймана-Пірсона, штрих-пунктирними лініями наведені потенційні характеристики процедури Хотеллінга і точковими лініями наведені характеристики виявлення адаптивної процедури Хотеллінга, що використовує звернення усередненої оцінки коваріаційної матриці завад при $m = 10$.

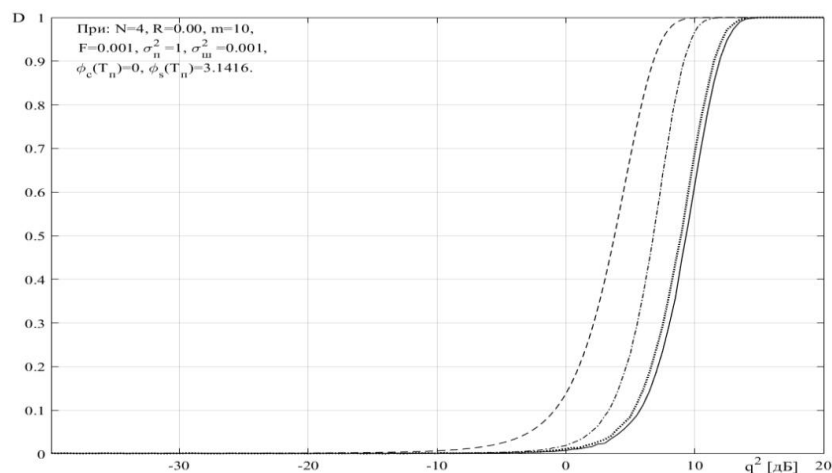


Рисунок 2 – Характеристики виявлення процедури Хотеллінга, що використовує ортогоналізатор Грама-Шмідта для декореляції складових квадратурних сигналів, при $R = 0.00$

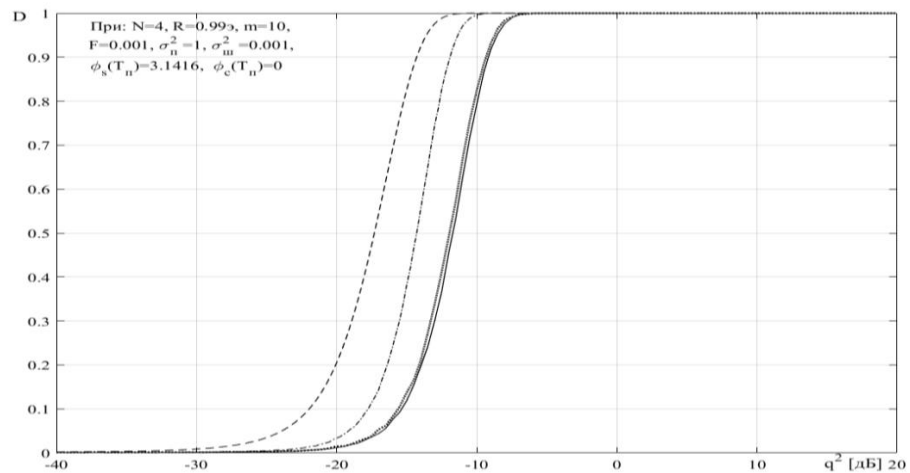


Рисунок 3 – Характеристики виявлення процедури Хотеллінга, що використовує ортогоналізатор Грама-Шмідта для декореляції складових квадратурних сигналів, при $R = 0.99e$

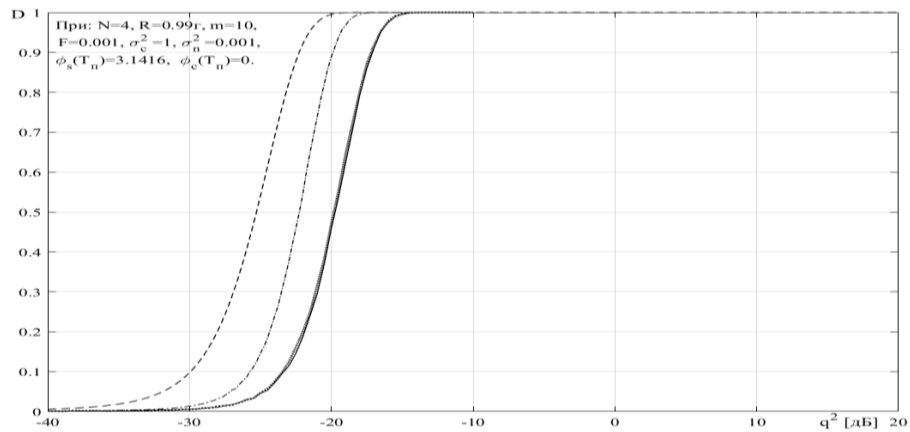


Рисунок 4– Характеристики виявлення процедури Хотеллінга, що використовує ортогоналізатор Грама-Шмідта для декореляції складових квадратурних сигналів, при $R = 0.99z$

Аналіз наведених залежностей показує, що характеристики виявлення адаптивного виявляча Хотеллінга, що використовує ортогоналізатор Грама-Шмідта для декореляції складових квадратурних сигналів практично збігаються з характеристиками адаптивного виявляча Хотеллінга, що використовує звернення усередненої оцінки коваріаційної матриці завад в квадратурних каналах.

Список використаної літератури

1. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ.– М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.: ил.
2. Обработка сигналов в радиотехнических системах: Уч. пособие / Долматов А. Д., Елисеєв А. А., Лукошкин А. П., Оводенко А. А., Устинов Б. В.; Под ред. А. П. Лукошкина. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987, 400 с.
3. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. - М.: Радиотехника, 2004.-319 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. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники: В 3-х томах М.: Советское радио, 1966-1978.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966.- 680 с.
7. Хелстром К. Статистическая теория обнаружения сигналов. М.: Изд-во иностранной литературы. 1963. - 431с.
8. Вайнштейн Л. А., Зубаков В. Д. Выделение сигналов на фоне случайных помех М.: Советское Радио, 1960.- 448 с.
9. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределённости и адаптация информационных систем. — М.: Советское радио, 1977. -432 с.
10. Аверочкин В. А., Баранов П. Е., Токолов В. С. Эффективность адаптивных фильтров с действительными весовыми коэффициентами // Радиоэлектроника. – 1987. – № 4. – С. 78–79. (Изв. высш. учеб. заведений).
11. Аверочкин В. А., Троянский А. В. Обнаружитель Хотеллинга, использующий декорреляцию квадратурных каналов // Праці Одеського політехнічного університету, 2014. Вип. 1(43) С. 225-229.
12. Аверочкин В. А., Танчик В. Г. Усредненные характеристики обнаружения критерия Хотеллинга// МНПК «Современные информационные и электронные технологии». 2016. Том 1(17) С. 92-93.

Аверочкин Володимир Олексійович,
Аверочкин Владимир Алексеевич,
Averochkin Vladimir,
Седоченко Владислав Анатолійович,
Седоченко Владислав Анатольевич,
Sedochenko Vladyslav,
Гойна Артем Олександрович,
Гойна Артём Александрович,
Hoina Artem.