

УДК 681.396.96:681.32

В.Д. Карлов¹, Н.Н. Петрушенко², А.В. Челпанов¹

¹ Харківський університет Воздушних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

² Командование Воздушных Сил Вооруженных сил Украины, Винница

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ МАНЕВРА ЦЕЛИ

В статье проанализировано влияние маневра на качество сопровождения целей, проанализированы основные методы обнаружения маневра и оценки его интенсивности. Также рассмотрена возможность реализации непараметрических методов обнаружения маневра цели с использованием ранговых тестовых статистик в условиях неопределённости распределения анализируемых параметров – значений динамических ошибок фильтрации (невязок); проведен анализ эффективности применения непараметрических методов.

Ключевые слова: маневрирующая цель, непараметрические методы.

Введение

Постановка проблемы. Одной из основных проблем, снижающих эффективность вторичной обработки радиолокационной информации, является манёвр цели.

Манёвр цели в ходе её сопровождения (наблюдения) может привести:

- к срыву сопровождения;
- снижению точности оценки параметров траектории;
- неправильной классификации типа цели и степени её опасности.

В связи с этим возникает задача своевременно обнаружения манёвра цели и определения (оценки) его характеристик – интенсивности (ускорения) манёвра и момента начала манёвра.

Характеристики манёвра используются для коррекции параметров линейного фильтра сглажи-

вания (для его модификации) или при переключении на фильтр более высокого порядка, учитывающего ускорение манёвра [3, 5, 6].

Все методы обнаружения манёвра цели можно разделить на два класса (группы) – параметрические и непараметрические.

Применение параметрических методов основано на знании законов распределения параметров, используемых для обнаружения манёвра (в частности, обновляющей последовательности или динамических ошибок, получаемых в ходе фильтрации) как при отсутствии, так и при наличии манёвра.

К достоинствам параметрических методов можно отнести возможность обеспечения заданных характеристик обнаружения (вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги) и оценки интенсивности (ускорения) манёвра.

В то же время при изменении закона распределения параметров обновляющей последовательно-

сти (например, невязки), в частности, за счёт увеличения дисперсии ошибок единичных измерений при наличии помех или за счёт аномальных наблюдений при сбоях в работе аппаратуры, снижаются достоверность обнаружения манёвра и точность оценки его характеристик.

Достоинством непараметрических методов обнаружения манёвра является их инвариантность к изменению распределения параметров обновляющей последовательности (динамических ошибок фильтрации). Тем самым обеспечивается заданный уровень ложных тревог в различных условиях функционирования, в том числе в условиях априорной неопределённости к виду распределения входных данных.

В связи с этим необходимо рассмотреть возможность и сравнительную эффективность применения непараметрических методов для обнаружения и оценки характеристик манёвра.

Анализ литературы. В известной литературе основное внимание уделяется применению непараметрических методов в радиоэлектронных системах обнаружения сигналов в связи с проблемой стабилизации частоты ложных тревог при неконтролируемом изменении свойств помехи [1, 2, 5]. В частности, рассмотрены возможности реализации знаковых и ранговых процедур обработки сигналов и проведена оценка их эффективности.

В [3, 4, 6] рассмотрены возможности использования динамических ошибок фильтрации для обнаружения манёвра цели, измерения интенсивности манёвра и коррекции параметров фильтра параметрическими методами.

Цель работы. Провести анализ статистических характеристик обновляющей последовательности при фильтрации текущих измерения координат целей (значений невязок и их квадратичных форм) и рассмотреть возможности реализации непараметрических методов обнаружения манёвра цели с использованием знаковых и ранговых тестовых статистик.

Основная часть

К основным параметрам, которые могут быть использованы для обнаружения манёвра цели, можно отнести следующие [5]:

- текущие замеры (оценки) значений ускорения цели;
- сигнальные параметры;
- параметры обновляющей последовательности, полученной в ходе текущей траекторной обработки (значения невязок Z_i , квадратичных форм Q_i и др.) или их усреднённые (сглаженные) величины.

Рассмотрим основные характеристики параметров обновляющего процесса калмановского фильтра при отсутствии и наличии манёвра цели и

возможности их использования для обнаружения манёвра.

К таким параметрам можно отнести значения невязки Z_i , их квадратичные формы Q_i или сглаженные значения параметров.

$$Z_i = Y_i - H_i X_{i/i-1};$$

$$Q_i = Z_i^T P_i^{-1} Z_i; \quad (1)$$

$$\bar{Z}_i = (1 - A)\bar{Z}_{i-1} + AZ_i,$$

где Z_i – значения невязки (рассогласования между измеренным Y_i и экстраполированным $X_{i/i-1}$ значениями параметров); H_i – матрица пересчёта; P_i – корреляционная матрица ошибок (КМО) оценки параметров; \bar{Z}_i – сглаженное значение невязки; A – коэффициент сглаживания.

При отсутствии манёвра и гауссовском распределении ошибок измерения значения невязки также будут распределены по гауссовскому закону с нулевым средним.

Текущие значения квадратичной формы Q_i при этом будут распределены по центральному закону χ^2 с g степенями свободы, где g – размерность вектора. При манёвре цели с ускорением (интенсивностью) g появляются динамические ошибки сопровождения, т.к. реальная траектория цели не будет соответствовать её выбранной модели.

При этом в линейном фильтре значения невязки Z_i увеличиваются на величину [4]:

$$\Delta Z_i = \frac{1}{12} T_{i-m}^2 g, \quad (2)$$

где $T_{i-m} = t_i - t_m$; t_i , t_m – соответственно текущее время и время начала манёвра.

При усреднении (сглаживании) текущих значений невязок (1) их среднее значение на момент времени T_{i-m} будет равно:

$$M[\bar{Z}_i] = \varphi(A, i-m) \cdot \frac{T_{i-m}^2 g}{12}, \quad (3)$$

где φ – сглаживающая функция;

$$\varphi = \frac{[A(i-m)-1]^2 + 1 - 2(1-A)^{i-m}}{A^2(i-m)^2}. \quad (4)$$

В зависимости от направления и вида манёвра будет меняться знак невязки. Интенсивность манёвра определяет абсолютную величину динамических ошибок.

Распределение значений квадратичных форм при манёвре будет нецентральным с параметром нецентральности α .

Использование параметрических методов для обнаружения манёвра основывается на различии параметров распределений при наличии и отсутствии манёвра.

Как отмечалось выше, к недостаткам параметрических методов следует отнести повышение вероятности ложных тревог при изменении статистических характеристик анализируемых параметров, в частности, за счёт влияния помех, сбоев в работе аппаратуры, в случае сложной (групповой) цели и др.

Достоинством непараметрических методов является их инвариантность к виду распределения и возможность стабилизации характеристик обнаружения манёвра в различной целевой и помеховой обстановке.

Одними из наиболее простых непараметрических тестов проверки гипотезы о наличии манёвра цели являются знаковые тесты. Их статистика основана на учёте полярностей (знаков) анализируемых параметров, в частности, выборки текущих значений невязок Z_i в пределах «скользящего окна» размером N :

$$S_k = \sum_{i=k-N+1}^k \operatorname{sgn} Z_i,$$

где $\operatorname{sgn} Z = \begin{cases} 1 & \text{при } Z \geq 0; \\ 0 & \text{при } Z < 0. \end{cases}$

При отсутствии манёвра распределение Z_i является симметричным относительно нулевого уровня, а при его наличии – смещается в ту или иную сторону, в зависимости от вида манёвра.

При этом статистика (5) подчиняется биномиальному распределению. В соответствии с требуемым уровнем ложных тревог выбирается величина порога C . При выполнении условия $S_k \geq 0$ (для положительных невязок) или $S_k \leq N - C$ (для отрицательных невязок) принимается решение о наличии манёвра.

Величина порога C выбирается исходя из заданной вероятности ложного обнаружения F , в соответствии с числом отрицательных исходов в схеме испытаний Бернулли:

$$F = (1/2)^N \sum_{i=C+1}^N \binom{N}{i}. \quad (7)$$

Недостатком знаковых тестов является то, что не учитывается степень отклонения элементов анализируемой выборки относительно ожидаемого уровня или от уровня элементов опорной выборки, т.е. не используется информация, заложенная в амплитудных соотношениях. Это снижает эффективность знаковых тестов.

Более мощными (эффективными) являются ранговые тесты.

Процедуру вычисления рангов N элементов выборки можно представить в виде:

$$R_i = \sum_{k=1}^N \operatorname{sgn}(Z_i - Z_k). \quad (8)$$

При отсутствии манёвра совместное распределение рангов выборки невязок является равномерным:

$$P(R_1, R_2, \dots, R_N) = \frac{1}{N!}, \quad (9)$$

где $N!$ – число перестановок N элементов выборки.

При возникновении манёвра цели симметрия распределения невязок нарушается в соответствии с выражениями (2) или (3).

Для обнаружения манёвра могут использоваться различные ранговые тесты, в частности, тест Вилкоксона, основанный на статистике, определяемой суммой рангов:

$$S = \sum_{i=1}^N R_i \operatorname{sgn}(Z_i). \quad (10)$$

При выполнении одного из условий $\sum_{i=1}^N R_i - C \geq S$ для отрицательных невязок, или $S \geq C$

для положительных невязок, принимается решение о наличии и виде манёвра цели (C – составляющая порогового уровня). В случае, если значения невязки при манёвре распределены по нормальному закону с некоторым средним $M[Z]$, несколько большую эффективность даёт тест Ван-дер-Вардена:

$$S = \sum_{i=1}^N \Phi^{-1} \frac{R_i \operatorname{sgn}(Z_i)}{N+1},$$

где $\Phi^{-1}(\cdot)$ – функция, обратная нормальному распределению.

Данные тесты ещё называют знаково-ранговыми, так как они учитывают и знаки, и общий уровень амплитуды элементов выборки. В то же время знаково-ранговые тесты не дают возможности использовать информацию, заложенную в законе изменения амплитуды анализируемого параметра (невязки) при наличии манёвра (2), (3).

Поэтому более эффективными являются корреляционные непараметрические тесты, которые учитывают корреляцию между номером i наблюдения Z_i в выборке и его рангом R_i .

В частности, может быть использован тест ранговой корреляции Спирмана:

$$S = \sum_{i=1}^N i \cdot (R_i + 1).$$

Значения S здесь могут изменяться в пределах от $S_{\min} = \sum_{i=1}^N i \cdot (N - i + 1)$ до $S_{\max} = \sum_{i=1}^N i^2$, для монотонно убывающей и монотонно возрастающей последовательности невязок (в первом случае значения отрицательные с возрастающей амплитудой).

При выполнении одного из условий (12) принимается решение о наличии манёвра:

$$S \geq C1 \text{ или } S \leq C2, \quad (12)$$

где $C1, C2$ – значения порогов обнаружения, соответственно для монотонно возрастающей и монотонно убывающей последовательности невязок в выборке; $C1 = S_{\max} - \delta$; $C1 = S_{\min} - \delta$; δ – некоторая константа, определяемая требуемой вероятностью ложных тревог F .

При уменьшении δ уменьшается F , но и снижается вероятность правильного обнаружения D .

Аналогичным образом может быть использован тест ранговой корреляции Кендалла:

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N R_i \operatorname{sgn}(Z_i - Z_j). \quad (13)$$

Рассмотренные выше знаковые и ранговые тесты используют данные одной (текущей) выборки анализируемого параметра (невязки) в пределах скользящего окна размером N .

Более эффективными в условиях параметрической априорной неопределённости могут быть алгоритмы ранжирования с использованием опорной выборки значений невязки Z_k , где $k = 1, 2, \dots, M$.

$$R_i = \sum_{k=1}^M \operatorname{sgn}(Z_i - Z_k). \quad (14)$$

Размер опорной выборки M может быть равен или больше размера исследуемой ($M \geq N$), а по времени – должен предшествовать ей.

Данное определение ранга (14) используют в том случае, если анализируемая выборка статистически неоднородна как при наличии, так и при отсутствии манёвра.

При манёвре в данной выборке должны быть максимальные ранги по сравнению с опорной выборкой. Решающее правило может быть записано:

при $m \leq S$ (для положительных невязок) или $S \leq (M - m)$ (для отрицательных невязок) манёвр считается обнаруженным (m – составляющая порога обнаружения), где:

$$S = \sum_{i=1}^N \operatorname{sgn}(R_i - M). \quad (15)$$

В данном случае имеет место аналог критерия обнаружения m/M .

Пороговое значение числа максимальных рангов m выбирается исходя из заданного уровня ложных тревог.

При ранжировании по опорным выборкам теряется информация о соотношении значений невязок внутри анализируемой выборки. Сохранить её можно путём ранжирования составной выборки $\{Z_i; Z_k\}$:

$$R_i = \sum_{j=1}^N \operatorname{sgn}(Z_i - Z_j) + \sum_{k=1}^M \operatorname{sgn}(Z_i - Z_k). \quad (16)$$

Для использования полезной информации о характере изменения амплитудных значений невязок (2) и (3) целесообразно применение теста ранговой корреляции Спирмена:

$$S = \sum_{i=1}^N i \cdot R_i. \quad (17)$$

Решающее правило обнаружения начала и определения вида манёвра:

$$S \geq C1 \text{ или } S \leq C2. \quad (18)$$

Здесь $C1, C2$ – пороги обнаружения соответственно для выборок положительных и отрицательных невязок:

$$C1 = S_{\max} - \delta;$$

$$C1 = S_{\max} + \delta,$$

где δ – некоторая константа, определяемая требуемым уровнем ложных тревог;

$$S_{\max} = \sum_{i=1}^N i(i+M);$$

$$S_{\min} = \sum_{i=1}^N i(N-i+1).$$

Размер исследуемой выборки N определяется в основном заданными характеристиками обнаружения манёвра (F и D) и видом распределения анализируемых параметров (в данном случае текущих значений невязок) при отсутствии и наличии манёвра цели.

При увеличении N можно обеспечить более низкий уровень ложных тревог.

Например, при составляющей порога обнаружения $\delta = 1$ обеспечивается минимальное значение вероятности ложной тревоги:

$$F_{\min} = \frac{1}{N!} -$$

при ранжировании без опорной выборки (10) и

$$F_{\min} = \frac{1}{(N+M)!} -$$

при ранжировании составной выборки (17).

Кроме того, размер выборки N должен соответствовать интервалу корреляции возможного ускорения манёвра цели τ_k :

$$N = \frac{\tau_k}{T_c},$$

где T_c – период циклов сопровождения цели.

Для того, чтобы не было ложного обнаружения манёвра за счёт аномальных наблюдений (АН) (сбоев в работе аппаратуры) необходимо обеспечить $N \geq 2n_a$, где n_a – число аномальных невязок, вызываемых одним АН. Как правило, $n_a = 2 \div 3$.

Следует, однако, учитывать, что при увеличении размера выборки увеличивается и время задержки в обнаружении манёвра T_{i-m} , что ухудшает

возможность своевременной коррекции параметров фильтра и может привести к срыву с сопровождения. В зависимости от интенсивности манёвра время задержки $T_{i-m} = (0,5 \div 1)N \cdot T_c$.

При использовании для обнаружения манёвра в качестве анализируемого параметра сглаженных значений невязки \bar{Z}_i (1) размер выборки N должен соответствовать памяти фильтра сглаживания

$$\Pi = \frac{1}{A},$$

где A – коэффициент экспоненциального сглаживания.

В общем случае структура обнаружителя манёвра должна включать следующие основные блоки: формирователь выборок, блок ранжирования, вычислитель ранговой статистики и пороговый блок [7].

Оптимизация структуры обнаружителя может быть проведена по критерию Неймана-Пирсона, которая сводится к вычислению отношения правдоподобия рангов L при проверке гипотезы отсутствия манёвра против альтернативы наличия манёвра [1, 2].

Эффективность ранговых тестов будет определяться степенью различия ранговых статистик при наличии и отсутствии манёвра цели и тем, в какой степени учитывается эта информация в ходе анализа.

По результатам обнаружения манёвра и оценки его характеристик осуществляется адаптация параметров и архитектуры фильтра для предотвращения срыва цели с сопровождения и обеспечения необходимой точности оценки параметров траектории.

Непараметрическое обнаружения конца манёвра может быть проведено по аналогичной методике с использованием ранговых статистик.

Выводы

Применение непараметрических методов обнаружения манёвра цели позволяет стабилизировать уровень ложных тревог в условиях априорной неопределённости и при изменении статистических характеристик анализируемых параметров – текущих значений динамических ошибок фильтрации.

Наиболее эффективными являются тесты ранговой корреляции при ранжировании составной выборки, учитывающие как степень отличия статистических характеристик распределений при наличии и отсутствии манёвра цели, так и характер изменения (корреляции) амплитудных значений параметров.

Список литературы

1. Липий В.Ю. Устройства ранговой обработки информации / В.Ю. Липий и др. – К.: Техніка, 1986. – 120 с.
2. Обнаружение радиосигналов / Под ред. А.А. Колосова. – М.: Радио и связь, 1989. – 288 с.
3. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВІЦ, 2000. – 428 с.
4. Саврасов Ю.С. Алгоритмы и программы в радиолокации / Ю.С. Саврасов. – М.: Радио и связь, 1985. – 216 с.
5. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
6. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ. / А. Фарина, Ф. Студер. – М.: Радио и связь, 1993. – 340 с.
7. Челпанов А.В. та ін.: Адаптивний пристрій супроводу маневруючих цілей. Деклараційний патент на винахід № 56074А, вид. 15.04.03. Публ. бюл. № 4.

Поступила в редколлегию 17.02.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Карпенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НЕПАРАМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ МАНЕВРУ ЦІЛІ

В.Д. Карлов, М.М. Петрушенко, А.В. Челпанов

У статті проаналізований вплив маневру на якість супроводу цілей, проаналізовані основні методи виявлення маневру і оцінки його інтенсивності. Також розглянута можливість реалізації непараметричних методів виявлення маневру цілі з використанням рангових тестових статистик в умовах невизначеності розподілу аналізованих параметрів – значень динамічних помилок фільтрації (нев'язності); проведений аналіз ефективності застосування непараметричних методів.

Ключові слова: маневруюча ціль, непараметричні методи.

OPPORTUNITIES OF APPLICATION OF NONPARAMETRIC METHODS OF DETECTION OF MANEUVER OF THE PURPOSE

V.D. Karlov, M.M. Petrusenko, A.V. Chelpanov

In clause influence of maneuver on quality of support of the purposes is analysed, the basic methods of detection of maneuver and an estimation of its intensity are analysed. As the opportunity of realization of nonparametric methods of detection of maneuver of the purpose with use rank test statistics in conditions of uncertainty of distribution of analyzed parameters is considered – values of dynamic mistakes of a filtration (is nonviscous); the analysis of efficiency of application of nonparametric methods is lead. Keywords: the maneuvering purpose, nonparametric methods.

Keywords: the maneuvering purpose, nonparametric methods.