

Адаптивный алгоритм подстройки весовых коэффициентов фазированной антенной решетки с использованием индуктивного метода конформного прогнозирования

В. В. Макаренков, А. С. Степенко, И. В. Какаев
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
vka@mil.ru

Н. А. Куприянов
Краснодарское высшее военное авиационное училище
лётчиков имени Героя Советского Союза А. К. Серова
kvvaul@mil.ru

Аннотация. Исследуется возможность использования методов конформного прогнозирования в адаптивных алгоритмах обработки радиолокационной информации. Показано, что оценка неопределенности информации в адаптивном алгоритме подстройки весовых коэффициентов фазированной антенной решетки с использованием индуктивного метода конформного прогнозирования позволяет повысить точность определения координат объектов информационными системами в сложных условиях электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: неопределенность информации; адаптация; фазированная антенная решетка; индуктивный метод конформного прогнозирования

I. ВВЕДЕНИЕ

Функционирование современных информационных систем мониторинга воздушно-космического пространства осуществляется в сложных условиях наблюдения: увеличение числа сопровождаемых объектов, воздействие различного рода источников помех, усложнение внешней электромагнитной обстановки (ЭМО) [1, 2].

Для обеспечения функционирования рассматриваемых средств с заданным качеством необходимо внедрение перспективных методов обработки радиолокационной информации. К одним из таких подходов относится использование самообучающихся алгоритмов, позволяющих системам адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям внешней обстановки [3].

Устранение неопределенности информации, вызванной постоянно изменяющимися условиями наблюдения объектов, в адаптивных алгоритмах, как правило, основано на использовании «классических» статистических подходов (адаптивные байесовские методы, цепи Маркова и т. п.) и методов машинного обучения. «Классические» подходы предполагают априорное знание закона и характеристик распределения случайных величин (в основном нормального закона распределения). Однако, на практике, в силу большого

количества воздействующих на информационную систему взаимосвязанных случайных факторов, установить тип или найти аналитическое выражение для исследуемой плотности вероятности не удастся.

К недостаткам методов машинного обучения относят наличие высоких требований как к объему начальной обучающей выборки, так и к вычислительной мощности устройств, что в условиях ограниченного временного и энергетического ресурсов информационных систем мониторинга воздушно-космического пространства не всегда представляется возможным [4, 5].

Одним из решений, позволяющих нивелировать основные недостатки рассмотренных выше подходов, является применение методов конформного прогнозирования. Конформное прогнозирование представляет собой новый подход к оценке неопределенности информации в адаптивных алгоритмах [6, 7].

Модели и алгоритмы, построенные на основе методов конформного прогнозирования, способны решать задачи обработки радиолокационной информации с заданным качеством при любом законе распределения вероятностей и малом объеме обучающей выборки. Единственным условием, предъявляемым к выборке, является требование к перестановочности (неупорядоченности) получаемых данных. Особый интерес представляет индуктивный метод конформного прогнозирования, позволяющий решать задачи обработки радиолокационной информации с минимальными временными и вычислительными затратами [6]. В то же время, в работе [7] продемонстрирована возможность решать задачи прогнозирования временных рядов без выполнения условий к перестановочности данных, что открывает еще больший спектр задач для проведения дальнейших исследований в рамках конформного прогнозирования

В данной статье исследуется возможность использования индуктивного метода конформного прогнозирования в адаптивном алгоритме подстройки весовых коэффициентов фазированной антенной

решетки (ФАР) в сложных условиях ЭМО. Целью работы является разработка адаптивного алгоритма подстройки весовых коэффициентов ФАР информационной системы мониторинга воздушно-космического пространства с использованием индуктивного метода конформного прогнозирования.

II. АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПОДСТРОЙКИ ВЕСОВЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ФАР ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВОЗДУШНО-КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКТИВНОГО МЕТОДА КОНФОРМНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

Рассмотрим работу адаптивного алгоритма подстройки весовых коэффициентов ФАР информационной системы мониторинга воздушно-космического пространства в сложных условиях ЭМО, под которыми будем понимать условия наблюдения объектов информационной системой на фоне нескольких источников индустриальных помех и белого гауссовского шума (БГШ).

Исследуемая плоская ФАР прямоугольного вида состоит из N излучателей. На вход каждого из излучателей ФАР $i = \overline{1, N}$ поступает k отсчетов смеси $\vec{\xi}_k^H = [\xi(1), \dots, \xi(k)]$ полезного сигнала от наблюдаемых объектов $\vec{s}_k^H = [s(1), \dots, s(k)]$, источников внешних индустриальных помех $\vec{m}_k^H = [m(1), \dots, m(k)]$ и БГШ $\vec{w}_k^H = [w(1), \dots, w(k)]$, где H – операция эрмитово сопряжения.

Сигнал $y(n)$, формируемый на выходе ФАР, имеет вид [2]:

$$y(n) = \vec{h}_N^H(n) \cdot \vec{\xi}_N(n) + e(n), \quad n = \overline{1, k},$$

где $\vec{h}_N^H(n)$ – вектор весовых коэффициентов;

$$\vec{h}_N^H(n) = [h_1(n), \dots, h_N(n)];$$

$e(n)$ – значение ошибки определения вектора весовых коэффициентов на n -ом отсчете;

$$e(n) = d(n) - \vec{h}_N^H(n) \cdot \vec{\xi}_N(n);$$

$d(n)$ – ожидаемый сигнал на выходе ФАР.

Отношение сигнал-шум $q(n)$ и ошибки определения координат объектов $\sigma(n)$ определяются следующими выражениями [5]:

$$q(n) = |y(n)|^2 / (\vec{h}_N^H(n) \cdot \mathbf{Q}_N(n) \cdot \vec{h}_N(n)),$$

$$\sigma(n) = \Delta R / \sqrt{2 \cdot q(n)},$$

где $\mathbf{Q}_N(n)$ – матрица помех и шумов;

ΔR – разрешающая способность по соответствующим координатам.

Адаптация к изменяющимся условиям обстановки при таком подходе осуществляется за счет подбора весовых коэффициентов таким образом, что устранить негативное воздействие помеховых сигналов путем выставления нулей в формируемой диаграмме направленности в направлении на источники помех.

В этом случае оптимальное значение вектора весовых коэффициентов по критерию минимума среднего квадрата ошибки с использованием метода стохастической аппроксимации имеет вид [1, 2]:

$$\vec{h}_N^H(n) = \vec{h}_N^H(n-1) + \mu(n) \times (\vec{h}_N^H(n-1) - \vec{\xi}_N^H(n) \cdot \mathbf{Q}_N^{-1}(n) \cdot d(n)), \quad (1)$$

где $\mathbf{Q}_N^{-1}(n)$ – обратная матрица $\mathbf{Q}_N(n)$; $\mu(n)$ – коэффициенты стохастической аппроксимации, удовлетворяющие заданным условиям [2].

Для определения оптимальных значений коэффициентов в рассматриваемом алгоритме, т.е. значений, при которых обеспечивается максимальное отношение сигнал-шум и высокая точность определения координат объектов, необходимо иметь полную информацию о типе и характеристиках закона распределения измеряемых данных (в данном случае рассматривается нормальный закон распределения в силу допущения о взаимонезависимых случайных измерениях). Однако, при сопровождении объектов информационной системой в условиях случайного и неравномерного характера излучения индустриальных помех, тип плотности вероятности получаемой выборки будет отличаться от нормальной.

Методы машинного обучения позволяют решать задачи обработки радиолокационной информации без предъявления требований к знанию закона распределения данных, но в свою очередь требуют больших объемов обучающих данных и значительных вычислительных затрат в условиях малого временного и энергетического ресурсов рассматриваемых информационных систем.

В этом случае для оценки неопределенности измеряемых данных, обусловленной отклонением типа или характеристик закона распределения от заданных в информационной системе, целесообразно использовать метод индуктивного конформного прогноза для решения задач регрессии [6, 7].

Концепция индуктивного конформного прогноза состоит в выполнении следующих этапов:

- разбиение измеренных ранее информационной системой данных на обучающую $b = \overline{1, B}$ и калибровочную выборки $t = \overline{1, T}$;
- обучение информационной системы на основе измерений обучающей выборки;
- выбор меры конформности для калибровочной выборки с расчетом оценок конформности $a_t = 1, a_T$;
- расчет для нового отсчета $n = \overline{1, k}$ оценки конформности a_n ;
- расчет p -значений для калибровочной выборки $1, T$ и выбранного нового отсчета $n = \overline{1, k}$.

В качестве меры конформности предлагается использовать критерий минимума среднего квадрата ошибки.

Расчет p -значений выполним в соответствии со следующим выражением [6]:

$$p(n) = (|z_t, a_t \geq a_n| + 1) / (k + 1), \quad (2)$$

где $|z_t, a_t \geq a_n|$ – функция, определяющая количество отсчетов в калибровочной выборке, для которых оценка конформности равна или превышает оценку конформности для нового отсчета.

Вычисление p -значений дает количественную оценку того, насколько новое измерение соответствует (конформно) измерениям в калибровочной выборке. Далее описанная выше процедура конформного прогнозирования повторяется для каждого нового измерения с получением множества p -значений.

Выигрыш в снижении требований к объему выборки и вычислительным затратам по сравнению с методами машинного обучения объясняется однократным обучением информационной системы с рекуррентным вычислением прогнозов (p -значений) на основе калиброванных данных.

С учетом (2) выражение (1) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{h}}_N^{\mathbf{H}}(n) &= \bar{\mathbf{h}}_N^{\mathbf{H}}(n-1) + p(n-1) \cdot \mu(n) \times \\ &\times \left(\bar{\mathbf{h}}_N^{\mathbf{H}}(n-1) - \bar{\xi}_N^{\mathbf{H}}(n) \cdot \mathbf{Q}_N^{-1}(n) \cdot d(n) \right) / p(n). \end{aligned} \quad (3)$$

Решение задачи адаптивной подстройки весовых коэффициентов в выражении (3) с использованием индуктивного метода конформного прогнозирования позволяет производить и учитывать оценку неопределенности измеряемых данных, обусловленную отклонением типа или характеристик закона распределения от заданных в алгоритме.

На рис. 1 и 2 показаны результаты расчетов ошибок определения координат объектов (дальности) без и с использованием индуктивного метода конформного прогнозирования в адаптивном алгоритме подстройки весовых коэффициентов.

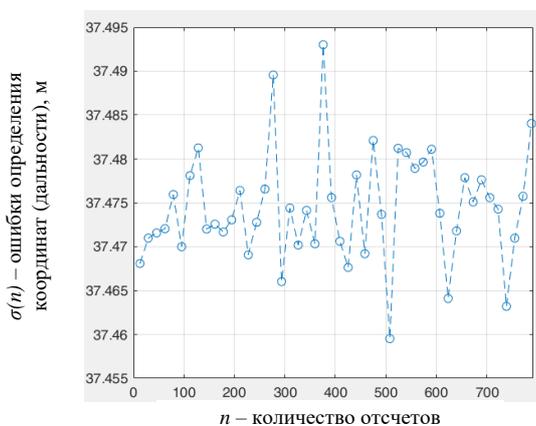


Рис. 1. Значения ошибок определения координат сопровождаемого объекта (дальности) без использования индуктивного метода конформного прогнозирования в адаптивном алгоритме подстройки весовых коэффициентов

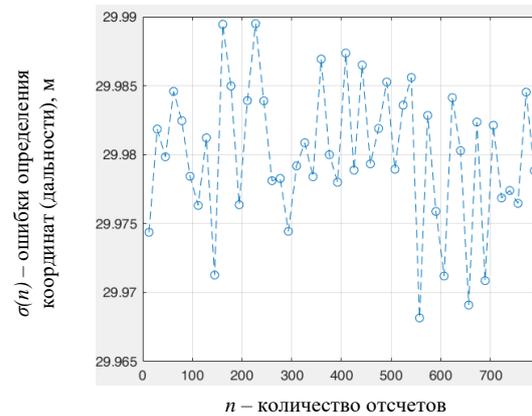


Рис. 2. Значения ошибок определения координат сопровождаемого объекта (дальности) с использованием индуктивного метода конформного прогнозирования в адаптивном алгоритме подстройки весовых коэффициентов

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи адаптивной подстройки весовых коэффициентов в предлагаемом адаптивном алгоритме с использованием индуктивного метода конформного прогнозирования позволяет производить и учитывать оценку неопределенности измеряемых данных, обусловленную отклонением типа или характеристик закона распределения от заданных в информационной системе.

Как показали результаты моделирования адаптивного алгоритма подстройки весовых коэффициентов, в сложных условиях ЭМО использование индуктивного метода конформного прогнозирования позволяет повысить точность определения координат сопровождаемых объектов примерно на 20%. Также наблюдается выигрыш в снижении требований к объему выборки и вычислительным затратам по сравнению с методами машинного обучения, который объясняется однократным обучением информационной системы с рекуррентным вычислением прогнозов (p -значений) на основе калиброванных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Особенности создания и применения алгоритмов многомерной адаптивной фильтрации во временной и частотной областях. Часть 2. Интерполяция / Е.Л. Буторин, А.Д. Винокуров, Н.А. Куприянов, Г.Н. Ульянов, А.А. Шаталов, В.А. Шаталова, К.И. Чеботарь // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2024. Т. 25, № 3. С. 20-33.
- [2] Адаптивный алгоритм формирования ДН ФАР с использованием дискретного разложения Карунена-Лозва / В. В. Макаренков, Н. А. Куприянов, В. Д. Лиференко, И.С. Луцко, С.В. Васильев // Электромагнитные волны и электронные системы. 2023. Т. 28, № 4. С. 48-56.
- [3] Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. Москва: Техносфера, 2013. 528 с.
- [4] Балухто А.Н. Искусственный интеллект в космической технике. Состояние. Перспективы применения. Монография. Москва: Радиотехника. 2021. 440 с.
- [5] Методика формирования ДН и расчета отношения сигнал-шум на выходе синтезированной АР ультразвукового локационного стелса в условиях помехового воздействия / В.В. Макаренков, А.В. Мороз, И.В. Сахно, А.А. Семенов, А.Н. Дворов // Вестник метролога. 2021. № 3. С. 28-33.
- [6] Манохин В. Конформное прогнозирование в Python / пер. с англ. А. В. Груздева. Москва: ДМК Пресс, 2024. 306 с.
- [7] Conformal prediction for multi-dimensional time series by ellipsoidal sets / C. Xu, H. Jiang, Y. Xie // Published in International Conference on Machine Learning. 2024. 38 с.