

Сопровождение мобильных источников радиоизлучения мобильными станциями радиомониторинга методами машинного обучения

А. С. Ельцов

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
aseltsov@stud.etu.ru

А. Д. Болдырева

Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)
adboldyeva@stud.etu.ru

Аннотация. В системах пассивного радиоконтроля, предназначенного для определения местоположения и сопровождения мобильных источников радиоизлучения требуется специальное программное обеспечение, обеспечивающее их обнаружение. Программное обеспечение должно быть унифицированным, простым при использовании и способным динамически адаптироваться к изменяющейся обстановке и к появлению новых источников сигналов. В работе рассмотрены признаки, пригодные для обучения модели методом К-средних, и проведено моделирование обработки данных с помощью обученной модели.

Ключевые слова: машинное обучение; кластеризация данных; метод К-средних; сопровождение БПЛА

I. ВВЕДЕНИЕ

Сопровождение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является актуальной задачей последнего десятилетия. Производители коммерческих моделей внедряют технологии, позволяющие по каналу связи узнавать полную информацию о БПЛА, его серийный номер и точные координаты, то любительские БПЛА в большинстве случаев не имеют подобного функционала. Поэтому отслеживание должно отталкиваться от доступных признаков, которые возможно получить при наблюдении за БПЛА. К таковым можно отнести спектральные характеристики каналов связи БПЛА, траектория полёта и связь этих параметров во времени. В этой работе предлагается рассмотреть выбор и обработку параметров полёта с помощью методов машинного обучения для снижения вероятности срыва сопровождения за БПЛА.

II. ДАННЫЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ

Основной особенностью БПЛА при обработке данных является частая изменчивость характеристик сигнала, невозможность предугадывания траектории полета и отсутствие единого стандарта канала связи.

Модели от крупнейшего производителя коммерческих БПЛА компании DJI (на момент 2021 г. занимает 70% рынка) имеют возможность автоматической подстройки несущей частоты видеоканала и канала управления в диапазонах 2400-2483,5 МГц и 5725-5850 МГц (рис. 1). Несущая частота может выбираться вручную оператором или автоматически по принципу наименее зашумленного

канала. Кроме несущей частоты задается ширина канала от 10 до 40 МГц. Конкуренты DJI предлагают варианты, в которых добавлен диапазон частот 900 МГц и 5,2 ГГц. Канал управления дополнительно передается с помощью псевдослучайно перестройки рабочей частоты. По структуре же канал связи использует OFDM модуляцию. Упоминаемые ранее данные о местоположении дрона и его серийном номере, которые периодически передаются в канале связи коммерческих дронов возможно удалить, что также затруднит отслеживание БПЛА.



Рис. 1. Выбор канала связи на БПЛА DJI Mavic 3T

Протоколы связи, используемые для любительских моделей БПЛА, имеют открытый исходный код, а в дешевом оборудовании, доступном к быстрой модернизации, нельзя четко зафиксировать диапазоны работы каналов связи, так как доступные решения появляются раз в несколько месяцев.

Существуют каналы управления, позволяющие передавать команды на частотах от 150 МГц до 7 ГГц. Видеоканалы на начало 2025 года зафиксированы от 1,2 ГГц до 6 ГГц. В большинстве случаев видеоканал на любительских БПЛА представляет из себя аналоговое ТВ, для канала управления используются модернизации технологии сети передачи данных LoRa, в основе которой лежит линейно-частотная модуляция. Важной особенностью каналов связи БПЛА является их невозможность нахождения на одной несущей частоте. Это позволяет гарантировать, что при обнаружении на спектре N беспилотных летательных аппаратов, именно такое их количество и присутствует в радиусе действия станции радиомониторинга.

В связи с возможностью неконтролируемой смены несущей частоты, возможны случаи, когда со временем два одновременно работающих БПЛА могут перестроиться на частоты друг друга. В таком случае требуются дополнительные параметры для сопровождения БПЛА. Таковыми могут стать отметки о их местоположении, получаемые со станций

радиомониторинга. Сопровождение БПЛА только по координатам не представляется возможным из-за высокой скорости и маневренности аппаратов и их малых габаритов. Несколько БПЛА могут лететь в непосредственной близости друг от друга с постоянным пересечением траекторий, и только координатное отслеживание приведет к ошибкам сопровождения.

Решением данной проблемы является совместная обработка траектории полёта, и спектральных характеристик канала управления, связанных между собой во времени. Данное решение позволит продолжить привязку канала связи даже после изменения его характеристик по точкам координат БПЛА, а при близком полёте БПЛА привязывать уже координаты по параметрам канала связи.

Для совместной обработки выбраны следующие параметры, возможные для фиксации в режиме реального времени: несущая частота, полоса сигнала, координаты положения БПЛА (широта, долгота, высота над уровнем моря), время фиксации. На их основе сгенерирована csv-таблица, в которой представлен пример результата работы станции отслеживания БПЛА. Данные сгенерированы таким образом, чтобы модели машинного обучения требовалось сопроводить три БПЛА при условии, что два из них пересекают свои траектории полёта, а один находится примерно в одном и том же положении. БПЛА могут свободно менять каналы связи. Результатом имитации является массив данных из 24 строк, в котором находящийся на одном месте БПЛА засекался 5 раз,двигающийся с севера на юг засекался 10 раз, адвигающийся с запада на восток засекался 9 раз. В качестве примера первые пять строк представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1.

Время	Широта	Долгота	Высота, м	Несущая частота, МГц	Полоса частот, МГц
122350	30.358790	59.994125	50	2400	40
122350	30.351931	59.997966	30	2480	40
122350	30.350898	59.991655	30	2450	40
122351	30.356999	59.994436	50	2400	40
122351	30.351633	59.997264	32	2479	40

III. МОДЕЛЬ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Разделение нескольких целей по признакам, несмежных по природе происхождения и различных по численным значениям, на основе совместной обработки, возможно благодаря моделям машинного обучения, а конкретнее методам кластеризации.

Кластерный метод ищет не целевой признак одного объекта, а любые закономерности на уровне признаков объектов, что позволяет в данной задаче связывать точки обнаружения БПЛА между собой. Существует огромное множество моделей кластеризации, однако традиционно одной из самых часто применяемых моделей является метод К-средних.

Метод К-средних – это один из самых широко используемых методов кластеризации данных. Он легок в понимании [1], традиционно показывает самое быстрое разбиение данных на кластеры. Алгоритм представляет собой версию EM-алгоритма, применяемого также для разделения смеси гауссиан, и разбивает множество

элементов векторного пространства на заранее известное число кластеров k .

Основная идея заключается в том, что на каждой итерации перевычисляется центр масс для каждого кластера, полученного на предыдущем шаге, затем векторы разбиваются на кластеры вновь в соответствии с тем, какой из новых центров оказался ближе по выбранной метрике. Для вычисления расстояния существует множество метрик между объектами, однако наиболее распространённым является вычисление Евклидова расстояния, в котором определяется длина отрезка между двумя объектами a и b в пространстве с n признаками (из табл. 1 видно, что в данном исследовании 6 признаков) по формуле

$$d(a, b) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=6} (a_i - b_i)^2} \quad (1)$$

Алгоритм завершается, когда на какой-то итерации не происходит изменения внутрикастерного расстояния. Это происходит за конечное число итераций, так как количество возможных разбиений конечного множества конечно, а на каждом шаге суммарное квадратичное отклонение уменьшается, поэтому заикливание невозможно.

Кроме метода кластеризации в работе использовалось масштабирование признаков. Это необходимо в виду серьёзных различий в значениях признаков между собой (например, время, записанное в виде натурального шестизначного числа и широта). Количественная разница признаком может привести к искажённому влиянию признаков на вычисление Евклидова расстояния. Для масштабирования признаков часто используется способ стандартизации, когда приводятся к их общим средним значениям и стандартному отклонению [2]. Преобразование признаков происходит по формуле

$$x_{standart} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma_x} \quad (2),$$

где x_i — значение признака, \bar{x} — среднее значение признака, σ_x — стандартное отклонение значения x .

Для реализации данной модели кластеризации отлично подходит язык программирования Python, имеющий набор мощных вычислительных библиотек NumPy и scikit-learn, позволяющих работать с многомерными массивами и имеющих обширный инструментарий для работы с различными методами кластеризации, а также библиотеку Matplotlib для визуализации данных двумерной и трёхмерной графикой [3].

Особенностью метода К-средних является необходимость задания числа кластеров и первоначальное расположение центров масс, которые в дальнейшем будут менять своё положение. Так как сгенерированные данные представляют пример записи трёх БПЛА, то такое же количество кластеров задаётся алгоритму для вычисления. В качестве начального положения центров масс традиционно принимаются случайные значения. В дальнейшем алгоритм будет их корректировать. Для восприятия и первоначальной цели

слежения за объектами в пространстве визуализация работы алгоритма происходит в двумерном формате по координатам широты и долготы. После расположения смоделированных точек обнаружения объектов (зеленые точки) и случайных точек масс кластеров (красные звезды) координатная ось с отметками выглядит как на рис. 2.

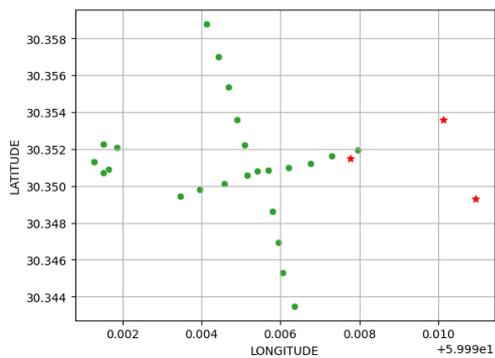


Рис. 2. Фиксация объектов и центры масс кластеров

Далее происходит вычисление Евклидова расстояния между всеми точками данных и центрами кластеров. Каждая точка определяется к своему центру и происходит коррекция положения центров. Этот цикл повторяется до тех пор, пока центры не перестанут двигаться между собой. Результат финального положения центров кластеров и определения точек к каждому из кластеров представлен на рис. 3.

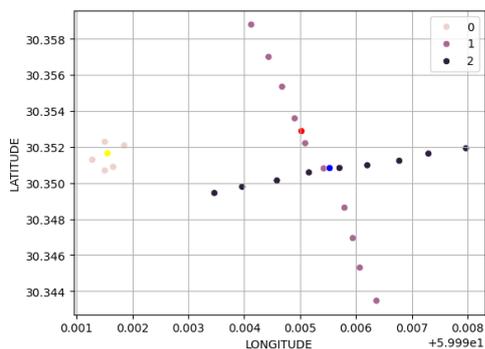


Рис. 3. Результат работы метода К-средних

Благодаря стандартной библиотеке `datetime` оценено время выполнения алгоритма с учетом расчёта кластеров их визуализации без затрат на загрузку исходных данных и вывода результатов. В ходе работы метод К-средних показал среднюю скорость работы 0,005 секунд для массива из 24 строк. Соотношение точек к каждому кластеру совпало с заданными траекториями предполагаемого полёта БПЛА при генерации данных.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполнения алгоритма показали, что совместная обработка спектральных характеристик сигналов связи БПЛА и их координат позволяют точно кластеризовать точки обнаружения и привязывать к конкретному БПЛА даже с учётом пересечения траекторий полёта и переходов каналов связи на другие несущие частоты. Полученные результаты позволяют разработать алгоритмы отслеживания одиночных маневренных БПЛА, и отслеживания траекторий нескольких БПЛА в случае множественных одновременных обнаружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Rokach L., Maimon O. The Data Mining and Knowledge Discovery Handbook 2005. 333-334 с.
- [2] Han J., Kamber M., Pei J. Data Mining Concepts and Techniques 3-e изд. Morgan Kaufmann. 2012. 114 с.
- [3] <https://www.mygreatlearning.com/blog/open-source-python-libraries/>