

УДК 621.396

ОБНАРУЖЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ ВЕРТОЛЕТОВ И САМОЛЕТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ АДАПТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ЛУЧА И ОТСЛЕЖИВАНИЯ

Уткин Андрей Сергеевич

Тверской государственный технический
университет, кафедра информационных систем
студент 2-го курса магистратуры,
г. Тверь, Россия
andrrew88@gmail.com

Аннотация

Выполняются измерения различных типов самолетов, которые используются для получения информации о характеристиках целей и разработки алгоритма для выполнения классификации между реактивными самолетами, винтовыми самолетами и вертолетами. Чтобы увеличить дальность обнаружения, уменьшить фоновый шум и уменьшить ошибки классификации в среде с несколькими целями, алгоритм адаптивного формирователя луча в реальном времени разработан для массива из трех микрофонов. Выход формирователя луча передается алгоритму отслеживания. Акустические сигналы от идентифицированных треков подаются на алгоритмы классификации. Алгоритм тестируется на данных, записанных во время различных полевых испытаний. Целью исследования, которое является частью исследовательской программы голландской армии, является обнаружение прохождения самолета с помощью одного или нескольких датчиков механических волн, акустических или сейсмических. После обнаружения цели запрашивается классификация типа летательного аппарата (например: вертолет-реактивный-винтовой-ДПВ). Если возможно, также запрашивается идентификация типа. Результатом проектов стал алгоритм, который может обнаруживать и классифицировать вертолеты, но он был разработан для отклонения других целей. Выбранный подход заключается в объединении новых алгоритмов обнаружения воздушных судов и формирования луча с существующими алгоритмами.

Ключевые слова: акустика, обнаружение, классификация, вертолет, самолет, адаптивное формирование луча, сопровождение.

DETECTION AND CLASSIFICATION OF HELICOPTERS AND AIRCRAFT USING ADAPTIVE BEAMFORMING AND TRACKING TECHNIQUES

Andrew S. Utkin

Tver' State Technical University, Department of Information Systems, second-year master's student,
Tver', Russia
andrrew88@gmail.com

ABSTRACT

Measurements of different types of aircraft are performed and used to obtain information on target characteristics and develop an algorithm to perform classification between jet aircraft, propeller aircraft and helicopters. To obtain a larger detection range, reduce background noise and to reduce classification errors in a multi-target environment, a real time adaptive beamformer algorithm is developed for a three-microphone array. The output of the beamformer is submitted to a tracking algorithm. Acoustic signals from identified tracks are submitted to the classification algorithms. The algorithm is tested on data recorded during various field trials. The objective of the research, which is part of a research program for the Dutch Army, is to detect the passage of an aircraft with one or more mechanical wave sensors, either acoustic or seismic. After detection of a target, classification of the type of aircraft is requested (for example: helicopter-jet-propeller-*rpv*). If possible, type identification is also requested. The projects resulted in an algorithm that can detect and classify helicopters, but it was developed to reject other targets. The chosen approach is to combine new aircraft detection and beamforming algorithms with the existing algorithms.

Keywords: acoustic, detection, classification, helicopter, aircraft, adaptive beamforming, tracking.

ВВЕДЕНИЕ

Военный интерес к акустико-сейсмическому обнаружению самолетов основан на потребности военных в получении информации об обстановке на поле боя. Традиционно информация о движении самолетов собирается с помощью (радарных) или электрооптических датчиков. Однако есть вероятность, что такие активы недоступны или не работают должным образом из-за отсутствия покрытия или условий прямой видимости. Альтернативным методом обнаружения целей, менее ограниченным требованиями прямой видимости, является использование необслуживаемых наземных датчиков (UGS), например, с использованием сейсмических или акустических преобразователей. Более подробная информация о военной перспективе использования UGS приведена в [1]. Алгоритм, разработанный в TNO-FEL, может использоваться для обнаружения и классификации вертолетных целей, используя в качестве входных данных акустический сигнал с микрофона или сейсмоприемника. Лабораторная версия демонстратора обнаружения вертолета, реализованная в Matlab, была разработана на базе ПК [2,3]. Работа по обнаружению и классификации самолетов подробно описана в [4,5]. Исследование возможностей идентификации модели самолета показывает менее обнадеживающие результаты, широкополосные сигнатуры реактивных самолетов показывают сравнимую разницу между проходами самолетов одной модели, как и между проходами разных самолетов. Представляется, что параметры мощности двигателя и профиль полета являются важными факторами, определяющими спектральные свойства сигнатур пролетов самолетов. В данной статье описывается реализация и применение формирователя луча с задержкой и суммой (DS) и адаптивного формирователя луча без искажений с минимальной дисперсией (MVDR) к данным, записанным с использованием треугольной микрофонной решетки. Показано сравнение результатов обоих методов формирования луча. Адаптивный формирователь луча сочетается с алгоритмом удаления помех и отслеживания, разработанным для подводных применений. Идентифицированные треки могут быть представлены существующему алгоритму обнаружения и классификации

вертолетов. Результаты, полученные с использованием этой комбинации, сравниваются с результатами, полученными при использовании одного датчика с использованием реальных данных.

ОПИСАНИЕ ФОРМУЛЯТОРА ЛУЧА

Методы формирования луча для определения местоположения цели описаны в различных документах, например, в материалах конференции Spie Aerosense, посвященной UGS [6]. Для оценки пеленга цели используются массивы из 8 датчиков по схеме «вагон-колесо» [7], аналогичная схема с использованием 7 датчиков [8] и кольцевых массивов с использованием 8 микрофонов [9]. Методы формирования луча также широко используются в подводных приложениях для определения пеленга цели, уменьшения влияния фонового шума и увеличения дальности обнаружения. Традиционные методы, применяемые к буксируемым антенным решеткам, основаны на обычных методах формирования луча с задержкой и суммированием. Усовершенствования для обеспечения распознавания целей по левому и правому борту привели к использованию двойных решеток, а затем и тройных решеток. Тройная решетка представляет собой решетку гидрофонов, расположенных треугольником в одной трубке решетки. На выходе массива формируется луч, после чего результат формирования луча обрабатывается как треугольник направленных гидрофонов и передается в тройной формирователь луча. В [10] описаны и применены к измеренным данным различные методы формирования диаграммы направленности для тройных решеток гидрофонов. Применяется метод формирования луча триплетного массива к треугольной микрофонной решетке (расстояние 1,5 м), используемой TNO-FEL для измерения акустических целей [11].

Формирователь луча задержки и суммы

Традиционный формирователь луча с задержкой и суммой (DS) (рис. 1) формулируется следующим образом. Сначала данные преобразуются в частотную область (посредством БПФ): $x_k(t) \Rightarrow X_k(f)$, где $k = 1, 2, 3$ нумерует микрофоны, $x_k(t)$ – частотная область k -го микрофона, $X_k(f)$ – преобразованная частотная область k -го микрофона. В частотной области временная задержка соответствует фазовому сдвигу, и 3 микрофонных выхода могут суммироваться с компенсирующим фазовым сдвигом

$$p(\theta) = \sum_k X_k(f) \exp(-2\pi i f \tau_k) \quad (1) \quad \text{где } f - \text{ частота}$$

сигнала, времена задержки τ_k зависят от направления прибытия (пеленга), обозначаемого θ как:

$$\tau_1 = -\left(\frac{d}{c}\right) (1/3\sqrt{3} \cos\theta) \quad (2.1)$$

$$\tau_2 = +\left(\frac{d}{c}\right) (1/6\sqrt{3} \cos\theta + 1/2 \sin\theta) \quad (2.2)$$

$$\tau_3 = +\left(\frac{d}{c}\right) (1/6\sqrt{3} \cos\theta - 1/2 \sin\theta) \quad (2.3)$$

Решетка микрофона представляет собой равносторонний треугольник со сторонами d , c – скорость звука. Для всех пеленгов три выхода объединяются по-разному, но только для истинного целевого пеленга три выхода суммируются когерентно (по фазе). Только для этого пеленга выход формирователя луча будет в 3 раза выше, чем выход одного микрофона, в результате чего максимальное усиление обработки составит 5 дБ. Более важным, чем это дополнительное усиление, может быть способность формирователя луча оценивать пеленг цели. Несмотря на то, что всего с тремя микрофонами в решетке ширина луча довольно велика, пеленг можно достаточно точно оценить в случае высокого отношения сигнал/шум

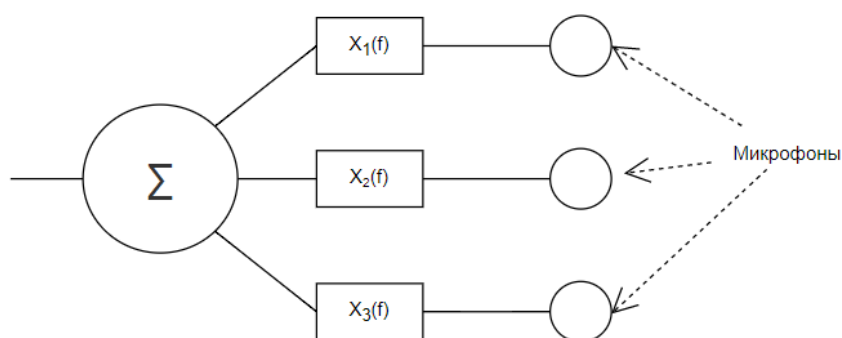


Рисунок 1. Схематичный рисунок формирователя луча задержки и суммы с 3-мя микрофонами

Формирователь луча MVDR

В формирователе луча с откликом без искажений с минимальной дисперсией (MVDR) максимизируется SNR (отношение сигнал/шум) на выходе луча посредством минимизации общей выходной мощности при сохранении постоянного усиления в заданном направлении луча. Цель состоит в том, чтобы подавить направленный шум от источников за пределами указанного луча путем адаптивного изменения формирователя луча массива, чтобы боковые лепестки этих источников были снижены под фоновым шумом. Дополнительным преимуществом этого процесса является уменьшение ширины луча. В математическом описании мы будем использовать матричную запись для сокращения написания. Невзвешенный (обычный) формирователь луча DS (см. уравнение (1)) приведенный к виду MVDR примет следующий вид:

$$p = d^* \cdot X \quad (3)$$

$p^2 = |d^* \cdot X|^2 = (d^* \cdot X)(X \cdot d^*)^*$ (4) где p – выходная мощность, d^* – вектор управления, а X – комплексный вектор микрофона для одного частотного элемента, оба имеют длину $K=3$.

В адаптивном (MVDR) формирователе луча вектор управления заменяется оптимальным вектором управления [12]:

$p = w^* \cdot X$ (5) где вектор оптимального управления связан с ковариационной (корреляционной) матрицей $R = XX^*$ выражением

$$w^* = d R^{-1} / (d^* R^{-1} d) \quad (6)$$

В случае некоррелированного шума корреляционная матрица имеет вклад только от автокорреляции по диагонали, т.е. $R=I$, где I – единичная матрица. В этом случае адаптивный формирователь луча эквивалентен обычному формирователю луча. Для данных с направленным шумом матрица отклоняется от единицы, и адаптивный формирователь луча становится эффективным. Выходная мощность формирователя луча MVDR теперь становится:

$$p^2 = w^* R w^* = d^* / (d^* R^{-1} d) R d / (d^* R^{-1} d) = d^* R d / (d^* R^{-1} d)^2 = (d^* R^{-1} d)^{-1} \quad (7)$$

R и d сокращаются, поэтому остаётся относительно простое выражение, в котором обратная ковариационная матрица R^{-1} играет центральную роль. Она находится между двумя обычными векторами. Несмотря на простоту алгоритма MVDR, существуют некоторые проблемы с реализацией этого формирователя луча. Вот эти проблемы:

Как вычислить R ?

Можем ли мы инвертировать R ?

Матрица R зависит от времени и частоты. Трудно определить правильное время интегрирования и пропускную способность для надежного вычисления R без искажения важной информации. Время интегрирования должно быть коротким, чтобы справиться с быстро меняющимися источниками шума, но достаточно большим, чтобы получить статистически стабильную информацию. Настройка сложная (зависит от сенсора, окружения, собственных шумов и т.д.).

Инверсия R иногда бывает громоздкой. Поскольку R оценивается на основе измерений с соответствующими ошибками измерения, некоторые матричные элементы могут быть оценены неправильно. Особенно в интересующих случаях (с высокими недиагональными элементами) матрица может стать почти сингулярной. Число обусловленности (наименьшее собственное значение по сравнению с наибольшим собственным значением) становится близким к машинной точности, а инверсия становится нестабильной. Хитрость, позволяющая решить эту проблему, — диагональная загрузка. При добавлении к автокорреляции малых значений обратимость восстанавливается. Конечно, это нефизическое дополнение снижает производительность. Фактически формирователь луча MVDR смешивается с формирователем луча DS, и если требуется большая нагрузка, производительность будет не лучше, чем у формирователя луча DS. Чтобы найти стабильную, но низкую загрузку, снова требуется много настроек.

РЕЗУЛЬТАТЫ КЛАССИФИКАЦИИ ПОСЛЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Чтобы сравнить результаты алгоритма классификации вертолета как для данных с формированием луча, так и для данных с одним датчиком, представляем частотно-временное распределение как для данных с одним датчиком, так и для данных с формированием луча, а также результаты классификации, полученные с использованием данных в качестве входных данных для алгоритма классификации. Для данных одного датчика это просто, предварительно обработанные данные датчика могут быть немедленно отправлены в алгоритм. Чтобы иметь возможность показать результаты классификации после формирования луча, мы должны сначала определить целевую дорожку. После идентификации трека мы вычисляем один луч до цели для всего интересующего диапазона частот. Отслеживаемый луч подвергается алгоритму классификации. В нашей текущей реализации целевой трек должен быть сначала идентифицирован вручную, после чего алгоритм выполняет автоматическое отслеживание трека. Показанный здесь пример представляет собой сближение вертолета Lynx с расстояния примерно 8 км, зафиксированное во время измерений в Дре, Франция, 1988 г. [11]. Тщательный анализ графика времени и частоты данных одного датчика (рис. 2 слева) показывает, что этот набор данных чрезвычайно сложен. Он содержит коммутацию усилителя, необходимую, поскольку данные записывались с помощью магнитофона с динамическим диапазоном, не превышающим 50 дБ, а также данные, близкие к шумовому порогу используемого АЦП.

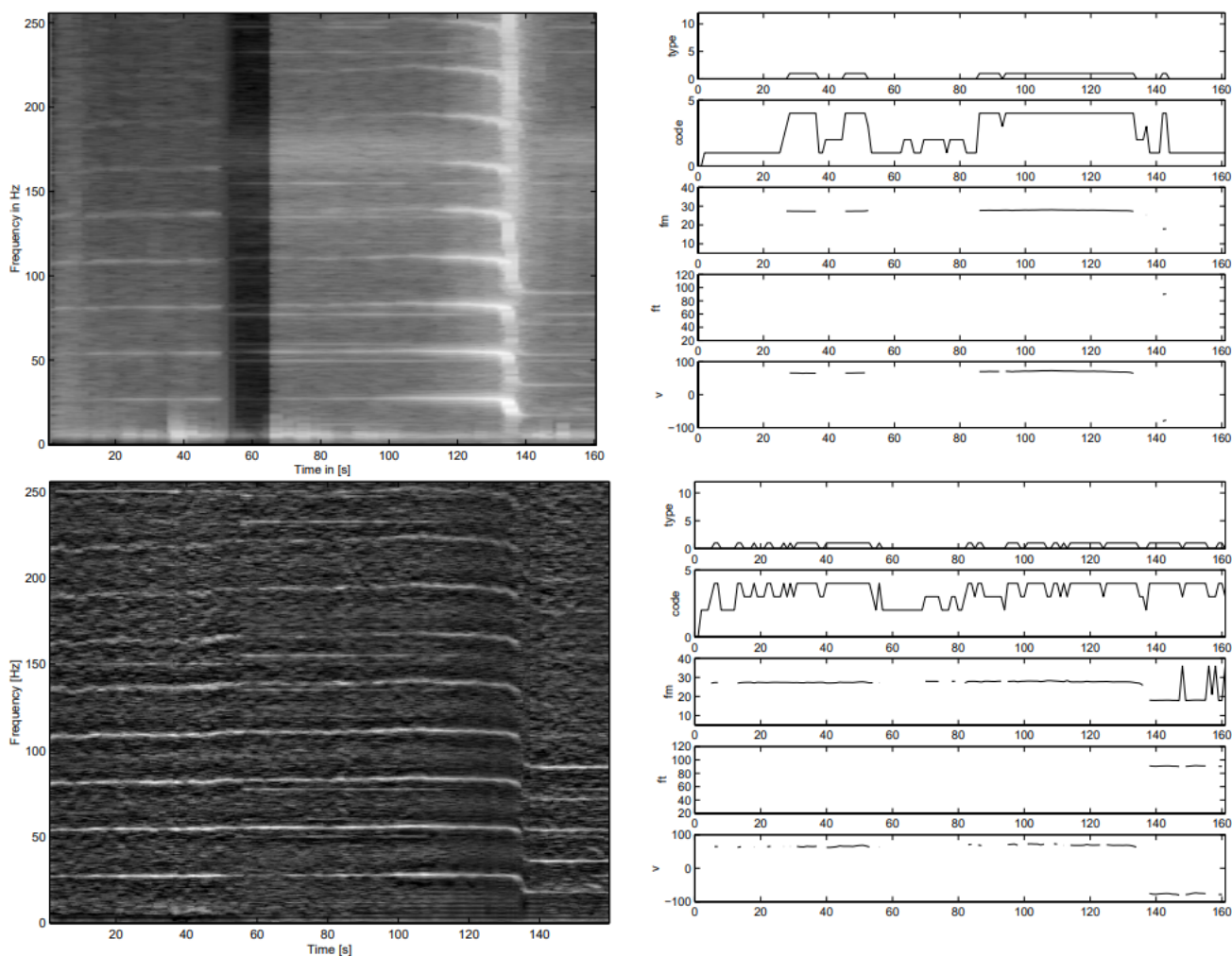


Рисунок 2. Результаты алгоритма классификации вертолета для одного датчика (верхние графики) и после формирования луча и отслеживания (нижние графики). Один вертолет приближается к массиву с расстояния примерно 8 км. На левом графике показано частотно-временное распределение, на правом графике показано вывод, полученный с помощью алгоритма классификации (сверху вниз: тип вертолета, классификационный код, частота несущего винта, частота хвостового винта и скорость относительно датчика).

Сравнение графиков с результатами классификации показывает, что классификатор, подключенный к формирователю луча MVDR, может обнаружить вертолет через 4 с после начала записи, тогда как классификатор с одним датчиком обнаруживает вертолет через 27 с. При скорости захода на посадку вертолета 65 м/с в этом пробеге это означает разницу в дальности обнаружения примерно 1500 м. Алгоритм, подключенный к формирователю луча MVDR, правильно классифицирует 55% выборки, классификатор с одним датчиком дает правильную оценку 40%. Обратите внимание, что в обоих случаях для этого набора данных нет выборок, классифицированных неправильно. На рисунке 3 показаны результаты для одного датчика, представленные в [2], набор данных был записан в Soesterberg 1999. Два вертолета Cougar (тип 10) сближаются и приземляются друг за другом, один неподвижный CH 47 (тип 9) стартует на платформе возле своего ангара. Для этой статьи мы обработали первую часть записи с двумя приближающимися вертолетами и запуском неподвижного вертолета.

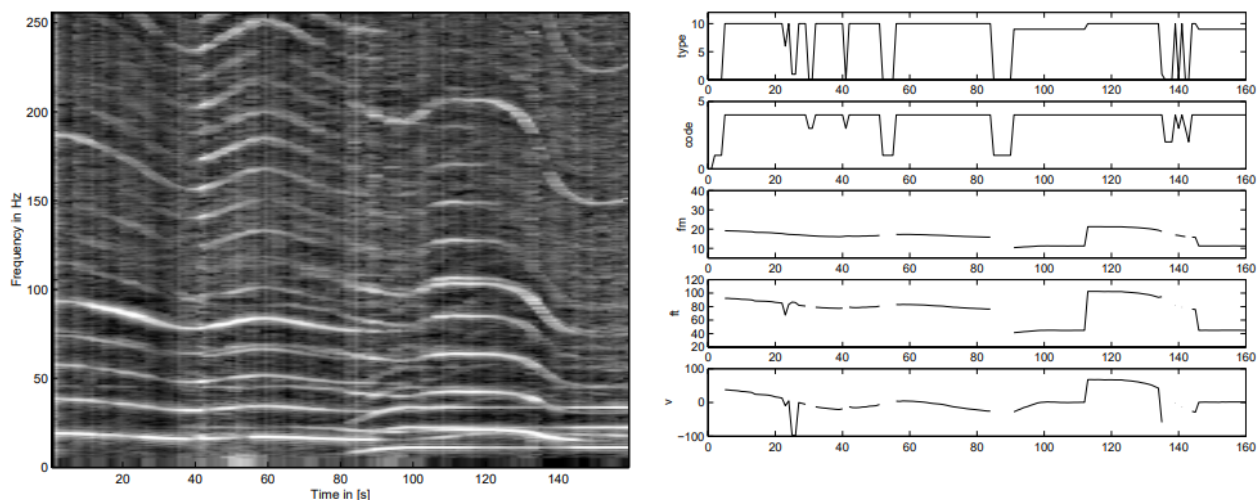


Рисунок 3. Распределение частоты во времени для нескольких вертолетов, два типа 10, один типа 9. По горизонтали: ось времени (0-160 с), по вертикали: ось частоты. Справа: результаты классификации по данным, сверху вниз: тип вертолета, классификационный код, частота несущего и хвостового винтов и скорость вертолета.

Чтобы показать способность формирователя луча MVDR разделять цели, мы обработали первую часть записи, используя формирователь луча MVDR и трекер. На рисунке 4 показаны только отслеживаемые лучи (данные от отслеживаемых лучей были представлены алгоритму классификации), а на рисунке 5 - временно-частотное распределение для нескольких вертолетов.

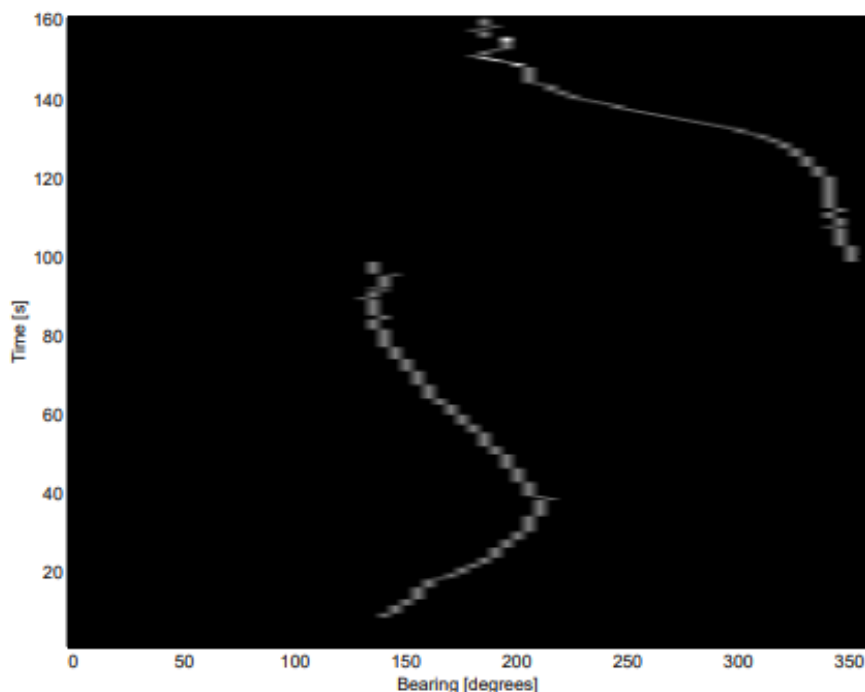


Рисунок 4. Отслеживаемые лучи записи с нескольких вертолетов: подлетающего и взлетающего

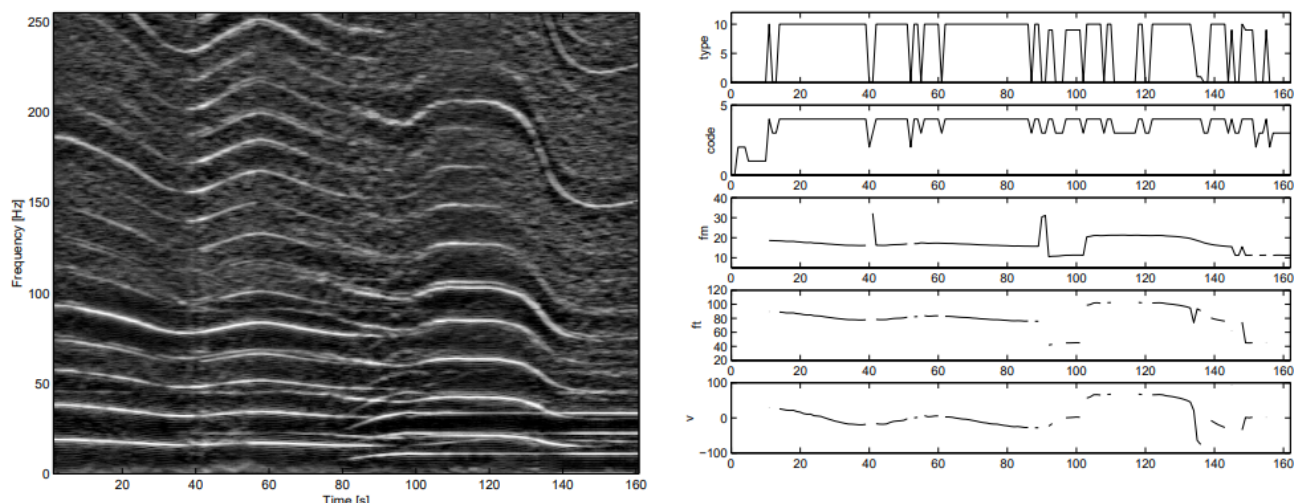


Рисунок 5. Временно-частотное распределение для нескольких вертолетов, два типа 10, один типа 9, по горизонтали: ось времени (0–160 с), по вертикали: ось частоты. Справа: результаты классификации по данным, сверху вниз: тип вертолета, классификационный код, частота несущего и хвостового винтов и скорость вертолета.

На рисунке 5 показано, что первый приближающийся вертолет правильно классифицируется как тип 10, пока пеленг не будет близок к пеленгу неподвижного вертолета, затем классификатор переключается на более громкий неподвижный вертолет. Как только новый прибывающий вертолет появляется в диаграмме направленности, трекер указывает на него. Классификатор теперь корректно переключается на тип 10. Более громкий неподвижный вертолет подавляется, пока пеленг прилетающего вертолета не окажется в пределах 20–30 градусов от пеленга неподвижного (через $t = 140$ с). Есть некоторые проблемы с правильной классификацией, однако несущий винт подобран правильно.

Список литературы:

1. L.B. Stotts, Unattended ground-sensor-related technologies: an Army perspective, in Edward M. Carapezza, Todd M. Hintz, Unattended Ground Sensor Technologies and Applications II, Proceedings of Spie Aerosense 2000, Orlando Florida.
2. A.C. van Koersel, Helicopter detection and classification demonstrator, In Unattended Ground Sensor Technologies and Applications II, Edward M. Carapezza, Todd M. Hintz, editors, Proceedings of SPIE Vol. 4040 (2000), pp. 121-130.
3. A.C. van Koersel, Acoustic Helicopter Classification Technology Demonstrator, FEL-00-A083.
4. A.C. van Koersel, Acoustic Helicopter and FW Aircraft Detection and Classification, pp. 108-118 of the Proceedings of the Ninth Annual International Symposium on Long-Range Sound Propagation, Held at TNO-FEL, The Hague, Published by the University of Mississippi, NCPA Report Number DM0501-01.
5. A.C. van Koersel, Aircraft Detection and Classification using Acoustic Sensors, FEL-01-A145.
6. Carapezza, Unattended Ground Sensor Technologies and Applications III, Spie vol 4393, April 2001.
7. L.M. Kaplan, P. Molnár, Q. Le, Bearings-only target localization for an acoustical unattended ground sensor network, Spie vol 4393, pp. 40-51.

8. R.J. Kozick, B.M. Sadler, Near-field localization of acoustic sources with imperfect spatial coherence, distributed processing, and low communication bandwidth, *Spie* vol 4393, pp. 52-63.
9. K.B. Johnson, R.L. Wright, J. Barnes, Distributed acoustic beamforming using COTS technology and Microsoft Windows CE 3.0, *Spie* vol 4393, pp. 64-68.
10. S.P. Beerens, R. Been, J. Groen, Y. Doisy & E. Noutary, Adaptive port-starboard beamforming of triplet arrays, *Proceedings of UDT Pacific*, 2000.
11. H.A. van Hoof, A.I. Bol, collection of helicopter signatures with mechanical wave sensors, phase 2, FEL-90-A156, aug 1990.
12. R.O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, 1991.