

Решение задачи радиолокационного распознавания цели с помощью оптимального канонического разложения отраженных сигналов

Solution of the problem of radar target recognition using optimal canonical decomposition of echoed signals

Денисов / Denisov A.

Александр Владимирович

(A.V.Denisov@inbox.ru)

кандидат физико-математических наук.

ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ),
доцент кафедры.

г. Санкт-Петербург

Синцов / Sintsov A.

Артём Андреевич

(sincov95@gmail.com)

СПбПУ,

студент.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: каноническое разложение – canonical decomposition; распознавание цели – target recognition; автокорреляционная функция – autocorrelation function; математическое моделирование – mathematical modeling.

В статье рассмотрена методика радиолокационного распознавания габаритов (и, соответственно, типов) летящих в тропосфере целей (большие и малые самолеты, беспилотники и т.п.), основанная на оптимальном каноническом разложении отраженных от цели зондирующих сигналов, которые имеют случайный характер за счет нестабильного движения цели и возникновения вокруг цели турбулентных завихрений.

The article discusses technique of radar determination for flying in troposphere target (large and small aircrafts, unmanned aerial vehicles) dimensions (and types, respectively) which technique is based on canonical decomposition of target echo probing signals which are of random nature due to target unstable motion and turbulence around target.

Введение

Существуют различные методы решения задачи распознавания цели, которые связаны с математической обработкой отраженных сигналов. Для повышения полноты исходной информации часто рассматривают отражение волн горизонтальной и вертикальной поляризации. Если говорить о целях, движущихся в тропосфере, в которой показатель преломления приближенно равен единице, для них можно не учитывать несущественные эффекты, связанные с трансформацией электромагнитных волн одной поляризации в волну другой поляризации за счет присутствия магнит-

ного поля Земли. Таким образом, можно приближенно считать, что электромагнитные волны распространяются и отражаются в изотропной среде, свойства которой близки к свойствам вакуума.

Задача распознавания целей относится к плохо формализуемым задачам, и для их решения применяют различные методы: кластерный анализ, регрессионный анализ, спектрально-ортогональное разложение, основанное на знании вида автокорреляционной функции (АКФ).

В данной работе мы рассмотрим решение задачи распознавания целей на основе спектрально-ортогонального разложения отраженных сигналов, применение которого требует знания АКФ. Общая схема решения многих задач о распознавании образов [1] сводится к сравнению параметров отражаемых сигналов с соответствующими характеристиками, которые получаются в результате математического моделирования, то есть на решении комплекса эталонных задач. При использовании математического моделирования мы должны опираться на априорную информацию об обрабатываемом процессе (в нашем случае – от отраженных зондирующих сигналов) и возможном диапазоне статистических параметров. Эффективность распознавания повышается, если количество параметров, входящих в модель, будет минимально необходимым при некоторой фиксированной точности приближения эталонной задачи к реальной или с точки зрения выбранного критерия сравнения.

Теория канонических разложений случайных процессов была разработана уже к середине прошлого века А. Я. Хинчиным, В. С. Пугачевым, К. Каруненом и М. Лоевом, а затем развита в исследованиях Э. И. Цветкова, А. П. Филимонова и других. Для повышения быстродействия распознавания целей, с точки зрения спектрально-ортогональных разложений, целе-

сообразно использовать именно оптимальное каноническое разложение, связанное со специальным выбором периода первой гармоники в разложении случайного процесса по тригонометрическому базису, поскольку общая схема, связанная с решением уравнения Карунена-Лоева, трудоемка.

Будем считать, что радиолокационная станция зондирует летящие цели широкополосными радиоимпульсами. Для простоты положим, что мгновенная частота каждого зондирующего импульса растет пропорционально времени. Та же самая антенна принимает сигналы, отраженные от цели, и, на основании статистической обработки сигналов, блок обработки данных вычисляет АКФ.

На рис. 1 показаны графики нормированных АКФ [2] случайных процессов – отраженных сигналов для трех типов цели. Видно, что все они имеют вид схожий с так называемыми «экспоненциальными-косинусными» АКФ, но с разными характерными масштабами изменения.

$$\rho(\delta f) = E \left[\dot{U}(f_1) \dot{U}(f_2) \right], |f_2 - f_1| = \delta f,$$

где $\dot{U} = U - E[U]$ – напряжение на входе антенны.

Полагая, что мгновенная частота f зондирующего сигнала линейно увеличивается с ростом времени t , можно получить аналогичный график (с точностью до масштабного преобразования независимой переменной), который будет иметь АКФ, которая зависит от времени, для стационарного процесса $\rho = \rho(\tau)$, $\tau = t_1 - t_2$, $t_1 = C_0 f_1$, $t_2 = C_0 f_2$, C_0 – некоторая постоянная (масштабный множитель).

Описание способа распознавания

Разложение Карунена-Лоева связано с необходимостью решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода (а иногда и дифференциальных уравнений, которые из него вытекают с учетом свойств АКФ) и требует больших вычислительных затрат, поэтому целесообразно рассматривать разложение случайного процесса по тригонометрическому базису, что строго говоря, является менее оптимальным чем Карунена-Лоево разложение, но зато более простым. Считая, что постоянная составляющая для центрированного процесса отсутствует, для $\dot{U}(t)$ напишем каноническое разложение по тригонометрическому базису

$$\dot{U}(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k \cos\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi}{T} kt\right) \right], \quad (1)$$

где A_k, B_k – случайные величины.

На незначительное нарушение стабильности траектории цели влияет большое число причин, поэтому можно допустить, что отраженный сигнал $\dot{U}(t)$ будет иметь Гауссовское распределение, следовательно случайные величины A_k и B_k также будут Гауссовскими (с нулевыми математическими ожиданиями и некоторыми дисперсиями σ_k^2). При каждом фиксированном значении периода T получается свой набор дисперсий σ_k^2 для величин A_k и B_k :

$$\sigma_k^2 = E[A_k^2] = E[B_k^2] = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \rho(\tau) \cos\left(\frac{2\pi}{T} k\tau\right) d\tau.$$

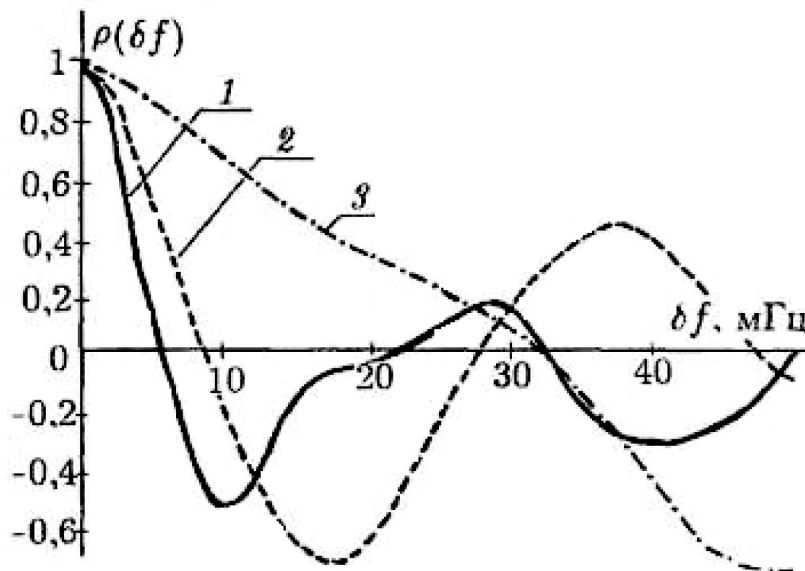


Рис. 1

так что разложение (1), а следовательно и дисперсии случайных величин A_k и B_k характеризуются многозначностью.

Таким образом, для идентификации процесса посредством величин σ_k^2 нужно зафиксировать период разложения. Чтобы обосновать выбор T , обратимся к математическому моделированию случайного процесса $U(t)$. Рассмотрим АКФ вида:

$$\rho(\tau) = \sigma^2 \left[\frac{\sin(\Omega\tau)}{\Omega\tau} \right]^\alpha \cos\left(\frac{\Omega}{q}\tau\right), \quad 0 < q^2 \ll 1$$

В работе [2] рассмотрена нормированная АКФ, потому что на вид АКФ принимаемого сигнала почти не влияет мощность зондирующего сигнала, так что мы будем рассматривать далее

$$\rho_{\text{норм}}(\tau) = \frac{\rho(\tau)}{\sigma^2}$$

При $\alpha = 2$ такой АКФ соответствует треугольный спектр графика спектральной плотности мощности. При $\alpha = 3$ он имеет параболический вид. Поскольку графики спектральных плотностей мощности, соответствующих экспериментальным $\rho(\tau)$, обычно имеют квазипараболический вид, то здесь целесообразно выбрать $\alpha = 3$. Поскольку в каноническом разложении постоянная составляющая отсутствует, то это приводит к определенному выбору возможных значений q , при котором постоянная составляющая

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \rho(\tau) d\tau = 0 \Rightarrow q = q_i, \quad i = 1, 2, \dots$$

Под оптимальным каноническим разложением понимают такой выбор периода T , при котором небольшим числом его членов можно аппроксимировать случайный процесс по энергетике выше некоторого заданного минимального уровня. Здесь мы сталкиваемся с решением вариационной задачи для нахождения T , которая также требует вычислительных затрат. Учитывая, что $q^2 \ll 1$, целесообразно выбрать

$$\frac{T}{2} = \frac{\pi}{\Omega}, \tag{2}$$

т.е. в качестве $\frac{T}{2}$ взять первый нуль огибающей АКФ. Тогда в качестве идентификационных признаков мы предлагаем несколько первых значений дисперсий случайных величин $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_k^2$, где

$$\sigma_k^2 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \rho(\tau) \cos\left(\frac{2\pi}{T}k\tau\right) d\tau. \tag{3}$$

Этот ряд должен удовлетворять трем условиям:

- 1) Значения σ_k^2 должны быть неотрицательными.

С ростом k из (3) видно, что σ_k^2 будут знакоперевающимися. Это обусловлено тем, что мы сузили область определения АКФ с бесконечной оси на отрезок

$$\left[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}\right]$$

и, следовательно, написали каноническое

разложение в виде ряда, а не интеграла Фурье.

- 2) Должно выполняться равенство

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_m^2 = \chi\sigma^2, \tag{4}$$

где χ – некоторый уровень близкий к 1, например 0,95.

- 3) Их количество m при выполнении предыдущего условия должно быть мало.

Ясно, что при выполнении этих условий, а также учитывая, что спектр мощности имеет параболический характер, значения σ_k^2 не могут все одновременно быть ни близкими к нулевому значению, ни одинаковыми.

Нетрудно убедиться в том, что при таком выборе (2) спектральные плотности мощности соответствующие рис. 1 можно аппроксимировать четырьмя гармониками с относительной погрешностью 10%, т.е. $\chi = 0,90$.

Условие (2) накладывает ограничение на выбор периода T , он должен быть больше некоторого предельного значения. А поскольку f пропорциональна t , то оптимальный выбор периода канонического разложения T автоматически определяет ширину полосы частот зондирующих импульсов.

Заключение

Если период разложения T взять меньше, чем в (2), то условие (4) не выполняется. При большем значении T условие выполнить можно, но при этом количество членов в каноническом разложении увеличится, что отрицательно влияет на эффективность распознавания.

Литература

1. Фукунага, К. Введение в статистическую теорию распознавания образов [пер. с англ.] / К. Фукунага. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 368 стр.
2. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я.Д. Ширман [и др.] // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – С. 9.
3. Zin H. and Ksienski A. – IEEE, 1981. v. AE-17. № 5.