

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

ТОЦКИЙ А.В.

Предлагается метод формирования информативных признаков на основе расчетов совокупности оценок кратковременного энергетического спектра временной последовательности величин интервалов нуль-пересечений радиолокационного сигнала обратного рассеяния, выделенных в скользящем окне, и построения в частотно-временной области совокупности сечений данных кратковременных спектров. Описываются результаты экспериментальных исследований частотно-временных распределений подвижных наземных радиолокационных объектов, принадлежащих к различным классам.

1. Введение

Одним из важнейших направлений современной теории и техники радиолокационного распознавания образцов является разработка методов получения наиболее полной и достоверной информации, содержащейся в радиолокационных сигналах обратного рассеяния. В качестве информации о распознаваемых объектах в активной радиолокации широко используются характеристики создаваемого целями поля вторичного излучения в дальней зоне РЛС. Эти характеристики, как правило, зависят от размеров и ориентации

цели, параметров её движения, типов установленных на ней двигателей и режимов их работы, параметров вибраций корпуса, а также от характеристик зондирующих сигналов и способов обработки принимаемых сигналов [1-3].

Результативное решение задачи радиолокационного распознавания и классификации объектов в значительной мере зависит от выделения из принятого колебания устойчивых информативных признаков, однозначно определяющих принадлежность объекта к тому или иному классу.

Так как информация об объекте содержится в радиолокационном сигнале обратного рассеяния, то информативный признак является функцией параметров отражённого сигнала. С помощью оценивания параметров отражённого сигнала, а также применяя аппарат статистической теории распознавания, можно успешно решать задачи радиолокационного распознавания целей [1 - 3]. В ряде случаев, однако, более предпочтительна такая процедура преобразования сигнала, которая обеспечивает удобное представление информативных признаков распознаваемой радиолокационной цели. Преобразование устанавливает соответствие между пространством сигналов и некоторым пространством функций от них. В пространстве этих функций определяются признаки радиолокационной цели. Как правило, распознавание проводится так, чтобы получить устойчивые связи между характеристиками признаков и распознаваемыми объектами. Если преобразование взаимно-однозначное, то его применение не сопровождается потерей информации и, следовательно, снижением эффективности радиолокационного распознавания целей.

Для формирования информативных признаков подвижных наземных радиолокационных объектов автoрами ряда работ [4-6] предпринимались попытки использования широкополосных сигналов. Этот подход обеспечивает высокое разрешение по дальности при формировании дальностных радиолокационных профилей объектов. Однако недостатком данного метода является низкая устойчивость измеренных характеристик при изменениях ракурса объекта.

При решении задач распознавания наземных подвижных объектов наибольшей информативностью и устойчивостью отличаются признаки, формируемые в частотно-временной области с помощью спектрограмм [7-9]. Однако данный подход не всегда позволяет выделить в частотно-временной области тонкую информативную структуру в виде вкладов микро-доплеровских компонент, присутствующих в сигнале обратного рассеяния и несущих дополнительную информацию об объекте распознавания.

Цель данного исследования – формирование информативных признаков в частотно-временной области на основе решения задачи оценивания кратковременного энергетического спектра временной последовательности величин интервалов нуль-пересечений радиолокационного сигнала обратного рассеяния, выделенных в скользящем окне, что обеспечивает достаточное частотное разрешение микро-доплеровских компонент.

2. Метод формирования информативных признаков

Предложенный метод включает следующую совокупность процедур обработки сигнала.

1. Вычисление длительности интервалов между пересечением нулевого уровня в принимаемом радиолокационном сигнале на каждом сегменте, выделенном с помощью скользящего временного окна.

2. Расчёт оценки кратковременной корреляционной функции $R_m(k)$ для каждого текущего временного сегмента в виде:

$$R_m(k) = \sum_{i=1}^{I_m} \Delta t_m(i) \Delta t_m(i+k), \quad (1)$$

$m=1,2,\dots,M; k=1,2,\dots,I_m,$

где $\Delta t_m(i)$ – величина длительности интервала между пересечениями нулевого уровня радиолокационным сигналом в произвольном m -м сегменте; I_m – количество интервалов нулевого пересечения в m -м сегменте; k – индекс временного сдвига.

3. Вычисление оценок кратковременных энергетических спектров для каждого m -го временного сегмента с помощью преобразования Фурье корреляционной функции (1):

$$S_m(p) = \sum_{k=1}^{I_m} R_m(k) e^{-j \frac{2\pi}{T_m} kp}, \quad (2)$$

где p – частотный индекс; $j = \sqrt{-1}$.

4. Построение в трёхмерной области последовательности M сечений энергетических спектров (2), совокупность которых образует единую трёхмерную функцию, зависящую от времени.

Полученное графическое изображение можно определить как своего рода “рельеф” сигнала обратного рассеяния, который достаточно наглядно характеризует свойства объекта распознавания. Данный “рельеф” содержит информативные признаки, необходимые для решения задачи распознавания образов.

3. Интерпретация результатов экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования предлагаемого метода формирования информативных признаков были выполнены на доплеровском гомодинном радиолокаторе непрерывного излучения, работающем на длине волны $\lambda_0 = 8,8$ мм на вертикальной и горизонтальной поляризации. Радиолокатор разработан и изготовлен в институте Радиофизики и Электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова [10].

Фотография радиолокатора приведена на рис. 1.



Рис. 1. РЛС, работающая на длине волны $\lambda_0 = 8,8$ мм

Технические характеристики радиолокатора:

- мощность излучения в непрерывном режиме равна $P_r = 15$ мВт;
- ширина ДН антенны в Е и Н плоскости одинакова и равна $\Delta\theta_{E,H} = 6^\circ$;
- уровень боковых лепестков 24 дБ;
- высота расположения антенны над земной поверхностью: 150 см;
- чувствительность радиолокационного приемника $P_{receiver} = 10^{-15}$ Вт/Гц;
- коэффициент шума радиолокационного приемника $F_n = 20,2$ дБ;
- уровень кросс-поляризации ≤ -30 дБ;

– двухканальный 16-разрядный АЦП позволяет регистрировать последдетекторные колебания, принятые на вертикальной и горизонтальной поляризации, в цифровом виде в формате звуковых wav-файлов.

Отрезок записи цифрового тестового сигнала обратного рассеяния калибровочного радиолокационного объекта – металлической сферы, подвешенной над поверхностью земли и совершающей маятниковые колебания, представлен на рис. 2.

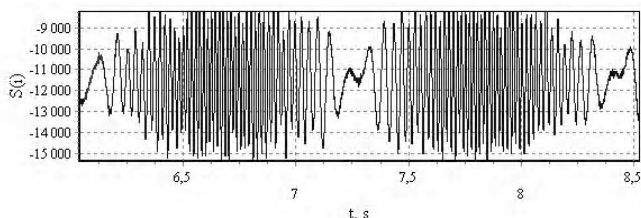


Рис. 2. Отрезок записи сигнала обратного рассеяния металлической сферы, совершающей маятниковые колебания

На рис. 2 достаточно хорошо просматривается ЛЧМ структура доплеровского сигнала обратного рассеяния: вначале наблюдается рост мгновенной частоты, затем частота убывает, а далее процесс циклически повторяется в соответствии с законом маятниковых колебаний сферы.

Зарегистрированный на выходе АЦП сигнал разбивался на M коротких сегментов (кратковременных отрезков записи без их взаимного перекрытия друг с другом) с помощью окна Дирихле длительностью 256 отсчетов, скользящего по записанному сигналу с текущим временем. В соответствии с (1) в каждом сегменте рассчитывались величины длительности интервала между пересечениями нулевого уровня

$\Delta t_m(i)$. При частоте дискретизации АЦП, равной $f_D = 4000$ Гц, длительность сегмента в 256 отсчета равна 64 ms.

Отрезок записи цифрового сигнала обратного рассеяния идущего человека приведен в качестве иллюстративного примера на рис. 3.

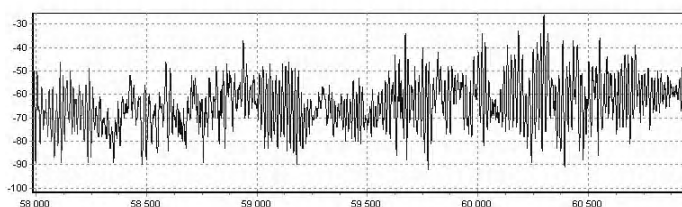


Рис. 3. Эхо-сигнал обратного рассеяния пешехода

Радиолокационный сигнал обратного рассеяния, создаваемый движущимся человеком, обладает более сложными свойствами по сравнению с рассмотренной выше металлической сферой-маятником. Сигнал обратного рассеяния шагающего пешехода имеет ярко выраженный нестационарный и многокомпонентный характер: энергетический доплеровский спектр такого сигнала занимает широкую полосу частот – начи-

ная от единиц Герц и спадая на частоте, равной приблизительно двум тысячам Герц (рис. 4).

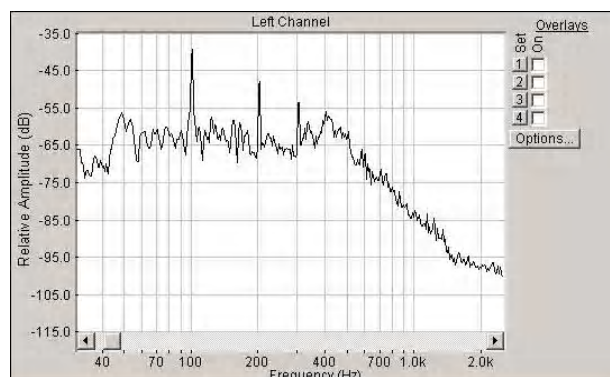


Рис. 4. Энергетический спектр обратного рассеяния человека, удаляющегося от доплеровской РЛС

Доплеровский энергетический спектр содержит наиболее мощный вклад, соответствующий поступательному движению торса человека с максимальной величиной ЭПР, и вклады микро-доплеровских компонент, вызванные низкочастотными раскачиваниями торса, маховыми и вращательными движениями рук, а также шаговыми движениями ног. Отметим, что перечисленные движения хотя и отличаются периодическим поведением, однако они могут меняться в процессе перемещения объекта не равномерно, а по более сложным кинематическим законам.

Анализ поведения энергетического спектра на рис. 4 позволяет отметить следующие особенности:

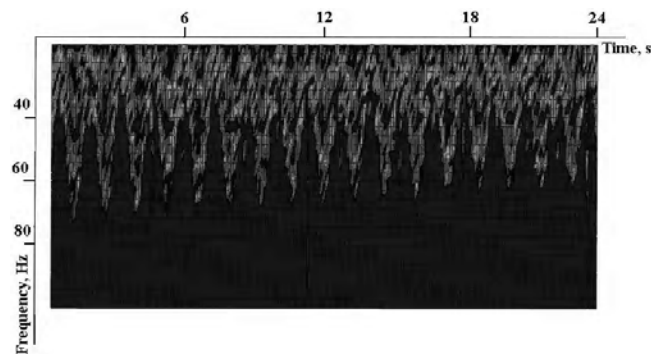


Рис. 5. ЧЗР, полученное для сферы-маятника

– доплеровский спектр – это широкополосный процесс, занимающий полосу частот от единиц до приблизительно двух тысяч Герц;

– в доплеровском спектре присутствуют как информативные, так и помеховые (вызванные обратным рассеянием от листвы деревьев и кустарника) спектральные составляющие;

– на уровне -55 дБ на частоте, равной приблизительно 400 Гц, наблюдается максимум, который соответствует поступательному перемещению торса с максимальной ЭПР;

– выделение в качестве информативных признаков индивидуального поведения микро-доплеровских вкладов представляется проблематичным на фоне помех.

Частотно-временные распределения (ЧВР) сигналов обратного рассеяния тестового калибровочного объекта (сферы-маятника), легкового автомобиля, идущего и бегущего человека, полученные с помощью предлагаемого метода, приведены на рис. 5 – 8 соответственно.

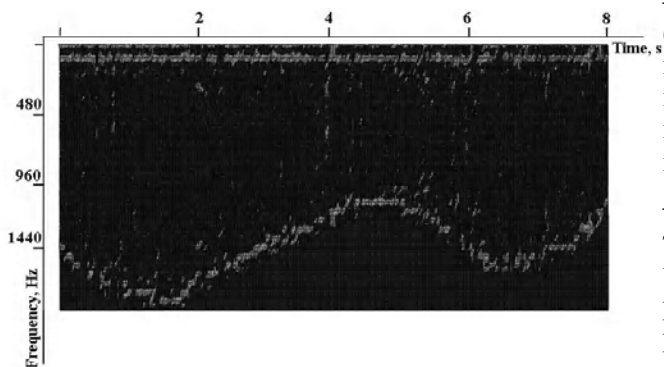


Рис. 6. ЧВР, полученное для легкового автомобиля, приближающегося к РЛС

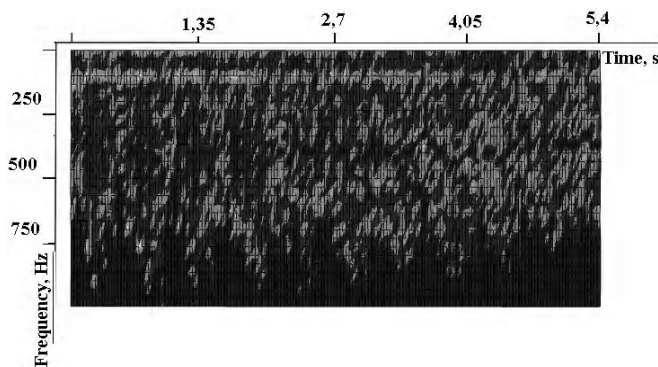


Рис. 7. ЧВР, полученное для человека, приближающегося к РЛС

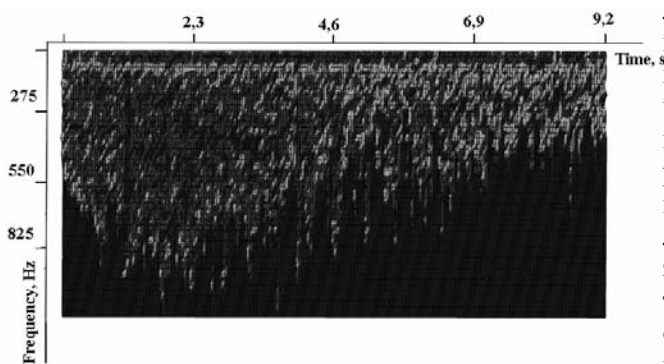


Рис. 8. ЧВР, полученное для бегущего человека, удаляющегося от РЛС

Анализ ЧВР, представленных на рис. 5 – 8, демонстрирует следующее:

- на рис. 5 хорошо просматривается эволюционный закон изменения частоты: мгновенная доплеровская частота с течением времени сначала растет, затем достигает максимального значения и после этого уменьшается. Процесс изменения частоты периодически повторяется в соответствии с периодами колебаний сферы-маятника;

- изменения мгновенной доплеровской частоты с текущим временем в ЧВР на рис. 6 соответствует изменениям радиальной составляющей скорости движения легкового автомобиля и его покачиваниям на неровностях дороги;

- медленные раскачивания торса при ходьбе человека (см. рис. 7) дают отклик на низких частотах, равных приблизительно 30 Гц, а микро-доплеровские вклады в ЧВР, вызванные размахом рук и шаговыми движениями ног, отличаются периодическим характером поведения на частотах вблизи 750 Гц;

- пределы изменения мгновенных доплеровских частот в ЧВР сигналов обратного рассеяния бегущего человека (см. рис. 8) и насыщенность микро-доплеровскими вкладыями превышают соответствующие характеристики в ЧВР шагающего человека (см. рис. 7).

4. Выводы

Предложен новый метод анализа нестационарных сигналов, наблюдаемых при обратном рассеянии электромагнитного излучения когерентной РЛС подвижными радиолокационными объектами. Предложенный подход основан на оценивании энергетического спектров такого параметра принятого сигнала, как интервал между пересечениями нулевого уровня. Оценка кратковременного энергетического спектра, формируемая в пределах временного окна, скользящего вдоль принимаемого нестационарного сигнала, позволяет построить на плоскости частота-время эволюционные портреты изменения мгновенной частоты Доплера исследуемого радиолокационного объекта. Данные портреты дают возможность выделить информативные признаки движущегося объекта для решения задачи радиолокационного распознавания. Предложенный метод исследован экспериментально с помощью когерентной, гомодинной, доплеровской РЛС миллиметрового диапазона длин волн. Представлены частотно-временные радиолокационные портреты, полученные при регистрации обратного рассеяния раскачивающейся металлической сферы, человека, идущего/бегущего к/от РЛС, а также движущегося легкового автомобиля. С точки зрения практической значимости полученные экспериментальные результаты представляются перспективными в радиолокационных системах охраны объектов для автоматического распознавания радиолокационных образов.

Литература: 1. Ширман Я.Д. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп.; под ред. Я.Д. Ширмана /Я.Д. Ширман, С.Т. Багдасарян, А.С. Маляренко и др. М.: Радиотехника, 2007. 512 с. 2. Ширман Я.Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование/ Я.Д. Ширман, С.А. Горшков, С.П. Леценко, Г.Д. Братченко, В.М. Орленко// Зарубежная радиоэлектроника. 1996. №11. С. 3–63. 3. Небабин В.Г. Методы и техника радиолокационного распознавания/ В.Г. Небабин, В.В. Сергеев. М.: Радио и связь, 1984. 152 с. 4. Sivlesein P.B. Radar target classification and interpretation by means of structural descriptions of backscatter signals/P.B. Sivlesein, S.O. Scott, F.D. Garbor // IEEE Transactions on Aerospace and System Magazine.

1991. Vol. 6. No 5. P. 3 – 7. **5.** *Chen K.* New progress on E/S pulse techniques for noncooperative target recognition /*K. Chen, D.P. Nyquist, E.J. Rothwell, W.M. Suu* // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1992. Vol. 40, No 7, P.829-833. **6.** *Smith C.R.* Radar target identification/*C.R. Smith, P.M. Goggans*// IEEE Transactions on Antennas and Propagation Magazine. 1993. Vol. 35. No 2. P.27-35. **7.** *Bilik I.* Radar target classification using Doppler signatures of human locomotion models/*I. Bilik, J. Tabrikian* // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2007. Vol. 43. No 4. P. 1510 -1522. **8.** *Van Dorp P.* Feature-based human motion parameter estimation with radar/ *P. Van Dorp, F.C.A. Groen* // IET Radar, Sonar and Navigation. 2008. Vol. 2, No 2. P. 135 - 145. **9.** *Chen V.C.* Doppler signatures of radar backscattering from objects with micro-motions/*V.C. Chen* /

/ IET Signal Processing. 2008. Vol. 2. No 3. P. 291 - 300. **10.** *Khlopov G.I.* Comparative analysis of spectrum and bispectrum estimations of coherent millimeter radar signals scattered by vegetation and precipitation/ *G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, P.A. Molchanov, V.Ye. Morozov, A.L. Tepliuk, A.V. Totsky* // Proc. of International Radar Symposium IRS. 2008. Wroclaw, Poland, 21-23 May, 2008. P. 1–4.

Поступила в редколлегию 12.06.2010

Рецензент: д-р физ. -мат. наук Сугак В.Г.

Тощий Александр Владимирович, д-р. техн. наук, профессор кафедры «Прием, передача и обработка сигналов» НАКУ им. Жуковского «ХАИ». Адрес: Украина, 61070, Харьков, ул. Чкалова 17, тел. (057) 707-43-52, e-mail: totskiy@xai.edu.ua