

УДК 621.396:681.34

А.В. Тоцкий

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ МНОГОЧАСТОТНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО БИСПЕКТРАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ

Предложен подход к частотно-временному анализу многокомпонентных ЛЧМ сигналов, основанный на выделении из нестационарного сигнала пар связанных по фазе спектральных компонент с помощью параметрического оценивания биспектральных плотностей последовательности кратковременных сегментов сигнала с использованием авторегрессионной модели. Представлены результаты обработки сигналов обратного рассеяния пешехода, полученные экспериментально на доплеровской РЛС миллиметрового диапазона длин волн.

Ключевые слова: параметрическая оценка биспектра, мгновенная частота, частотно-временное распределение.

Введение

Результативность решения задачи распознавания и классификации радиолокационных образов зависит в первую очередь от способности системы обработки сигналов выделять на фоне помех характерные устойчивые информативные признаки объекта распознавания. Доплеровский частотный спектр служит характеристикой движущегося радиолокационного объекта, широко используемой для решения задач обнаружения, классификации и распознавания [1].

В доплеровских радиолокационных системах наблюдения, обнаружения и распознавания движущихся наземных объектов (движущийся человек или группа людей, животные, колесная и гусеничная техника и др.) [2] эхо-сигнал представляет собой нестационарный процесс, в котором значения и амплитуды спектральных компонент непрерывно меняются во времени по случайному закону в процессе движения протяженного объекта. В такой ситуации общепринятое понятие «доплеровское смещение частоты» теряет смысл. В данных системах оценке подлежит параметр эхо-сигнала, который носит название «мгновенная частота» доплеровского спектра. Оценка последней величины позволяет контролировать эволюционное поведение пиков доплеровских спектральных компонент на плоскости частота-время и служит информационным признаком распознавания.

Начиная с работы Габора [3], анализ поведения мгновенного энергетического спектра, регистрируемого в виде совместной функции частоты и времени, широко применяется при спектральном оценивании нестационарных сигналов [4 – 6].

На практике на частотно-временной плоскости принято отображать величину энергии наблюдаемого сигнала, оцениваемую в единицу времени на еди-

ницу частоты. Типичным примером практического использования spectroграммы в качестве информационного признака распознавания движущихся наземных объектов является подход, представленный в статье [2]. Следует, однако, отметить, что полезная для решения задачи распознавания радиолокационного объекта информация, содержащаяся в фазовых связях спектральных компонент, оказывается безвозвратно потерянной при оценке кратковременного энергетического спектра.

Распределение Wigner-Ville [7] и его модификации с использованием разного рода ядер преобразования [6] позволяют формировать оптимальные спектральные оценки на частотно-временной плоскости для ЛЧМ сигнала. Однако главный недостаток распределения Wigner-Ville проявляется в появлении большого количества перекрестных паразитных членов при обработке сигналов с нелинейной частотной модуляцией или многокомпонентных ЛЧМ сигналов – процессов, которые содержат сумму нескольких ЛЧМ сигналов. Данные паразитные перекрестные члены приводят к возникновению нежелательных пиков на частотно-временной плоскости, маскирующих истинный характер зависимости мгновенной частоты от времени.

В работах [8 – 10] предложен подход к формированию частотно-временного распределения сигналов обратного рассеяния движущегося человека, основанный на непараметрическом биспектральном оценивании нестационарных многокомпонентных радиолокационных сигналов. Суть данного подхода состоит в выделении из многокомпонентного нестационарного радиолокационного сигнала только тех пар доплеровских спектральных компонент, которые связаны фазовыми соотношениями. Наряду с отмеченным преимуществом по сравнению с оцениванием кратковременного энергетического спектра, предложенный в [8 – 10] подход отличается высокой

помехоустойчивостью по отношению к аддитивной помехе с симметричной плотностью вероятности, и, кроме этого, биспектральная оценка не чувствительна к поворотам и вращениям объекта.

Для улучшения частотного разрешения в настоящей статье предлагается использование параметрического способа биспектрального оценивания в задаче анализа поведения многокомпонентных нестационарных радиолокационных сигналов на частотно-временной плоскости.

Цель данной работы заключается в разработке и исследовании метода частотно-временного анализа сложных нестационарных сигналов с использованием параметрического биспектрального оценивания для обнаружения фазовых связей доплеровских спектральных компонент и их селекции по отношению к тем частотам, которые таких связей не имеют.

1. Авторегрессионная модель квазистационарного сигнала

Вначале остановимся кратко на описании физической модели эхо-сигнала, создаваемого шагающим пешеходом в результате обратного рассеяния непрерывного излучения РЛС миллиметрового диапазона длин волн. Размах рук, шаги и качания торса являются источником суммы нескольких ЛЧМ колебаний. Важной особенностью данного многокомпонентного сигнала является наличие фазовых связей отдельных пар частот в доплеровском спектре обратного рассеивания. Это вызвано как механизмом взаимосвязи радиальных скоростей отдельных частей тела протяженного объекта – шагающего пешехода, т.е. механической взаимосвязью торса – «несущей» с руками и ногами, так и структурой амплитудно-фазового распределения токов проводимости СВЧ, которые протекают по движущимся элементам поверхности протяженного объекта. Наличие фазовых связей частотных пар в доплеровском спектре обратного рассеивания пешехода было обнаружено и исследовано экспериментально с помощью метода непараметрического биспектрального оценивания в работах [8 – 10].

Рассмотрим предлагаемые процедуры обработки оцифрованного эхо-сигнала, наблюдаемого при обратном рассеянии электромагнитных волн с использованием подхода, основанного на параметрическом биспектральном оценивании.

На первом этапе анализируемый процесс разбивают на $n = 1, 2, \dots, N$ коротких сегментов для получения совокупности квазистационарных сигналов. Для этого с помощью окна шириной I отсчетов, последовательно занимающего в пределах n -го сегмента $m = 1, 2, \dots, M$ положений с 50-процентным перекрытием, выделяют M коротких реализаций $x_n^{(m)}(i), i = 1, 2, \dots, I$.

В рамках предположения о том, что эхо-сигнал

от протяженного объекта содержит вклады большого количества центров обратного рассеяния, которые локализованы на движущихся участках поверхности радиолокационного объекта, квазистационарный сигнал включает сумму доплеровских спектральных компонент, количество, величины и уровни которых описываются неизвестными функциями времени. Сигналы $x_n^{V(m)}(i)$ и $x_n^{H(m)}(i)$, зарегистрированные при произвольном m -м положении скользящего окна для вертикальной (V) и горизонтальной (H) поляризации представим, соответственно, как:

$$x_n^{V(m)}(i) = \sum_{k=1}^K a_k^V(i) \cos[\varphi_k^V(i)] F^2(\theta_k) \times \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda_0}[\Gamma_k(i) - \Gamma_0(i)]\right\}; \quad (1, a)$$

$$x_n^{H(m)}(i) = \sum_{k=1}^K a_k^H(i) \cos[\varphi_k^H(i)] F^2(\theta_{km}) \times \cos\left\{\frac{4\pi}{\lambda_0}[\Gamma_k(i) - \Gamma_0(i)]\right\}, \quad (1, б)$$

где $a_k^V(i)$ и $a_k^H(i)$ – мгновенные амплитуды произвольного k -го локального центра обратного рассеяния поверхности протяженного объекта для вертикальной и горизонтальной поляризации, соответственно; $\varphi_k^V(i)$ и $\varphi_k^H(i)$ – функции времени, описывающие изменение полной фазы произвольного k -го локального центра обратного рассеяния; $F(\theta)$ – диаграмма направленности (ДН) РЛС (одна и та же антенна используется в режиме излучения и приема, причем, ширина ДН для V и H поляризации одинакова); θ_k – угловое положение центра обратного рассеяния; $\Gamma_k(i)$ и $\Gamma_0(i)$ – меняющиеся во времени расстояния от фазового центра антенны до произвольного k -го локального центра и фазового центра обратного рассеяния протяженного объекта, соответственно; λ_0 – длина волны излучения РЛС.

Характерный пример цифровой записи отрезка нестационарного многокомпонентного процесса – эхо-сигнала пешехода, удаляющегося от РЛС, приведен на рис. 1.

Важно отметить, что процесс на рис. 1 может содержать связанные по фазе спектральные компоненты, источником которых являются выше отмеченные механические и электродинамические явления, сопряженные со сложным движением отдельных частей тела пешехода и порождающие согласно модели (1) многочисленные доплеровские смещения частот. С большой долей вероятности можно ожидать, что в Фурье-спектре наблюдаемого процесса появятся мгновенные доплеровские частоты, например, $f_3 = f_1 + f_2$, имеющие фазовые связи, т.е. $\psi_3 = \psi_1 + \psi_2$ (ψ_3, ψ_1 и ψ_2 – соответствующие фазы). Если предположить, что все другие величины начальных

фаз ψ_k , наблюдаемые в модели (1), – это случайные величины, распределенные равномерно в интервале $[0, 2\pi]$, то в оценке амплитуды биспектральной плотности появится единственный пик с координатами (f_1, f_2) . Данный пик указывает на наличие фазовых связей пары доплеровских частот f_1 и f_2 и отсутствие фазовых связей на других парах частот. Следует обратить внимание на то, что спектральная плотность мощности при этом будет содержать вклады в виде пиков не только на частотах f_1 и f_2 , но и на частоте f_3 , а также на всех других доплеровских частотах f_k .

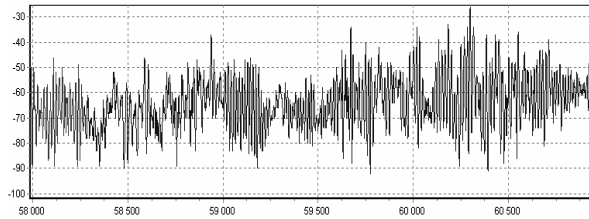


Рис. 1. Отрезок цифровой записи сигнала обратного рассеяния шагающего пешехода

Авторегрессионную (АР) модель процесса, наблюдаемого в n -м сегменте в произвольном m -м положении скользящего окна для произвольной поляризации, определим с помощью известного [11] разностного уравнения вида

$$x_n^{(m)}(i) = - \sum_{k=1}^p a_{kn} x_n^{(m)}(i-k) + n(i) \quad (2, a)$$

или
$$x_n^{(m)}(i) + \sum_{k=1}^p a_{kn} x_n^{(m)}(i-k) = n(i), \quad (2, б)$$

где $n(i)$ – случайный процесс (например, белый шум) с равномерной плотностью вероятности (ПВ), возбуждающий АР(p)-процесс порядка p и не доступный для наблюдения.

Примем следующие допущения относительно возбуждающего случайного процесса $n(i)$ в уравнениях (2): $E\{n(i)\} = 0$ (среднее полагается равным нулю), $E\{n^2(i)\} = \sigma^2$ (σ^2 – дисперсия процесса $n(i)$) и $E\{n^3(i)\} = \beta \neq 0$ (момент третьего порядка отличен от нуля).

Полагаем также, что исследуемый процесс $x_n^{(m)}(i)$ и возбуждающий процесс $n(i)$ независимы.

2. Параметрическое оценивание моментных функций третьего порядка

Оценку взаимной моментной функции третьего порядка (МФТП), формируемую в произвольном n -м сегменте в соответствии с АР моделью (2) для произвольной (V или H) поляризации, определим как:

$$\hat{R}_n(l, l) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \hat{r}_n^{(m)}(l, l), \quad (3)$$

где
$$\hat{r}_n^{(m)}(l, l) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I x_n^{V(m)}(i)w(i)[x_n^{H(m)}(i+l)w(i+l)]^2$$

– выборочная оценка взаимной МФТП, формируемая для сигналов обратного рассеяния на вертикальной (1а) или горизонтальной (1б) поляризации; $l = -p, -p+1, -p+2, \dots, 0, \dots, p-1, p$; $w(i)$ – функция окна.

МФТП удобно представить в виде следующей Теплицевой матрицы-вектора:

$$\hat{R}_n = \begin{bmatrix} \hat{R}(0,0) & \hat{R}(1,1) & \dots & \hat{R}(p,p) \\ \hat{R}(-1,-1) & \hat{R}(0,0) & \dots & \hat{R}(p-1,p-1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{R}(-p,-p) & \hat{R}(-p+1,-p+1) & \dots & \hat{R}(0,0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Для нахождения коэффициентов a_{kn} согласно выбранной модели (2) необходимо решить следующее матричное уравнение относительно вектора a_n

$$\hat{R}_n a_n = \hat{b}_n, \quad (5)$$

где $a_n = [1, a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, \dots, a_{np}]^T$ – матрица-вектор коэффициентов, которые рассчитывают для n -го произвольного сегмента наблюдаемого процесса ($n = 1, 2, \dots, N$); $\hat{b}_n = [b_0, 0, 0, \dots, 0]^T$; символ T означает процедуру транспонирования; b_0 – константа, величина которой задана в виде начального условия. Отметим, что последняя величина не влияет на мгновенную частоту – оцениваемый параметр, и как будет показано ниже, данная константа является всего лишь масштабным множителем в оценке биспектральной плотности).

Функцию биспектральной плотности $\hat{B}_n(q, s)$, оцениваемую для n -го произвольного сегмента наблюдаемого процесса, представим с помощью передаточной характеристики (ПХ) воображаемого (эквивалентного) фильтра АР(p) модели (2) как:

$$\hat{B}_n(q, s) = b_0 \hat{H}_n(q) \hat{H}_n(s) \hat{H}_n^*(s+q), \quad (6)$$

где
$$\hat{H}_n(q) = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^p a_{ni} \exp\left(-j \frac{2\pi}{I} i q\right)}$$
 – ПХ соответствующего эквивалентного фильтра АР(p) модели; $s = 1, 2, \dots, I$ и $q = 1, 2, \dots, I$ – индексы частот на биспектральной плоскости отсчетов.

Для обнаружения фазовых связей пар доплеровских спектральных частот и их селекции по отношению к тем частотам, которые таких связей не имеют, предлагается использовать модуль оценки (6). О наличии отмеченных фазовых связей на некоторой паре частот s и q свидетельствует появление пика (максимума) в модуле оценки (6). Величины амплитуд и частот отмеченных пар доплеровских спектральных компонент проецируют на плоскость «частота-время» для последовательности $n = 1, 2, \dots, N$

сегментов наблюдаемого процесса. В результате на плоскости «частота-время» формируют эволюционное распределение мгновенных доплеровских частот, характер изменения которого служит информационным признаком распознавания движущегося радиолокационного объекта.

3. Результаты компьютерного моделирования и эксперимента

Проверка работоспособности предлагаемого подхода осуществлялась как с помощью компьютерного моделирования, так и обработкой цифровых записей сигналов обратного рассеяния пешехода, полученных на доплеровской РЛС миллиметрового диапазона длин волн.

При компьютерном моделировании исследовался многокомпонентный процесс, который был задан в виде следующей суммы шести ЛЧМ сигналов с различными индексами модуляции и случайными начальными фазами

$$x_1(i) = \cos[2\pi(f_{01} + \beta_1 i)i + \varphi_1] + \cos[2\pi(f_{02} + \beta_2 i)i + \varphi_2] + \cos[2\pi(f_{03} + \beta_3 i)i + \varphi_3] + \cos[2\pi(f_{04} + \beta_4 i)i + \varphi_4] + \cos[2\pi(f_{05} + \beta_5 i)i + \varphi_5] + \cos[2\pi(f_{06} + \beta_6 i)i + \varphi_6], \quad (7)$$

где $\beta_k = (f_{T_k} - f_{0k})/T$ – величины индексов модуляции многокомпонентного сигнала, f_{T_k} и f_{0k} – частоты; $k = 1, 2, \dots, 6$; $f_{03} = f_{01} + f_{02}$ и $f_{T3} = f_{T1} + f_{T2}$; $f_{06} = f_{04} + f_{05}$ и $f_{T6} = f_{T4} + f_{T5}$; $f_{01}=1500$ Гц, $f_{02}=875$ Гц, $f_{04}=240$ Гц, $f_{05}=2000$ Гц; $f_{T1}=2000$ Гц, $f_{T2}=1440$ Гц, $f_{T4}=800$ Гц, $f_{T5}=2400$ Гц; начальные фазы $\varphi_1, \dots, \varphi_6$ – случайные величины, равномерно распределенные в пределах интервала $[0, 2\pi]$, при этом наличие фазовых связей задавалось следующим образом: $\varphi_3 = \varphi_1 + \varphi_2$, $\varphi_6 = \varphi_4 + \varphi_5$; T – полный интервал наблюдения процесса, соответствующий 10^4 отсчетам по времени. Частота дискретизации процесса (7) равнялась 8000 Гц.

На рис. 2 представлено изображение интерфейса компьютерной программы расчета биспектральной плотности (6) для произвольного сегмента. Для отображения на плоскость «частота-время» связанных по фазе пар частот выделялся пик максимальной амплитуды модуля биспектральной плотности.

График частотно-временного распределения тестового сигнала (7), полученного с помощью предлагаемого подхода, представлен на рис. 3. При расчетах использовались следующие данные: порядок АР модели $p = 20$; ширина скользящего окна Дирихле $I = 64$; количество положений скользящего окна в фиксированном сегменте $M = 10$; количество сегментов $N = 10$.

Анализ частотно-временного распределения на рис. 3 показывает, что наличие фазовых связей, присутствующих для пар частот f_{01}, f_{02} и f_{04}, f_{05} в многокомпонентном сигнале (7), сопровождается соответствующими пиками на графике. В то же самое время, частоты, не имеющие фазовых связей, не вносят вклад в частотно-временное распределение в виде пиков.

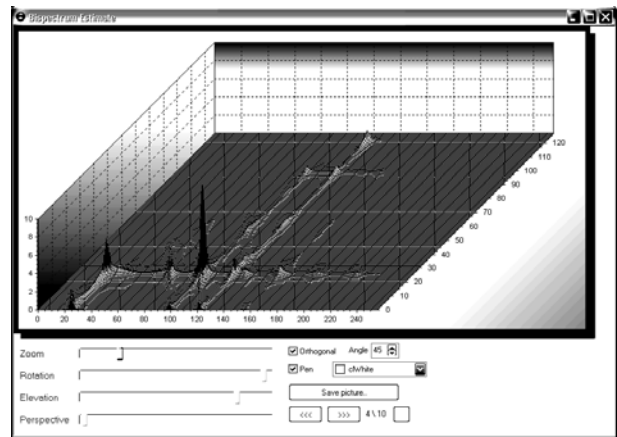


Рис. 2. Модуль биспектральной плотности для произвольного сегмента обрабатываемого сигнала: по вертикальной оси отложен модуль биспектра, по горизонтальным осям отложены частотные отсчеты

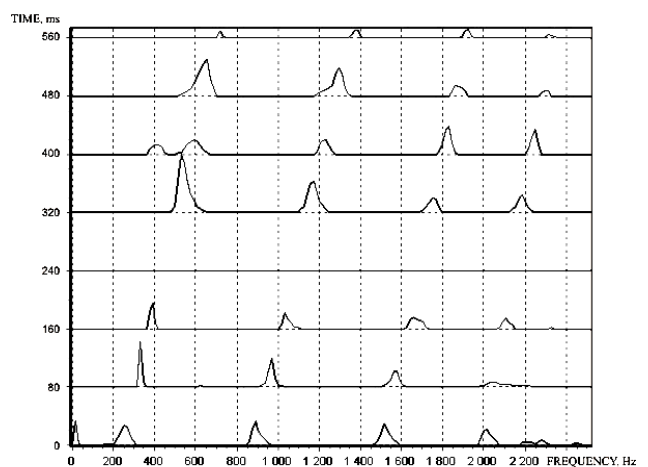


Рис. 3. Частотно-временное распределение тестового сигнала (7): по вертикальной оси отложено время в мс, а по горизонтальной оси – частота в Гц

Для экспериментальной проверки предложенного подхода проводилась обработка записей сигналов обратного рассеяния пешехода на доплеровской РЛС миллиметрового диапазона длин волн.

Параметры измерительной аппаратуры, использованной для записи:

- гомодинный радиолокатор непрерывного излучения, работающий на длине волны $\lambda_0 = 8,8$ мм (РЛС разработана в Институте радиофизики и электроники НАН Украины им. А.Я. Усикова, Харьков);
- выходная мощность, излучаемая РЛС, равна 15 мВт;

- ширина ДН рупорной антенны в плоскости Е и Н равна 6° ;

- уровень боковых лепестков ДН равен -24 дБ;
- величина кросс-поляризации ≤ 30 дБ;
- шум-фактор приемника равен $20,2$ дБ;
- при цифровой записи радиолокационных сигналов обратного рассеяния использовался 16-разрядный двухканальный АЦП.

График частотно-временного распределения сигнала обратного рассеяния пешехода, идущего по

направленню к РЛС, показан на рис. 4. При расчетах использовались следующие данные: порядок AP модели $p = 50$; ширина скользящего окна Блэкумена $I = 64$; количество положений скользящего окна в фиксированном сегменте $M = 10$; количество сегментов $N = 10$.

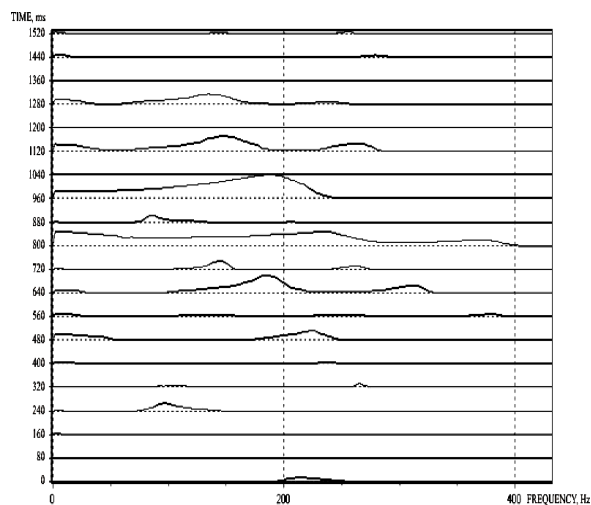


Рис. 4. Частотно-временное распределение сигнала обратного рассеяния пешехода

На последнем графике присутствуют пики на низких частотах, соответствующие раскачиванию торса пешехода при ходьбе, а также пики на более высоких частотах, соответствующие движениям рук и ног идущего пешехода.

Выводы

Предложен метод частотно-временного анализа нестационарных сигналов на основе кратковременно-параметрического биспектрального оценивания пар доплеровских частот, связанных по фазе. Данный метод позволяет выделить новые информационные признаки для решения задачи распознавания радиолокационных образов. По сравнению с непараметрическим методом биспектрального оценивания предложенный подход обеспечивает более высокое спектральное разрешение мгновенных частот.

ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ БАГАТОЧАСТОТНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЧНОГО БІСПЕКТРАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ

О.В. Тоцький

Запропоновано підхід до частотно-часового аналізу багатокomпонентних ЛЧМ сигналів який засновано на виділенні з нестационарного сигналу пар зв'язаних за фазою спектральних компонент за допомогою параметричного оцінювання биспектральних щільностей послідовностей короткочасних сегментів сигналу з використанням авторегресійної моделі. Представлені результати обробки сигналів зворотного розсіювання пішохода які одержані на доплерівській РЛС міліметрового діапазону хвиль.

Ключові слова: параметрична оцінка биспектру, миттєва частота, частотно-часовий розподіл.

TIME-FREQUENCY ANALYSIS OF MULTIFREQUENCY NON-STATIONARY SIGNALS BY USING PARAMETRICAL BISPECTRAL ESTIMATION TECHNIQUE

A.V. Totsky

Approach to time-frequency analysis of multi component LFM signals based on the extraction of pairs phase coupled spectral components by using parametrical estimation of bispectral densities of sequences of short-time signal segments and autoregressive model is proposed. Experimental results of backscattered signal processing for moving human obtained by Doppler radar operating in millimeter wavelength are represented.

Keywords: parametric estimation of bispectr, instantaneous frequency, frequency-temporal distributing.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория: Справочник. – изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Шурмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Bilik I., Tabrikian J., and Cohen A. GMM-based target classification for ground surveillance Doppler radar // *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*. – January 2006. – Vol. 42. – P. 267-278.
3. Gabor D. Theory of communication // *Journal IEE (London)*. – 1946. – Vol. 93. – P. 429-457.
4. Cohen L. Time-frequency distributions—a review // *Proceedings of the IEEE*. – 1989. – Vol. 77. – P. 941-981.
5. Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal – Part 1: Fundamentals // *Proceedings of the IEEE*. – 1992. – Vol. 80. – P. 520-538.
6. Boashash B. Estimating and interpreting the instantaneous frequency of a signal – Part 2: Algorithms and Applications // *Proceedings of the IEEE*. – 1992. – Vol. 80. – P. 540-568.
7. Ville J. Théorie et applications de la notion de signal analytique // *Cables et Transmission*. – 1948. – Vol. 2. – P. 61-74.
8. Time-frequency analysis of radar backscattered signals using phase coupled frequencies extracted from time-varying bispectrum estimates / A.V. Totsky, I.V. Kurbatov, G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, V.Ye. Morozov, J.T. Astola, K.O. Egiazarian // *Proc. 16th Internat. Conf. Microwaves, Radar and Wireless Communications MIKON-2006, Poland, Krakow, May 22-26*. – 2006. – Vol. I. – P. 203-206.
9. Time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals by using short-time cross-bispectrum estimates / J.T. Astola, K.O. Egiazarian, G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, I.V. Kurbatov, V.Ye. Morozov, A.L. Tepliuk, A.V. Totsky // *Proc. International Radar Symposium, IRS-2007, 5-7 September*. – Cologne, Germany. – 2007. – P. 805-808.
10. Application of bispectrum estimation for time-frequency analysis of ground surveillance Doppler radar echo signals / J.T. Astola, K.O. Egiazarian, G.I. Khlopov, S.I. Khomenko, I.V. Kurbatov, V.Ye. Morozov, A.V. Totsky // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. – 2008. – Vol. 57, No 9. – P. 1949-1957.
11. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 584 с.

Поступила в редколлегию 15.08.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.А. Зеленский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.