УДК 621.391

В.А. ОМЕЛЬЧЕНКО, д-р физ.-мат. наук, Л.В. ОМЕЛЬЧЕНКО

КОГЕРЕНТНОЕ И НЕКОГЕРЕНТНОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИ КОРРЕЛИРОВАННЫХ И РОДСТВЕННЫХ ИМ СИГНАЛОВ. СООБЩЕНИЕ 1. ПЕРИОДИЧЕСКИ КОРРЕЛИРОВАННЫЕ СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ

В последние два десятилетия получила развитие модель случайных сигналов, учитывающая их стохастический характер и повторяемость – периодически коррелированные (ПКСП) и родственные им процессы (и последовательности) [1,2]. Выполнен ряд работ, посвященных исследованию возможностей применения этой новой модели в задачах распознавания сигналов, в том числе в области радиолокационного распознавания и контроля радиоизлучений средств связи [3,4 и др]. В них алгоритмы распознавания в определенной степени строились с учетом особенностей ПКСП-сигналов на эвристическом уровне.

Данная работа посвящена строгому решению задачи распознавания ПКСП-сигналов в рамках классического подхода оптимального когерентного приема полностью известных сигналов и оптимального некогерентного приема сигналов.

1. Особенности гауссовских–ПКСП сигналов

Рассмотрим сначала основные характеристики гауссовского ПКСП-сигнала на примере случайной последовательности [1,2].

ПКСП-сигнал

$$\xi(\omega,k),\ k\in Z=\{0,\pm1,\pm2,...\}, \tag{1}$$

$\omega\in\Omega$ - пространство элементарных событий, имеет корреляционную функцию

$$R(k,l)=M\xi(\omega,k)\xi(\omega,l), \tag{2}$$

которая удовлетворяет условию

$$R(k+N,l+N)=R(k,l). \tag{3}$$

Здесь $N=\Lambda/2\pi$, N – период коррелированности ПКСП. Предполагается, что $M\xi(\omega,k)=0$.

Периодически коррелированная последовательность $\xi(\omega,k)$ может быть представлена в виде

$$\xi(\omega,k)=\sum_{p=0}^{N-1}\exp\left(j\frac{2\pi}{N}pk\right)\xi_p(\omega,k), \tag{4}$$

а элементы ее корреляционной матрицы – в виде

$$R(k,l)=\sum_{p,q=0}^{N-1}\exp\left[\frac{2\pi}{N}(pk-ql)\right]D_{pq}(k-l). \tag{5}$$

Формулы (4)-(5) представляют периодически коррелированный (т.е. нестационарный) сигнал через стационарные компоненты. Их совокупность определяет N-мерную (векторную) стационарную последовательность

$$\vec{\xi}(\omega,k)=\{\xi_p(\omega,k),\ p=0,...,N-1\} \tag{6}$$

с корреляционной матрицей $D_{pq}(k-l)$, где

$$D_{pq}(k-l)=M\,\xi_p(\omega,k)\xi_q(\omega,l). \tag{7}$$

Энергетический спектр случайной последовательности (4), как и в общем случае нестационарных процессов, двухчастотный. Однако, в отличие от общего случая, энергетический спектр ПКСП сосредоточен на $2N-1$ линиях

$$\lambda-\mu=\frac{2\pi}{N}k,\ k=-N+1,...,N-1 \tag{8}$$

квадрата $[0,2\pi)\times[0,2\pi)$.

Специфической особенностью ПКСП является тот факт, что последовательность отсчетов ПКСП-сигнала, взятых с периодом коррелированности N (при каждой начальной фазе $l=0,1,...,N-1$) является стационарной случайной последовательностью:

$$\eta_p(\omega,k)=\xi(\omega,l+kN),\ k\in Z. \tag{9}$$

Для гауссовского ПКСП-сигнала спектральное представление (5), представление через стационарные компоненты (6) и, в частности, случайная последовательность (9), являются гауссовскими.

2. Когерентное распознавание M периодически коррелированных гауссовских сигналов

В рамках классической задачи оптимального когерентного приема полностью известного (детерминированного) сигнала на фоне аддитивной помехи гауссовский квазибелый шум предполагается, что все параметры квазигармонического представления принятого сигнала, включая начальную фазу, известны. В предположении, что принимаемые сигналы являются периодически коррелированными гауссовскими последовательностями, задача оптимального когерентного приема M сигналов ставится следующим образом.

Заданы M ПКСП-сигналов, описывающие M типов объектов (целей, ситуаций), которые предъявляются с вероятностью P_i, $\sum_{i=1}^{M}P_i=1$. Вероятностные характеристики сигналов полностью известны. Производится дискретизация принятого сигнала с периодом взятия отсчетов, равным периоду коррелированности N_r, $r=\overline{1,M}$, где N_r - период коррелированности r-го сигнала. Сигнал наблюдается на интервале $n>>\max N_r$.

На основе представлений (4)-(5) вместо первоначального сигнала (который является частным случаем нестационарного) формируется эквивалентный векторный стационарный процесс (6), полученный путем взятия отсчетов исходного сигнала с периодом N_r. Для формирования такого эквивалентного сигнала согласно (6) необходимо увеличить время наблюдения сигнала в N_r раз, т.е. $n_\Sigma=nN_r$. Эквивалентный векторный процесс полностью определен согласно (4)-(5), является гауссовским с корреляционной матрицей (7) размером $nN_r\times nN_r$.

Оптимальное решающее правило распознавания М гауссовских стационарных процессов $\vec{\eta}i(\omega,k)$, наблюдаемых на конечном интервале, имеет вид (5)

$$P_iN(D_i)\geq P_rN(D_r),\ r=\overline{1,M},\ r\neq i, \tag{10}$$

где $N(D_r)$ - нормальный закон распределения с нулевым вектором среднего и корреляционной матрицей D_r:

$$N(D_r)=\frac{1}{(2\pi)^{\frac{nN_r}{2}}|D_r|^{\frac{1}{2}}}\exp\left\{-\frac{1}{2}\vec{\eta}^{tr}D_r^{-1}\vec{\eta}\right\}.$$

Соответственно, алгоритм (10) может быть записан в развернутом виде

$$\vec{\eta}^{tr} D_r^{-1} \vec{\eta} - \vec{\eta}^{tr} D_i^{-1} \vec{\eta} \geq \ln\left\{\left(\frac{P_r}{P_i}\right)^2 \frac{|D_i|}{|D_r|}\right\}, \; r=\overline{1,M} \; , \; r \neq i . \tag{10a}$$

3. Некогерентное распознавание M периодически коррелированных сигналов

Основная идея оптимального некогерентного приема сигналов, известных с точностью до случайной начальной фазы, заключается в усреднении функции правдоподобия (характерной для оптимального приема полностью известных сигналов) по всем значениям начальной фазы. При этом решающее правило (10) оптимального некогерентного приема M сигналов

$$\eta_p(\omega,k)=\xi(\omega,l+kN_r), \; r=\overline{1,M}$$

имеет общий вид

$$P_i \sum_{l=0}^{N_i-1} P_i(l)\, w^i(\vec{\eta}/l) \geq P_r \sum_{l=0}^{N_r-1} P_r(l)\, w^r(\vec{\eta}/l), \tag{11}$$

где $P_r(l)$ - распределение начальной фазы r-го сигнала, $r=\overline{1,M}$; $w^r(\vec{\eta}/l)$ - функция правдоподобия r-го сигнала при начальной фазе l.

В оговоренных условиях наблюдения гауссовских ПКСП в предположении равномерного распределения начальной фазы $P_r(l)=\frac{1}{N_r}$, учитывая, что практически $N_r \approx N$, $r=\overline{1,M}$, алгоритм некогерентного оптимального приема M ПКСП-сигналов можно привести к виду

$$P_i \sum_{l=1}^{N_i-1} N(R_i^l) \geq P_r \sum_{l=1}^{N_r-1} N(R_r^l) \; , \; r=\overline{1,M} \; , \; r \neq i . \tag{11a}$$

В алгоритме некогерентного приема информация о корреляционных матрицах M сигналов используется иначе (по сравнению с методом когерентного приема) – используется корреляционная матрица R_r^l для каждого сдвига l внутри периода коррелированности N_r.

4. Пример распознавания ПКСП–сигналов

Эффективность модели ПКСП по сравнению с традиционной моделью гауссовского стационарного процесса исследовалась путем моделирования и на экспериментальных данных[1] применительно к задаче распознавания радиолокационных объектов, для которых характерен турбовинтовой эффект.

Эвристически предполагалось и подтверждено на базе экспериментальных данных, что отраженный радиолокационный сигнал имеет структуру ПКСП. Особенно характерный вид имеет спектр сигнала: он двухчастотный, но (как следует из соотношения (8)) имеет гребенчатую структуру, определяемую периодом коррелированности.

Для иллюстрации эффективности ПКСП-модели проведен следующий модельный эксперимент. Предполагалось, что некие два объекта порождают ПКСП-отраженные сигналы с корреляционными матрицами, которые имеют одинаковые диагональные члены. Экспериментально показано, что если в решающем правиле применять модель стационарного гауссовского сигнала, получается оценка вероятности ошибки их распознавания $\hat{P}_{ош}=0{,}46$. В

[1] Авторы благодарят к.т.н. А.В. Омельченко за проведенный эксперимент

рамках модели ПКСП - $\hat{P}_{ош} = 0{,}07$. То есть, различные объекты в рамках классической модели неразличимы, а в рамках модели ПКСП они очень контрастны и легко распознаются.

Экспериментальные исследования по реальным сигналам проведены на базе данных, полученных от 5 радиолокационных объектов. Длительность наблюдения сигналов составляла $n = 1024$. На более или менее эвристическом уровне использовались идеи когерентного приема, определяемого решающим правилом (10), трансформированным в спектральную область. В гребенчатом двухчастотном спектре использовались спектральные отсчеты, превышающие уровень 0,3. Для каждого сигнала выделен 21 информативный признак. Обеспечена вероятность правильного распознавания 5 радиолокационных объектов $\hat{P}_{пр\,расп} = 0{,}82$ $(\hat{P}_{ош} = 0{,}18)$.

Выводы

1. Периодически коррелированные случайные процессы (последовательности) эффективно учитывают стохастичность и повторяемость случайных сигналов.
2. Возможен когерентный и некогерентный оптимальный прием сигналов, описанных в рамках модели ПКСП. Приведены строгие решения задачи распознавания ПКСП сигналов в рамках классической теории статистических решений.
3. Иллюстративный пример распознавания сигналов показывает преимущество ПКСП-модели по сравнению с классической моделью стационарного гауссовского процесса, а также иллюстрирует возможность распознавания радиолокационных сигналов.

Список литературы: 1. *Драган Я.* Енергетична теорія лінійних моделей стохастичних сигналів. Львів: Центр стратегічних досліджень еко-біо-технічних систем, 1997. 361с. 2. *Імовірнісні моделі випадкових сигналів та полів у прикладах і задачах;* За ред. В.О. Омельченка. К.: ІСДО, 1996.-272с. 3. *Омельченко В.А., Омельченко А.В., Драган Я.П.* и др. Распознавание гауссовских периодически коррелированных случайных сигналов. // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Сообщ.1 1988. Вып.85 С.75-79; Сообщ.2 1989. Вып.91. С.42-49. 4. *Безрук В.М., Голобородько Ю.Н., Омельченко А.В.* и др. Оценивание параметров вероятностной модели принимаемых сигналов в виде периодически коррелированных случайных сигналов в задачах связи при действии аддитивных и мультипликативных помех // Вероятностные модели и обработка случайных сигналов и полей. К.: УМКВО, 1991. С.37-42. 5. *Омельченко В.А.* Основы спектральной теории распознавания сигналов. Харьков: Вища шк., 1983. 159с.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 13.12.2001