

УДК 621.391

К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц, С.В. Озеров

Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ФЛЮКТУАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ХАОТИЧЕСКОГО СИГНАЛА НА КАЧЕСТВО ЕГО КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В работе анализируются возможности традиционной корреляционной (когерентной) обработки при обнаружении хаотического радиолокационного сигнала на фоне шума и его искажениях при распространении в неоднородной тропосфере и отражении от совокупности движущихся блестящих точек. Показано, что наличие флуктуаций параметров сигнала снижает качество такой обработки. Для повышения качества обработки таких сигналов при малых отношениях сигнал-шум необходимо учитывать их специфическую структуру через динамические инварианты.

Ключевые слова: корреляционная обработка, трансформация хаотического сигнала, кривые обнаружения.

Введение

Возрастающие требования к РЛС привели в середине 50-х годов XX века к появлению способа повышения разрешающей способности РЛС по дальности путем применения в качестве зондирующего сигнала ЛЧМ и ФКМ радиоимпульсов. Таким путем одновременно достигались и большая энергия излучения, свойственная длинному зондирующему импульсу, и высокое разрешение по дальности, свойственное короткому сжатому сигналу за счет согласованной обработки. В настоящее время на вооружении радиотехнических войск стоят такие РЛС, как 79К6, П-18 МА, 5Н84-А МА в которых применяются длинные ФКМ и ЛЧМ радиоимпульсы (длительностью порядка десятков микросекунд). Это стало возможным за счет применения новой элементной базы, в частности твердотельных транзисторных передатчиков и цифровой приемной аппаратуры.

В настоящее время к РЛС выдвигаются более жесткие требования. Во-первых, необходимо как можно больше информации извлечь из радиолокационного объема, а во-вторых, необходимо получить как можно более тонкий инструмент для его анализа, обеспечивая при этом высокую помехозащищенность (скрытность) системы.

Исходя из этого, в последние годы активно проектируются радиолокационные системы, работающие в режиме повышенной скрытности (Low Probability of Intercept radar) [1]. Это достигается обеспечением их работы под “шум”. Одним из решений указанных проблем является применение хаотических сигналов. Корреляционные свойства хаотического сигнала [2] позволяют его применять в качестве зондирующего при построении РЛС, так как он обладает высоким разрешением по дальности, а увеличение длитель-

ности импульса позволит обеспечить высокое разрешение по частоте и требуемую энергию излучения.

В работе [3] показана принципиальная возможность применения корреляционной обработки хаотических сигналов на фоне белого шума, но без учета флуктуаций его параметров из-за распространения в неоднородной атмосфере и отражения от сложной цели.

Целью работы является решение задачи обнаружения хаотического сигнала на фоне белого шума при его трансформации за счет распространения в неоднородной тропосфере и переломления от сложной цели многоканальным коррелятором.

Изложение основного материала

Известно, что турбулентность тропосферы приводит к флуктуациям ее показателя преломления, которое в свою очередь вызывает флуктуации параметров сигнала [4].

Экспериментальные и теоретические данные, изложенные в [5, 6] показывают, что в образовании фазовых флуктуаций радиосигналов наибольший вклад осуществляют турбулентности тропосферы с внешним масштабом от сотен метров до единиц километров.

При распространении сигнала в неоднородной среде возможна его модуляция по случайному закону. В работе [5] показано, что флуктуации фазы и амплитуды радиосигналов распределены по нормальному закону. С учетом зависимости от длины волны, флуктуации фазы в тропосфере существенны для сантиметровых и более коротких волн, а флуктуации амплитуды – для субмиллиметровых и более коротких волн [5]. Поэтому в дальнейшем флуктуациями амплитуды можно пренебречь.

Для фазовых флуктуаций [5, 6], распределенных по нормальному закону, при гауссовой форме

коэффициента корреляции флюктуации показателя преломления тропосферы выражение дисперсии фазовых флюктуаций имеет вид

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sigma_n^2 k^2 S L_0, \quad (1)$$

где σ_n^2 – дисперсия флюктуаций показателя преломления тропосферы; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; λ – длина волны радиосигнала; S – путь пройден волной в тропосфере; L_0 – средний размер турбулентной неоднородности.

В [6] рассчитаны величины дисперсии фазовых флюктуаций радиосигнала, который прошел свободную тропосферу со средним размером турбулентной неоднородности $L_0 \approx 100$ м. Значения дисперсии флюктуаций показателя преломления лежат в границах $\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-12} - 0,25 \cdot 10^{-10}$, причем, первая цифра отвечает средним условиям, а вторая является максимально вероятной. Результаты расчета выражены в рад² и собраны в табл. 1.

Таблица 1

Значения дисперсий фазовых флюктуаций σ_{φ}^2 при распространении электромагнитной волны в тропосфере

$L_0, \text{м}$	100	
$\lambda, \text{см}$	3	10
$\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-12}$		
S=50 км	$0,48 \cdot 10^{-1}$	$0,44 \cdot 10^{-2}$
S=100 км	$0,97 \cdot 10^{-1}$	$0,87 \cdot 10^{-2}$
S=200 км	$1,94 \cdot 10^{-1}$	$1,74 \cdot 10^{-2}$
$\sigma_n^2 = 0,25 \cdot 10^{-10}$		
S=50 км	4,8	0,44
S=100 км	9,7	0,87
S=200 км	19,4	1,74

Такая цель как самолет имеет сложную форму, вследствие чего суммарный отраженный сигнал представляет собой векторную сумму группы отраженных сигналов от отдельных частей цели, например от двигателей, винтов, фюзеляжа и плоскостей. Движение цели и ее частей относительно РЛС вызывает изменения суммарного отраженного сигнала во времени, что приводит к флюктуациям сигнала при радиолокационном измерении координат и параметров движения цели.

Данные флюктуации, вызываемые только самой целью, без учета влияния атмосферы и шума РЛС, называются шумом цели [7].

Пусть цель облучается хаотическим сигналом $X(t)$, сформированным при помощи полинома Чебышева 1-го рода 3-го порядка (рис. 1).

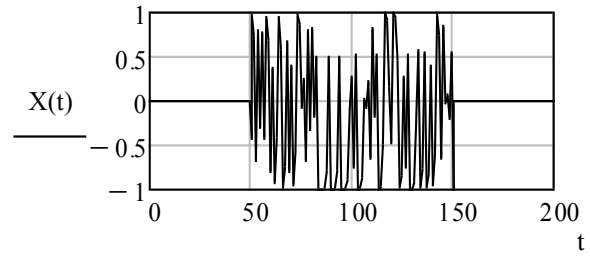


Рис. 1. Хаотический радиоимпульс

Тогда отраженный от реальной цели сигнал будет случайным образом промодулирован по амплитуде и фазе

$$y(t) = B(t) X(t) e^{j2\pi(F_{\text{дцр}}t + \beta(t))}, \quad (2)$$

где $B(t)$ и $\beta(t)$ – законы изменения случайных компонент амплитуды и фазы отраженного сигнала, обусловленные амплитудными и фазовыми шумами цели; $X(t)$ – ожидаемый сигнал; $F_{\text{дцр}}$ – средняя частота Доплера, обусловленная движением центра отражения с радиальной скоростью $V_{\text{гср}}$.

Экспериментальные исследования показывают, что плотность вероятности амплитудного множителя B в (2) существенным образом зависит от типа цели. Распределение амплитуд отраженного сигнала для широкого класса целей часто аппроксимируют m -распределением (распределением Накагами) $m = 1, 2, 3, \dots$ [8].

$$p(B, m) = \left(\frac{2m^m B^{2m-1}}{\Gamma(m)} \right) e^{-mB^2}, \quad B > 0 \quad (3)$$

где $\frac{2m^m}{\Gamma(m)}$ – нормирующий коэффициент; $\Gamma(m)$ – гамма функция.

Закон распределения случайной фазы β отраженного сигнала (2) практически для всех встречающихся на практике случаев [8] является равномерным

$$p(\beta) = \frac{1}{2\pi}, \quad 0 < \beta < 2\pi. \quad (4)$$

Вид распределения Накагами иллюстрируется на рис. 2 для $m=1$, $m=3$, $m=8$. Из анализа рис. 2 следует, что при $m=1$ распределение (3) переходит к распределению Релея

$$p(B) = 2Be^{-B^2}. \quad (5)$$

Такая модель хорошо описывает флюктуации сигнала, отраженного от цели, имеющей большое число блестящих точек примерно одинаковой интенсивности. Этот случай характерен для описания флюктуаций отраженного сигнала бомбардировщика или истребителя с большим количеством элементов на внешних подвесках, облучаемых электромагнитной волной сантиметрового диапазона.

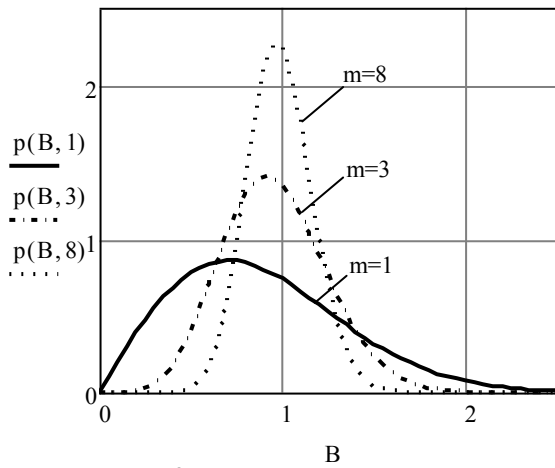


Рис. 2. Распределение амплитуд отраженного сигнала

Для данного случая статистическому описанию цели соответствует нормальный закон распределения квадратурных амплитуд b_c, b_s множителя $V = \sqrt{b_c^2 + b_s^2}$:

$$p(b_{c,s}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{(-b_{c,s}^2)}. \quad (6)$$

Если среди блестящих точек цели выделяется доминирующий отражатель, то используют распределения (3) с параметрами $m=2$ или $m=3$. При $m \rightarrow \infty$ распределения (3) описывают поведение не флюктуирующей цели [8].

При численном моделировании корреляционной обработки хаотического сигнала ожидаемый сигнал $X(t)$ представлялся дискретной величиной и задавался в комплексном виде:

$$X_t = X_{c,t} + iX_{s,t}, \quad (7)$$

где $X_{c,t} = x_{c,t}, x_{c,t+1} = (4x_{c,t})^3 - 3x_{c,t}$ с начальным условием полинома $x_{c0} = 0.162$, а $X_{s,t} = x_{s,t}, x_{s,t+1} = (4x_{s,t})^3 - 3x_{s,t}$ с начальным условием полинома $x_{s0} = 0.365$.

Исходя из вышеизложенного, модель отраженного сигнала от цели с учетом распространения в неоднородной тропосфере будет иметь вид

$$y_t = B_t \dot{X}_t e^{j2\pi(F_{дсп}t + \beta_t)} e^{j\varphi_t}, \quad (8)$$

где φ_t – случайная величина изменения фазы при распространении сигнала в тропосфере, подчиненная нормальному распределению. Тогда принимаемая реализация Y_t является аддитивной смесью белого шума N_t и отраженного сигнала y_t :

$$Y_t = y_t + N_t. \quad (9)$$

Опираясь на выше изложенный материал, математическое моделирование обнаружения хаотического сигнала, с учетом фазовых и амплитудных флюктуаций при прохождении тропосферы и отра-

жения от цели на фоне белого шума проводилось методом многоканальной корреляционной обработки [3]. Моделирование проведено для следующих случаев:

1) при отсутствии флюктуаций параметров сигнала за счет переотражении от цели и прохождения тропосферы;

2) при наличии слабо флюктуирующей цели и слабых флюктуациях фазы сигнала за счет распространения в тропосфере, в этом случае закон изменения множителя B_t аппроксимирован (3) с $m=8$, а значения дисперсии флюктуаций фазы величины φ_t принимались $\sigma_{\varphi}^2 = 0,44 \cdot 10^{-2}$; 3) при наличии средне флюктуирующей цели и средних флюктуациях фазы сигнала за счет распространения в тропосфере, закон изменения множителя B_t аппроксимирован (3) с $m=3$, а значения дисперсии флюктуаций фазы величины φ_t принимались $\sigma_{\varphi}^2 = 0,87 \cdot 10^{-2}$; 4) при сильно флюктуирующей цели и сильных флюктуациях фазы сигнала за счет распространения в тропосфере, закон изменения дисперсии флюктуаций фазы величины φ_t принимались $\sigma_{\varphi}^2 = 1,74 \cdot 10^{-2}$.

На рис. 3 иллюстрируются фазовые портреты модели излучаемого x_t и отраженного y_t хаотического радиоимпульса.

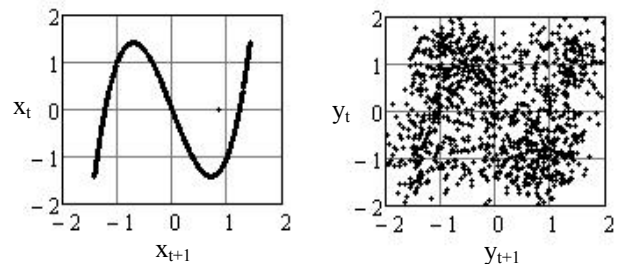


Рис. 3. Фазовые портреты излучаемого x_t и отраженного y_t хаотического радиоимпульса

Из анализа рис. 3 видно, что переотражение существенно искажает форму сигнала и его фазовый портрет. Это вызывает необходимость применения методов нелинейного анализа при обработке таких сигналов.

На рис. 4 приведены результаты численного расчета зависимостей вероятности правильного обнаружения D ($D1, D2, D3, D4$ для случаев 1, 2, 3, 4 – соответственно) от отношения сигнал-шум q при заданной вероятности ложной тревоги $F=10^{-6}$. Для моделирования каждого случая формировалось 400 наблюдаемых реализаций, состоящих из 1100 значений и содержащих по 5 обнаруживаемых целей. Кривая 1 получена для идеализированных условий и является ориентиром для оценки влияния трансформации хаотического сигнала на пока-

затели качества его обнаружения при корреляционной обработке.

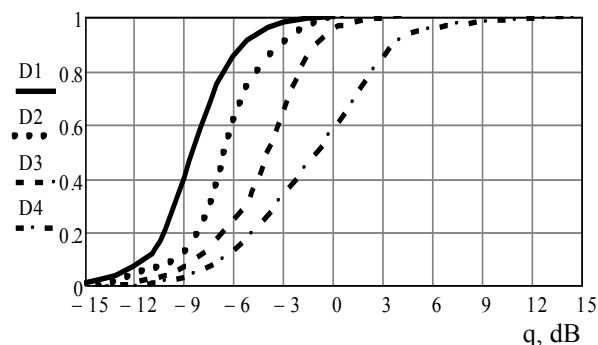


Рис. 4. Кривые обнаружения хаотического сигнала при корреляционной обработке

Анализ рис. 4 показывает, что при корреляционной обработке длинного хаотического радиоимпульса без учета флуктуаций его параметров вероятность правильного обнаружения $D=0.9$ достигается при отношении сигнал-шум меньше 1, то есть $q=-5$ dB, за счет высокого сжатия.

Это говорит о возможности применения зондирующего сигнала небольшой мощности, что в свою очередь позволяет обеспечить более высокую скрытность работы РЛС.

Но наличие флуктуаций амплитуды и фазы отраженного хаотического сигнала приводят к снижению вероятности его правильного обнаружения, например, для сильных флуктуаций $D=0.9$ обеспечивается при $q=4$ dB.

Выводы

Таким образом, исследования показали, что флуктуации амплитуды и фазы хаотического радиолокационного сигнала за счет распространения в неоднородной тропосфере и отражения от сложной цели приводят к ухудшению показателей качества

его обнаружения при корреляционной обработке. Для повышения качества обработки таких сигналов при малых отношениях сигнал/шум необходимо учитывать их специфическую структуру через динамические инварианты.

Список литературы

1. Pace P.E. *Detecting and Classifying Low Probability of Intercept Radar* / P.E. Pace. – Second Edition. – London: Artech house, 2009. – 862 p.
2. Васюта К.С. Анализ корреляционных свойств хаотических радиоимпульсов / К.С. Васюта, А.А. Малышев, Ф.Ф. Зоц // Системы обробки інформації: Збірник наукових праць. – Х.: ХУ ПС, 2012. – Вип. 3(101), т. 2. – С. 22-25.
3. Васюта К.С. Корреляционная обработка хаотических сигналов / К.С. Васюта, А.А. Грызо, Ф.Ф. Зоц // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУ ПС, 2012. – Вип. 2(31). – С. 62-64.
4. Чернов Л.А. Распространение волн в среде со случайными неоднородностями / Л.А. Чернов. – М.: Наука, 1975. – 171 с.
5. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / [С.А. Горшков, Д.И. Леховицкий, Н.Н. Минервин и др.]; / под. общ. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: ЗАО "МАКВИС", 1998. – 828 с: ил., библи. 539 назв.
6. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн / Я.С. Шифрин. – М.: Сов. радио, 1970. – 384 с.
7. Скольник М. Справочник по радиолокации / Пер. с англ. под общ. ред. К.Н. Трофимова. – Т. 1. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
8. Локационная системотехника / [В.Б. Алмазов, Г.С. Богословский, П.А. Брандис и др.] ; под общ. ред. В.Б. Алмазова. – Х.: ВИРТА, 1993. – 620 с.

Поступила в редколлегию 17.08.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.М. Седышев, Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ФЛУКТУАЦІЙ ПАРАМЕТРІВ ХАОТИЧНОГО СИГНАЛУ НА ЯКІСТЬ ЙОГО КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОБРОБКИ В ВИМІРОВАЛЬНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

К.С. Васюта, Ф.Ф. Зоц, С.В. Озеров

У роботі аналізуються можливості традиційної кореляційної (когерентної) обробки при виявленні хаотичного радіолокаційного сигналу на фоні шумів та його спотворенні при розповсюдженні в неоднорідній тропосфері і відбитті від сукупності блискучих точок, що рухаються. Показано, що наявність флуктуацій параметрів сигналу знижує якість такої обробки. Для підвищення якості обробки таких сигналів при малих відношеннях сигнал-шум необхідно враховувати їх специфічну структуру через динамічні інваріанти.

Ключові слова: кореляційна обробка, трансформація хаотичного сигналу, криві виявлення.

ANALYSIS OF INFLUENCE OF FLUCTUATIONS PARAMETERS OF CHAOTIC SIGNAL ON QUALITY OF ITS CORRELATION PROCESSING IN MEASURING RADIO SYSTEMS

K.S. Vasuta, F.F. Zots, S.V. Ozerov

Possibilities of traditional correlation (coherent) processing at detection of a chaotic radar-tracking signal against noises and its distortions at distribution to non-uniform troposphere and reflection from set of moving brilliant points are analyzed in the work. It is shown that the presence of fluctuations parameters of signal reduces quality of such processing. For improvement quality of processing such signals at small relations a signal-noise it is necessary to consider their specific structure through dynamic invariants.

Keywords: correlation processing, transformation of chaotic signal, curves of detection.