

## СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ВЫХОДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОТРАНСФОРМАТОРА ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ С ДВИГАТЕЛЕМ

В.И. Мандрус

*Предложен упрощенный способ построения выходной характеристики гидротрансформатора при совместной работе с двигателем, который по сравнению с существующим уменьшает количество расчетов и, следовательно, возможность ошибок, возникающих при проектировании и выполнении расчетно-графических заданий студентами, курсантами, слушателями.*

**Ключевые слова:** гидротрансформатор, характеристики гидротрансформатора, гидромеханическая передача.

## THE METHOD OF CONSTRUCTING THE OUTPUT CHARACTERISTIC OF THE HYDRAULIC TRANSFORMER IN JOINT WORK WITH THE ENGINE

V. Mandrus

*A simplified method for constructing the output characteristic of the hydraulic transformer in joint work the engine is suggested, which in comparison with the existing method reduces the number of calculations and, therefore, the possibility of errors in the design and implementation of computational and graphic tasks for students and cadets.*

**Key words:** hydraulic transformer, the characteristics of the hydraulic transformer, hydraulic mechanical transmission.

---

УДК621.396.97

Е.К. Поздняков<sup>1</sup>, В.Н. Ткаченко<sup>2</sup>, В.В. Коротков<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ПАО «СКБ РТУ», Донецк

<sup>2</sup> Институт прикладной механики и математики, Донецк

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРИОДА ВРАЩЕНИЯ АНТЕННЫХ СИСТЕМ РЛС ПАССИВНЫМИ МНОГОПОЗИЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ ПРИ ПОМОЩИ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

*В данной статье выполнено сравнение метрологических характеристик различных методов определения периода вращения антенных систем РЛС. Проанализированы характерные искажения сигнала, возникающие при его прохождении через тропосферу. Обоснована целесообразность использования автокорреляционной функции с предварительной параметрической фильтрацией сигнала для определения периода вращения антенных систем РЛС. Выработаны рекомендации по применению предлагаемого метода в пассивных многопозиционных комплексах контроля радиоэлектронной обстановки.*

**Ключевые слова:** пассивный многопозиционный комплекс, автокорреляционная функция, импульсный сигнал, период, пачка импульсов, фильтрация.

### Постановка проблемы

В пассивных многопозиционных комплексах (ПМК) контроля радиоэлектронной обстановки при определении координат целей широко применяют методы, основанные на использовании временных параметров излучаемой аппаратуры. Период вращения антенной системы (ПВ АС) радиолокационной станции (РЛС) является важным параметром и, в общем случае, соответствует периоду сигнала (ПС). Точность вычисления координат целей существенно зависит от точности определения ПВ АС.

Задача определения ПВ АС значительно усложняется в условиях дальней тропосферной разведки (ДТР). В процессе распространения в тропосфере искажениям подвергаются следующие параметры сигнала: амплитуда импульсов, форма импульсов (передний фронт, задний фронт, вершина), длительность импульсов (период повторения импульсов, форма огибающей серии (пачки) импульсов). Наибольшим искажениям подвергаются форма огибающей серии (пачки) импульсов, задний фронт импульсов. Таким образом, существует необходимость разработки

алгоритма определения временных параметров сигнала, с учетом указанных искажений в условиях ДТР[1].

### Анализ последних исследований и публикаций

Существует большое количество работ, связанных с методами определения временных параметров сигналов. Использование автокорреляционной функции и ее амплитудного спектра достаточно полно описаны в [5], [6]. Тем не менее, зачастую применение указанных методов требует предварительную обработку сигнала. Таким образом, с учетом многообразия искажающих факторов при ДТР и высоких требований к стабильности работы аппаратуры, создание универсального алгоритма определения временных параметров становится нетривиальной задачей. Данный алгоритм обязательно должен включать в себя предварительную обработку или фильтрацию принятого искаженного сигнала.

### Цель статьи

Целью данной статьи является разработка алгоритма определения периода вращения антенных

систем РЛС с учетом существенных искажений формы сигнала, возникающих в условиях ДТР.

### Искажения реального сигнала в тропосфере

Известно, что характеристики сигнала в точке приема подвержены хаотическим колебаниям. При прохождении радиосигнала через атмосферу неизменно наблюдаются флуктуации в точке приёма. Если путь сигнала целиком лежит в атмосфере, локальные изменения ее показателя преломления и коэффициента поглощения, движения слоёв и неоднородностей приводят к тому, что радиоволны рассеиваются, отражаются или поглощаются. Это создаёт хаотический процесс наложения более или менее быстрых изменений уровня сигнала на некоторую среднюю его величину. В случае движения слоёв возникают рефракционные замирания. Динамика более мелких неоднородностей создаёт статистическую картину сравнительно быстрых флуктуаций[2].

Рассмотрим некоторый реальный сигнал  $f(t)$ , принятый после прохождения через тропосферу. Рассматриваемый сигнал состоит из нескольких пачек импульсов, повторяющихся во времени с некоторым периодом  $T$  (рис. 1).

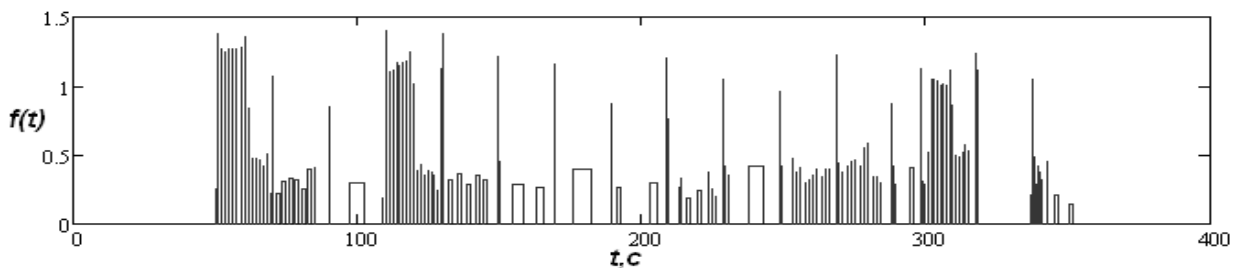


Рис.1. Реальный сигнал без предварительной фильтрации

На рис. 1, между основными пачками импульсов, присутствуют «боковые всплески» - импульсы, возникающие в силу фазовой флуктуации.

Детальное рассмотрение пачки импульсов показывает другие характерные искажения, возникающие при прохождении сигнала через тропосферу (рис. 2).

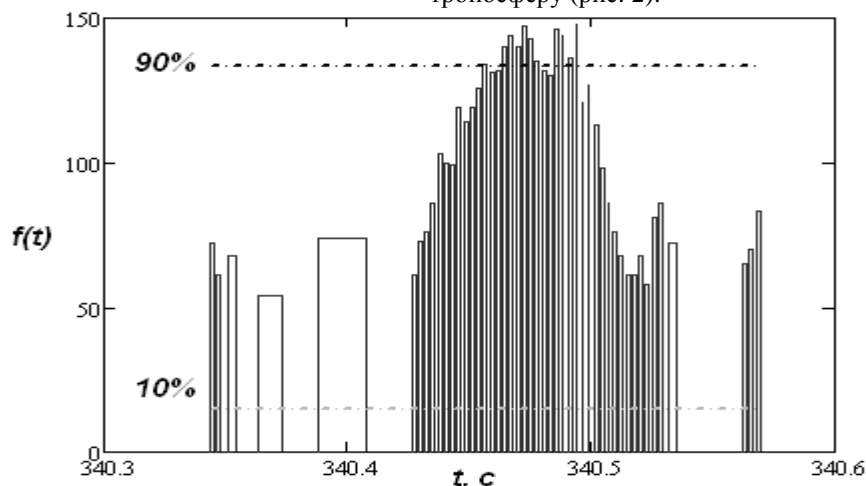


Рис.2. Характерный вид пачки импульсов на временной оси

Как видно из рис. 2, наибольшим искажениям подвергается форма огибающей пачки импульсов, в силу амплитудных флуктуаций сигнала в процессе его распространения в среде. Также наблюдается искажение переднего и заднего фронтов импульса.

Искажения, показанные на рис.1-2, усложняют алгоритм расчета периода вращения антенной системы РЛС и требуют применения специальных методов фильтрации и обработки [3].

### Сущность метода

Рассмотрим применение автокорреляционной функции для определения ПС. В общем случае, автокорреляционная функция определяется по формуле [4]

$$AC(\tau) = \int f(t) \cdot f(t - \tau) dt, \quad (1)$$

где  $AC(\tau)$  – автокорреляционная функция,  $f(t)$  – входной сигнал,  $f(t-\tau)$  – входной сигнал, смещенный на некоторое время  $\tau$ .

В нашем случае, входной сигнал  $f(t)$  можно считать стационарным эргодическим случайным процессом, следовательно, автокорреляционная функция принимает вид [4]:

$$AC(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T (f(t) - m_T)(f(t + \tau) - m_T) dt, \quad (2)$$

где  $m_T$  – математическое ожидание эргодического

случайного процесса и определяется по формуле

$$m_T = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (3)$$

Поскольку при анализе реального импульсного сигнала  $f(t)$  значения измерений дискретны, а их количество ограничено, то оценка автокорреляционной функции рассчитывается следующим образом:

$$AC(n) = \frac{1}{N-n} * \sum_{k=0}^{N-n-1} (f(k \cdot \tau) - m_x)(f(k \cdot \tau + n \cdot \tau) - m_x), \quad (4)$$

где  $m_T$  – оценка математического ожидания:

$$m_T = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k \cdot \tau). \quad (5)$$

Оценка дисперсии может быть выполнена по формуле

$$\sigma_T^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} (f(k \cdot \tau) - m_T)^2. \quad (6)$$

С учетом формул (4-5), автокорреляционная функция реального сигнала принимает вид, показанный на рис. 3.

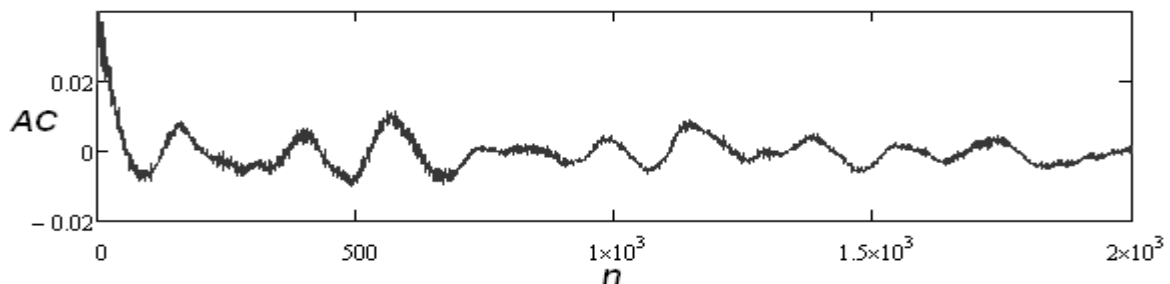


Рис. 3. График автокорреляционной функции сигнала  $f(t)$

Зная моменты достижения локальных максимумов автокорреляционной функции, несложно вычислить ПС по формуле

$$T_k = t_{\max_{i+1}} - t_{\max_i}, \quad (7)$$

где  $T_k$  – период сигнала,  $t_{\max_i}$  – локальные максимумы автокорреляционной функции,  $k = 1..n-1$ ,  $i = 1..n$ , где  $n$  – количество пачек импульсов. При нахождении максимумов автокорреляционной функции возможна ситуация, когда одна пачка импульсов будет иметь несколько локальных максимумов автокорреляционной функции  $AC$ . В этом случае, можно находить среднее арифметическое

максимумов или же выбирать тот максимум, где автокорреляционная функция принимает максимальное значение.

Также можно использовать локальные минимумы автокорреляционной функции для нахождения ПС

$$T_k = t_{\min_{i+1}} - t_{\min_i}, \quad (8)$$

где  $t_{\min_i}$  – локальные минимумы автокорреляционной функции.

Итоговые результаты вычисления ПС сведены в табл. 1.

**Результаты определения периода сигнала с использованием локальных максимумов автокорреляционной функции без предварительной фильтрации**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_k$	19,8	14,46	5,32	19,79	19,8	6,04	13,76	19,78	19,74	4,68

Полученные результаты крайне неравномерны и изменяются в широких пределах. Причины данной неравномерности заключаются в наличии «боковых всплесков», возникающих в силу фазовой флуктуации и других факторов. Основным эффектом использования автокорреляционной функции заключается в нахождении характерных особенностей изменения формы сигнала в присутствии амплитудных флуктуаций. Следовательно, перед применением автокорреляционной функции, входная импульсная последовательность должна быть отфильтрована. Для удаления «боковых всплесков» могут быть использованы различные критерии: ожидаемая длительность пачки, средняя амплитуда пачки, среднее количество импульсов в пачке. Очевидно, что в реальных системах для качественной фильтрации требуется некоторая калибровка принимающей аппаратуры, которая может быть выполнена автоматически или вручную оператором. Другим способом борьбы с «боковыми

всплесками» может быть увеличение интервала корреляции - величину временного сдвига  $\tau$ , при превышении которой корреляцией можно пренебречь в конкретных условиях. Однако при увеличении  $\tau$  возможен пропуск пачек, несущих информационную нагрузку[5].

**Использование автокорреляционной функции после предварительной фильтрации сигнала**

Отфильтруем входной сигнал  $f(t)$ , выбрав в качестве критерия длительность пачки импульсов. В данном примере хорошие результаты достигаются при удалении пачек импульсов с длительностью менее 0,1 с. Отфильтрованная импульсная последовательность показана на рис. 4 а.

На дискретной оси, сигнал имеет вид, показанный на рис. 4 б.

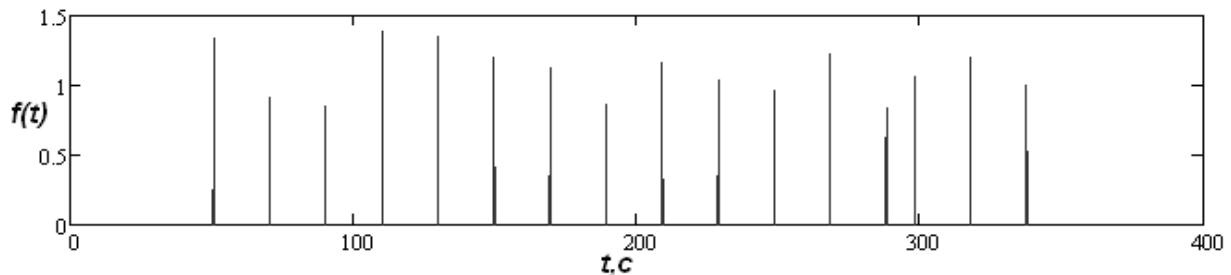


Рис. 4 а. Отфильтрованный сигнал на временной оси

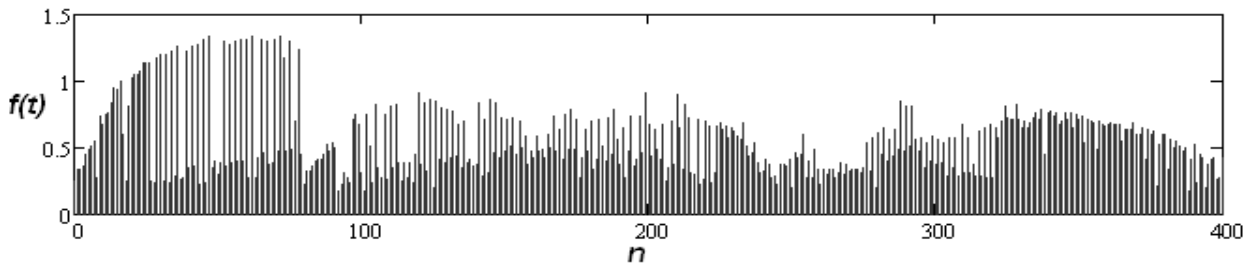


Рис. 4 б. Отфильтрованный сигнал на дискретной оси

Рис. 4 а-4 б представляют собой один и тот же сигнал, изменение формы которого показано на временной оси (рис. 4 а) и дискретной оси (рис. 4 б). Согласно рис. 4 а можно сделать вывод, что предварительная фильтрация на основе анализа длительности пачек импульсов эффективно убрала фрагменты сигнала, не представляющие

информационного интереса. Как следует из рис. 4 б, амплитудные флуктуации формы сигнала требуют применения автокорреляционной функции.

Повторим вычисление автокорреляционной функции согласно (4-5).

Вычислим ПС согласно (7). Итоговые результаты вычисления периода повторения

реального импульсного сигнала сведены в табл. 2. Период  $T_1$  вычисляется на основе осредненных максимумов автокорреляционной функции  $AC$  в

каждой пачке импульсов,  $T_2$  – путем выбора максимумов с максимальным значением  $AC$  в каждой пачке.

Таблица 2

**Результаты определения ПС с использованием локальных максимумов автокорреляционной функции после предварительной фильтрации пачек импульсов**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_1$	19,8	19,78	19,79	19,81	19,77	19,74	19,82	19,8	19,78	19,75
$T_2$	19,79	19,9	19,71	20,03	19,8	19,55	20,08	19,53	19,87	19,76

Сравним метрологические характеристики полученных результатов. Для этого определим математическое ожидание и дисперсию вычисленных периодов.

Математическое ожидание и дисперсия столбца значений  $T_1$

$$m_T = 19,79c; \sigma_T^2 = 4,486 \cdot 10^{-4} c^2.$$

Математическое ожидание и дисперсия столбца значений  $T_2$

$$m_T = 19,79c; \sigma_T^2 = 2,9 \cdot 10^{-2} c^2.$$

Повторим вычисления ПС с использованием локальных минимумов автокорреляционной функции согласно (8). Итоговые результаты вычисления периода реального импульсного сигнала сведены в табл. 3. Период  $T_1$  вычисляется на основе осредненных минимумов автокорреляционной функции  $AC$  в каждой пачке импульсов,  $T_2$  – путем выбора минимума с минимальным значением  $AC$  в каждой пачке.

Таблица 3

**Результаты определения ПС с использованием локальных минимумов автокорреляционной функции после предварительной фильтрации пачек импульсов**

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$T_1$	19,8	19,78	19,79	19,81	19,81	19,77	19,74	19,82	19,8	19,78
$T_2$	19,85	19,77	19,75	19,96	19,81	19,79	19,59	19,99	19,78	19,79

Математическое ожидание и дисперсия столбца значений  $T_1$

$$m_T = 19,79c; \sigma_T^2 = 5,324 \cdot 10^{-4} c^2.$$

Математическое ожидание и дисперсия столбца значений  $T_2$

$$m_T = 19,78c; \sigma_T^2 = 1,5 \cdot 10^{-2} c^2.$$

Использование локальных максимумов и минимумов автокорреляционной функции дает сравнимые по точности результаты вычисления периода сигнала.

Таким образом, использование автокорреляционной функции обеспечивает высокую точность вычисления периода импульсного сигнала даже при наличии искажений в сигнале. Важной задачей является предварительная фильтрация входного сигнала от «боковых всплесков», то есть устранение неинформативных пачек импульсов.

### Амплитудный спектр автокорреляционной функции

Спектральной плотностью мощности стационарного случайного сигнала является преобразование Фурье соответствующей автокорреляционной функции  $AC(t)$ . В общем случае, спектральная плотность мощности сигнала определяется по формуле [6]

$$A(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} AC(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt,$$

где  $AC(t)$  - автокорреляционная функция.

Построим амплитудный спектр, который является модулем спектральной функции  $A(f)$ . Графический вид амплитудного спектра приведен на рис. 5:

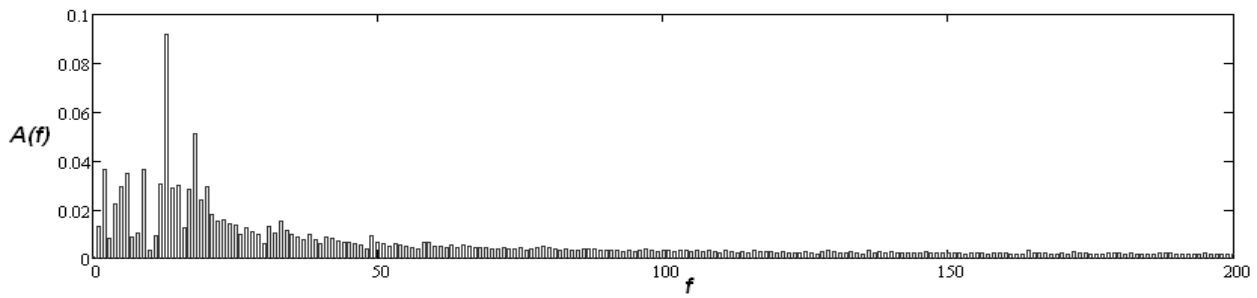


Рис.5. Амплитудный спектр автокорреляционной функции

Для восстановления частоты соответствующего отсчета из амплитудного спектра, необходимо знать частоту дискретизации  $f_{disk}$  исходного сигнала [7]

$$f_k = \frac{k}{n} \cdot f_{disk},$$

где  $k$  – соответствующая частота амплитудного спектра,  $n$  – число отсчетов автокорреляционной функции,  $f_{disk}$  – частота дискретизации.

Период повторения автокорреляционной функции соответствует максимуму амплитудного спектра, тогда ПС можно найти по формуле

$$T = \frac{n}{k_{max}} \cdot f_{disk}, \quad (9)$$

где  $k_{max}$  – номер отсчета частоты, соответствующей максимуму амплитудного спектра.

Исходя из формулы (9), период сигнала равен  $T = 19,254$  с.

Определение ПС из амплитудного спектра сопряжено с определенными сложностями. В реальных условиях возможны пропуски отдельных измерений, что влияет на частоту дискретизации. При большом размере входного массива приходится «прореживать» исходные данные, что также может привести к неравномерности частоты дискретизации. В некоторых случаях возможно возникновение «краевого эффекта», что ведет к необходимости

усложнения вычислительного алгоритма, что, в свою очередь, приводит к серьезному увеличению времени вычисления.

### Частные методы нахождения ПВ АФС

Рассмотрим другой метод определения ПС. Согласно рис. 5 а, при условии незначительной длительности пачки импульсов ( $\approx 0,1$ с) возможно применение более простого алгоритма.

На рис. 3 показаны линии, соответствующие уровням сигнала, равным 10% и 90% от максимальной амплитуды импульсов в пачке. Сущность метода заключается в нахождении среднего времени для каждого из диапазонов ( $t_{max1}$  и  $t_{max2}$ ), с последующим вычислением усредненного времени ( $t_{cp}$ ), которое будет принято за время достижения максимума сигнала в пачке импульсов.

$$t_{cp} = \frac{t_{max1} + t_{max2}}{2}.$$

Зная моменты достижения максимума сигнала, несложно рассчитать период сигнала по формуле (7). Расчетные значения ПС сведены в таблицу 4. Период  $T_1$  найден при условии, что за максимум сигнала принимается середина длительности пачки импульсов, период  $T_2$  вычисляется на основе  $t_{cp}$ .

Таблица 4

Результаты определения ПС при осреднении по двум диапазонам

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T1	19,89	19,78	19,79	19,85	19,8	19,77	19,69	19,89	19,79	19,8
T2	19,84	19,78	19,8	19,82	19,8	19,77	19,73	19,85	19,8	19,79

Математическое ожидание и дисперсия столбца значений  $T_1$

$$m_T = 19,8с; \sigma_T^2 = 4,029 \cdot 10^{-3} c^2.$$

Математическое ожидание и дисперсия столбца значений  $T_2$ :

$$m_T = 19,79с; \sigma_T^2 = 1,283 \cdot 10^{-3} c^2.$$

Тем не менее, использование рассмотренного метода носит ограниченный характер, поскольку в

данном случае погрешность определения периода вращения АФС РЛС прямо зависит от значения длительности пачек импульсов.

### Выводы

В данной статье показаны способы определения ПВ АС при прохождении сигнала в тропосфере. Все методы показали достаточную точность результатов для последующего определе-

ния координат, например, с использованием разностно-дальномерного метода. При условии незначительной длительности пачек импульсов возможно использование простых алгоритмов, результаты применения которых приведены в табл. 3. Однако искажение длительности импульсов может привести к большой погрешности результатов вычисления периода. Использование автокорреляционной функции позволяет с высокой точностью вычислять ПС в условиях ДТР, при наличии в форме сигнала амплитудных флуктуаций. Однако использование автокорреляционной функции сопряжено с увеличением сложности алгоритма и времени вычисления. Окончательный выбор метода определения ПВ АС может варьироваться в зависимости от требуемой точности вычислений, режимов приема сигнала, характера сигнала и его параметров, вычислительных возможностей комплекса. При любом из методов, важной задачей является предварительная фильтрация входного импульсного сигнала от «боковых всплесков».

## Список литературы

1. Аверьянов В.Я. Разнесенные радиолокационные станции и системы. – М.: Наука и техника, 1978. – 184 с.
2. Арсеньян Т.И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере. – Минск: Наука и техника, 1978. – 184с.
3. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993 – 416 с.
4. [http://www.bookasutp.ru/Chapter4\\_1\\_3.aspx](http://www.bookasutp.ru/Chapter4_1_3.aspx)
5. Paolo Prandoni and Martin Vetterli Signal Processing for communications. – CRC PRESS, 2008. – 372 с. Спектр и временной анализ сигналов.pdf
6. Кузнецов Ю.В., Баев А.Б. Спектральный и временной анализ импульсных и периодических сигналов. – М.: Издательство МАИ, 2000 – 96 с.
7. Панферов А.И., Лопарев А.В., Пономарев В.К. Применение Mathcad в инженерных расчетах. Учеб. пособие – СПб.: СПбГУАП, 2004 – 88 с.

**Рецензент:** д.т.н., проф. А.Г.Воронцов, кафедра автоматизации и телекоммуникаций (АТ) Донецкого национального технического университета (ДонНТУ), г. Донецк.

## ПІДВИШЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДУ ОБЕРТАННЯ АНТЕННИХ СИСТЕМ РЛС ПАСИВНИМИ МНОГОПОЗИЦІЙНИМИ КОМПЛЕКСАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ АВТОКОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ

Є.К. Поздняков, В.М. Ткаченко, В.В. Коротков

В даній статті розглянуто метод визначення періоду обертання антенної системи РЛС за допомогою автокореляційної функції. Показані характерні спотворення сигналу, що виникають при відбитті від тропосфери, обґрунтована необхідність використання автокореляційної функції з попередньою фільтрацією сигналу. Побудована автокореляційна функція, виконано порівняння метрологічних характеристик різних методів знаходження періоду, вироблені рекомендації щодо застосування автокореляційної функції при обчисленні періоду сигналу в пасивних многопозиційних комплексах.

**Ключові слова:** пасивний многопозиційний комплекс, автокореляційна функція, імпульсний сигнал, період сигналу, пачка імпульсів, фільтрація.

## IMPROVEMENT IN ACCURACY OF PERIOD DEFINITION OF RADAR ANTENNA ROUTING SYSTEMS IN PASSIVE MULTIPPOSITION SYSTEM BY USING AUTOCORRELATION FUNCTION

E.K. Pozdnyakov, V.N. Tkachenko, V.V. Korotkov

This paper presents the method of determining the rotation period of the radar antenna system by using the autocorrelation function. The characteristic signal distortions, arising during the reflection from the troposphere, is shown, the necessity of using of the autocorrelation function with a signal pre-filtering is established. In this article autocorrelation function is drawn, intercomparison of the metrological characteristics from the different methods of period definition was made, were created recommendations about autocorrelation function using in the signal period calculation in the passive multiposition systems.

**Key words:** passive multiposition complex, autocorrelation function, pulse signal, signal cycle, pulse packet, filtration.