

УДК 621.396.96

## РАСШИРЕНИЕ ИНТЕРВАЛА ОДНОЗНАЧНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ В РАДИОЛОКАТОРАХ ОБЗОРА ПРИ ЗАДАННОМ ИНТЕРВАЛЕ ОДНОЗНАЧНОЙ ДАЛЬНОСТИ

С.Ю. СЕДЫШЕВ, М.Н. ВОРОНЦОВ

Военная академия Республики Беларусь  
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 28 марта 2012

Представлен новый принцип расширения интервала однозначного определения радиальной скорости при заданном интервале однозначной дальности на основе использования в качестве зондирующего сигнала набора взаимно ортогональных радиоимпульсов.

*Ключевые слова:* взаимно ортогональные сигналы, интервал однозначного определения радиальной скорости, интервал однозначного определения дальности, фильтры устройства внутрипериодной обработки.

### Введение

Использование сложных зондирующих сигналов (ЗС) в радиолокации позволило повысить помехоустойчивость радиолокационных станций (РЛС), уменьшить пиковую мощность излучения передающих устройств. Применение псевдослучайных последовательностей для формирования сложных шумоподобных сигналов улучшило эффективность использования радиодиапазона за счет кодового разделения ЗС [1,2].

Известный способ расширения интервала однозначного определения радиальной скорости [3] является малоэффективным и характеризуется сложностью технической реализации. Для расширения интервала однозначного определения радиальной скорости при заданном интервале однозначной дальности предлагается использовать в качестве ЗС когерентную последовательность, состоящую из взаимно ортогональных сигналов. В данной статье рассматривается принцип расширения интервала однозначного определения радиальной скорости, основанный на свойствах взаимной ортогональности сигналов в последовательности.

Наличие составных сигналов с различными взаимно ортогональными законами модуляции (ЗМ) приводит к некоторому усложнению устройства внутрипериодной обработки принятого сигнала. В связи с этим целесообразно рассмотреть не только структуру составного ЗС, но и особенности его обработки.

### Принцип расширения интервала однозначного определения радиальной скорости при заданном интервале однозначной дальности

Рассмотрим случай, когда в качестве ЗС  $u(t)$  используется ограниченная когерентная последовательность сигналов, отвечающая условию взаимной ортогональности сигналов [4]:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} U_a(t)U_b^*(t)dt = 0 \quad \forall a \neq b, a, b = \overline{1, N} \quad (1)$$

где  $U_a(t)$ ,  $U_b(t)$  – ЗМ рассматриваемых сигналов.

Комплексный ЗМ такой последовательности описывается выражением:

$$U(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} U_n(t - mT_{\Pi} - nT_{\Pi 1}), \quad (2)$$

где  $N$  – число ЗС со взаимно ортогональными ЗМ;  $M$  – число периодов повторения в пределах ограниченной когерентной последовательности;  $U_n(t)$  – один из ортогональных ЗМ последовательности;  $T_{\Pi}$  – период повторения сигналов в ограниченной когерентной последовательности с одинаковым ЗМ;  $T_{\Pi 1}$  – интервал следования сигналов со взаимно ортогональными ЗМ.

Квадратурная составляющая последовательности взаимно ортогональных сигналов показана на рис. 1.

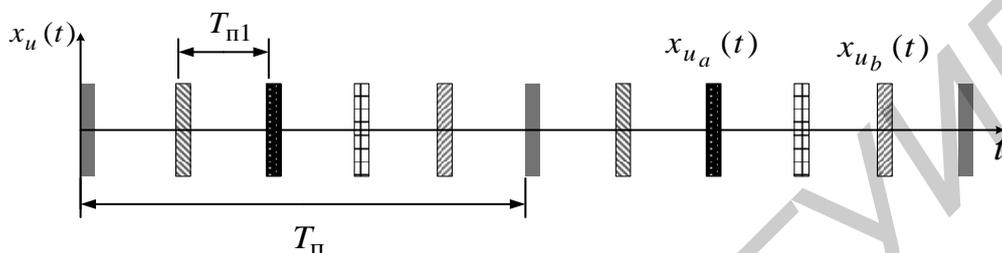


Рис. 1. Квадратурная составляющая ЗС, состоящего из пяти взаимно ортогональных сигналов

В качестве характеристики ЗС будем рассматривать функцию неопределенности (ФН), которая определяется известным выражением [2]:

$$\rho(\tau, F) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} U(t) U^*(t - \tau) e^{-j2\pi Ft} dt \right|^2.$$

На рис. 2 представлена ФН ограниченной последовательности простых прямоугольных радиоимпульсов (ППРИ) (рис. 2 а) и ФН ограниченной последовательности, сформированной из пяти рассовмещенных во времени взаимно ортогональных сигналов (рис. 2 б).

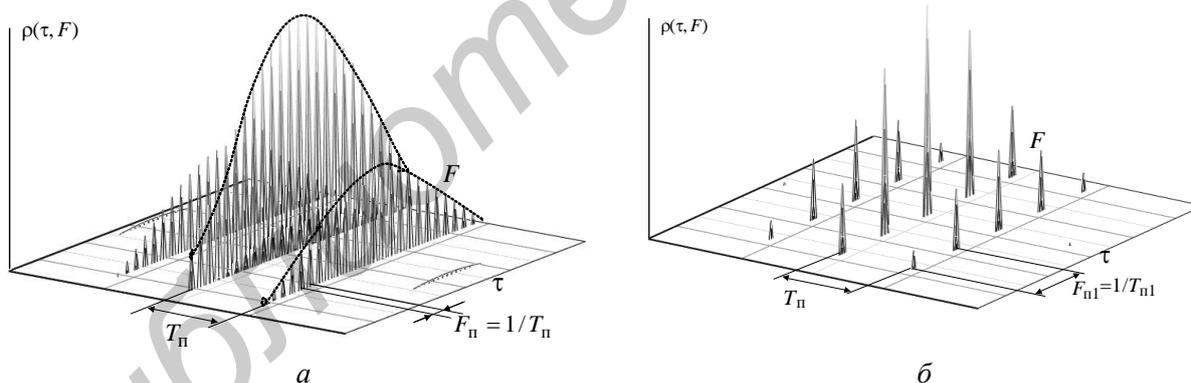


Рис.2. Функция неопределенности: а – последовательности ППРИ; б – последовательности со взаимно ортогональными сигналами

Для классической последовательности (рис. 2 а) пики в сечении ФН вдоль оси  $F$  отстоят друг от друга на частоту  $F_{\Pi}$ . В случае использования последовательности со взаимно ортогональными сигналами (рис. 2 б) пики разнесены на большую частоту  $F_{\Pi 1}$ . Увеличение интервалов следования пиков ФН вдоль частотной оси (рис. 2 б), обусловленное ортогональностью сигналов, предопределяет расширение интервала однозначного определения радиальной скорости [2]:

$$V_{\text{родн}} = \frac{\pm \lambda}{4} \cdot F_{\Pi 1} = \frac{\pm \lambda}{4 \cdot T_{\Pi 1}}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны ЗС.

При этом интервал однозначного определения дальности  $r_{\text{одн}}$  продолжает определяться периодом повторения  $T_{\text{п}}$  (рис. 2 а,б) [2]:

$$r_{\text{одн}} = cT_{\text{п}} / 2, \quad (4)$$

где  $c$  – скорость света.

Таким образом, в случае необходимости обеспечения в РЛС заданных интервалов  $r_{\text{одн}}$  и  $V_{\text{родн}}$  достаточно рассчитать необходимые период повторения  $T_{\text{п}} = \frac{2r_{\text{одн}}}{c}$ , интервал следования

$T_{\text{пл}} = \frac{\lambda}{4 \cdot V_{\text{родн}}}$  и определить число взаимно ортогональных сигналов:

$$N = \text{int}[T_{\text{п}} / T_{\text{пл}}], \quad (5)$$

где  $\text{int}[\dots]$  – операция выделения целой части.

Возможность расширения интервала однозначного определения радиальной скорости рассмотрим на примере аэродромного радиолокатора кругового обзора АОРЛ МТА-85 «Экран», обладающего следующими характеристиками:  $P_0 = 15 \cdot 10^3$  Вт – импульсная мощность;  $T_0 = 25$  мкс – длительность импульса;  $T_{\text{п}} = 1$  мс – период повторения;  $\lambda = 0,23$  м – длина волны;  $\Delta\beta \approx 1,5^\circ$  – ширина диаграммы направленности РЛС по азимуту на прием и на передачу;  $T_{\text{обз}} = 5$  с – период обзора по азимуту. В качестве ЗС в радиолокаторе используется сигнал с линейно-частотно модулированным ЗМ с девиацией частоты  $\Delta f_0 = 1$  МГц, что обеспечивает разрешающую способность по дальности:  $\Delta r = c / (2 \cdot \Delta f_0) = 150$  м. При обеспечении однозначной дальности:  $r_{\text{одн}} = 150$  км, интервал однозначного определения скорости неприемлемо мал:  $V_{\text{родн}} \approx \pm 57,5$  м/с, что делает практически невозможным однозначное измерение радиальной скорости. В рассматриваемой РЛС на этапе междупериодной обработки осуществляется когерентная компенсация мешающих отражений и некогерентное накопление полезного сигнала.

Пусть требуется обеспечить интервал однозначного определения радиальной скорости станции  $V_{\text{родн}} = 300$  м/с. Тогда с учетом (3) и (5):

$$T_{\text{п}} = \frac{0,23}{4 \cdot 300} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad N = \text{int}[10^{-3} / 1,9 \cdot 10^{-4}] = 5.$$

При увеличении частоты повторения в  $N$  раз происходит переход РЛС в квазинепрерывный режим работы. В этом случае возникает проблема «слепых» дальностей. Для ее устранения необходимо использовать вобуляцию периода повторения ЗС. При выборе числа сменных периодов повторения  $K = 2 \div 4$ , число когерентно накапливаемых импульсов  $L$  будет определяться соотношением  $L = \text{int}[L_{\text{н}} / K]$ , где  $L_{\text{н}} = \frac{\Delta\beta \cdot T_{\text{обз}}}{360^\circ \cdot T_{\text{пл}}} = \frac{1,5 \cdot 5}{360^\circ \cdot 1,9 \cdot 10^{-4}} \approx 109$  – число импульсов за время наблюдения отраженных от цели сигналов. Тогда  $L = 109 / (2 \div 4) \approx 54 \div 36$ .

Эффективность когерентного накопления определяется числом накапливаемых импульсов  $\nu_{\text{кн}} = L = 36 \div 54$ . Заметим, что, применительно к рассмотренному случаю, когерентное накопление с эффективностью порядка  $\nu_{\text{кн}} = 36 \div 54$  позволяет снизить импульсную мощность передатчика:  $P_0 = 15 \cdot 10^3 / 54 \div 36 \approx 280 \div 420$  Вт, при сохранении размеров зоны действия РЛС.

Очевидно, что предложенная структура составного ЗС на основе применения набора взаимно ортогональных ЗМ позволила расширить интервал однозначного определения радиальной скорости при фиксированном интервале однозначного определения дальности. Вместе с этим использование составного ЗС предполагает соответствующее изменение устройства его оптимальной обработки.

## Оптимальное устройство внутрипериодной обработки составного сигнала со взаимно ортогональными законами модуляции

Наличие в когерентной последовательности сигналов с различными ЗМ требует усложнения структуры оптимальной внутрипериодной обработки (ВПО): для каждого из взаимно ортогональных сигналов используется соответствующий согласованный фильтр.

Импульсная характеристика оптимального фильтра (ОФ) с точностью до вещественного множителя  $k$  определяется зеркальным отображением комплексно-сопряженного ЗМ ЗС [2]:

$$v_0(t) = kU^*(t_0 - t) \cdot e^{-j(\omega_0 + \Omega_{\text{дс}})(t_0 - t)}, \quad (6)$$

где  $\Omega_{\text{дс}}$  – доплеровское смещение частоты принятого сигнала относительно несущей частоты  $\omega_0$ ;  $t_0$  – время задержки сигнала в фильтре.

Фильтр оптимальной обработки составного ЗС предполагает совместное использование набора импульсных характеристик излучаемых сигналов:

$$v_n(t) = kU_n^*(t_0 - t) \cdot e^{j(\omega_0 + \Omega_{\text{дс}})t}, \quad n \in 1 \dots N. \quad (7)$$

Рассмотрим прохождение через такой фильтр отраженного сигнала (ОС), формируемого  $n$ -ым ЗМ:

$$m_n(t) = E_c U_n(t - t_r) \cdot e^{j[(\omega_0 + \Omega_{\text{дс}})(t - t_r) + \varphi_c]}, \quad (8)$$

где  $E_c$  – амплитуда ОС,  $\varphi_0$  – случайная фаза ОС.

На основании (7,8) на выходе ОФ формируется отклик вида [2]:

$$w_n(t) = kE_c T_0 e^{j\varphi_c} C_n(t - t_r - t_0) \cdot e^{j(\omega_0 + \Omega_{\text{дс}})(t - t_r + t_0)}, \quad (9)$$

где  $T_0$  – длительность одиночного радиоимпульса.

Выражение (9) не учитывает результаты несогласованной обработки ОС, формируемого  $n$ -ым ЗМ, в остальных фильтрах устройства ВПО. Вид огибающей сигнала на выходе ОФ, при выполнении условия (1), будет определяться формой корреляционной функции  $C_n(t)$   $n$ -го ЗМ.

Структура устройства обработки набора взаимно ортогональных сигналов, реализующая принцип расширения интервала однозначного определения радиальной скорости при заданном интервале однозначной дальности, представлена на рис. 3.

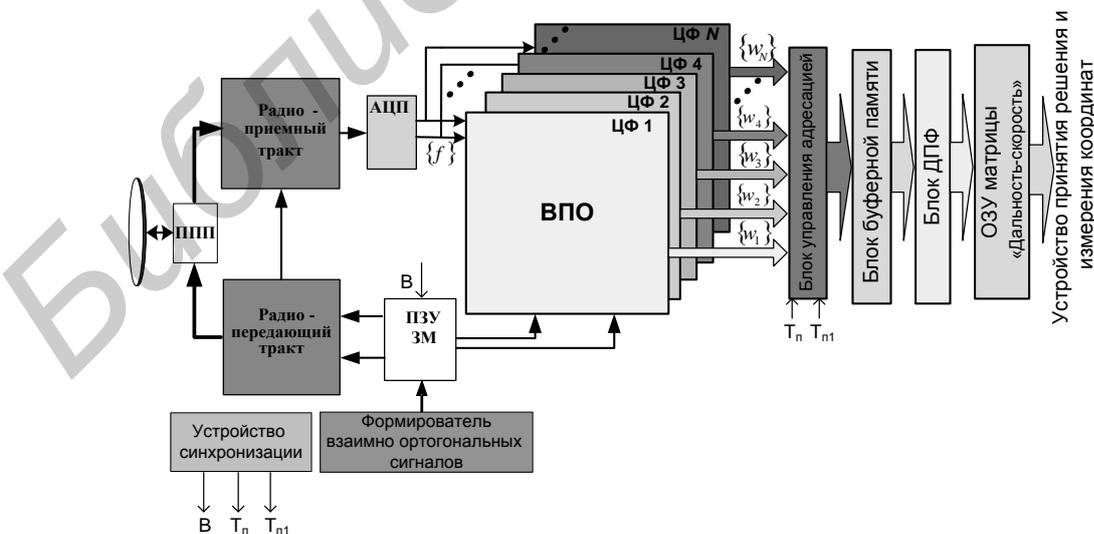


Рис. 3. Структура РЛС с однозначным определением дальности и радиальной скорости

Основными элементами данной структурной схемы являются: 1) аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 2) цифровые фильтры устройства ВПО; 3) блок управления адресации-

ей; 4) блок буферной памяти; 5) блок дискретного преобразования Фурье (ДПФ); б) оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) матрицы «дальность-скорость».

Отраженный сигнал, после прохождения через входные каскады приемного тракта, оцифровывается на АЦП и подается на входы цифровых фильтров устройства ВПО. Комплексные амплитуды отраженного сигнала, полученные как результаты откликов фильтров, с помощью блока управления адресацией в нужном порядке записываются в двумерный массив блока буферной памяти. Порядок размещения результатов обработки в двумерном буфере памяти представлен на рис. 4.

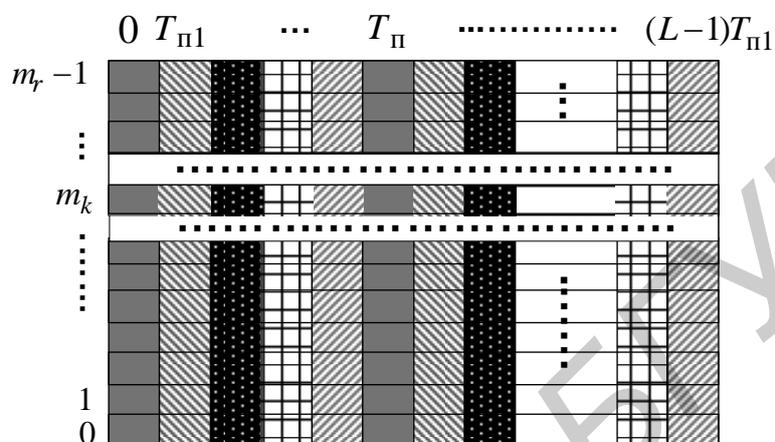


Рис. 4. Порядок размещения результатов согласованной обработки взаимно ортогональных сигналов в блоке буферной памяти

Число элементов разрешения РЛС по дальности определяет число строк  $m_r$  формируемого массива. Число столбцов массива  $L$  определяется числом когерентно накапливаемых комплексных отсчетов, фиксируемых через период  $T_{п1}$  в каждом элементе разрешения РЛС по дальности.

Обзор пространства радиолокационного наблюдения по частоте Доплера осуществляется путем применения алгоритма ДПФ (блок ДПФ) для каждой  $m_k$ -й строки буферной памяти. Результаты работы алгоритма ДПФ записываются в ОЗУ «дальность-скорость» размерностью  $m_r \times L$ , которое предназначено для хранения комплексных амплитуд когерентно накопленных сигналов в элементах разрешения РЛС по дальности. С выхода ОЗУ «дальность-скорость» выдается информация о радиальной скорости, обнаруженной в элементе дальности цели.

### Заключение

Применение составного ЗС в виде взаимно ортогональной последовательности из  $N$  сигналов с разными ЗМ позволяет при заданном интервале однозначного определения дальности расширить в  $N$  раз интервал однозначного определения радиальной скорости цели.

Свойство взаимной ортогональности сигналов в излучаемой последовательности позволило перевести станцию обзора в квазинепрерывный режим работы, сохранив неизменным интервал однозначного определения дальности до цели. Работа станции в квазинепрерывном режиме, в отличие от импульсного режима с теми же параметрами, позволяет осуществлять когерентное накопление сигналов с большей эффективностью, что повышает отношение сигнал/шум. Увеличение отношения сигнал/шум, в свою очередь, дает возможность снижения на эквивалентную величину импульсной мощности передатчика, при сохранении размеров зоны действия РЛС.

К недостаткам предложенного принципа расширения интервала однозначного определения радиальной скорости, при заданном интервале однозначной дальности, относится необходимость усложнения оптимальной обработки принятого сигнала. Однако требуемое кон-

структивное усложнение устройства обработки, на фоне упрощения передатчика, обусловленное снижением его требуемой импульсной мощности, является незначительным.

## **INTERVAL EXTENSION UNAMBIGUOUSLY THE RADIAL VELOCITY IN RADAR VISION FOR UNIQUE RANGE GIVEN INTERVAL**

S.Y SEDISHEV, M.N VORONCOV

### **Abstract**

A new principle of unique determination of the interval extension of the radial velocity at a given interval range based on the unique use as a sounding signal set of mutually orthogonal radio pulses is performed.

### **Список литературы**

1. *Варакин Л.Е.* Теория сложных сигналов. М., 1970.
2. *Охрименко А.Е.* Основы радиолокации и радиолокационная борьба. М., 1983.
3. Патент РФ № 2035050/ G 01 S 13/52, 1995.
4. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М., 2000.
5. *Алмазов В.В., Белов А.А., Кокин В.Н., и др.* Теоретические основы радиолокации. Харьков, 1996.
6. *Ширман Я.Д., Николаев А.И., Горшков С.А., и др.* Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., 2007.
7. *Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В.* Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб., 2005.