

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.5>

УДК: 621.396.1

ВЫБОР СПОСОБА И ГИПОТЕЗЫ ПАРАМЕТРОВ ВОБУЛЯЦИИ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА В МЕТОДИКЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ОДНОЗНАЧНОЙ ЧАСТОТЫ ДОПЛЕРА В КОГЕРЕНТНО- ИМПУЛЬСНЫХ РЛС ОБЗОРА

В.Н. Завиженец¹, С.А. Горшков², А.С. Солонар¹

¹ Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»
220057, Республика Беларусь, г. Минск, пр-т Независимости, д. 220

² Общество с ограниченной ответственностью «МилитСофт Солюшенс»
220901, Республика Беларусь, г. Минск, тр. Логойский, д.37, пом. 8а

Статья поступила в редакцию 25 мая 2023 г.

Аннотация. Анализируются гипотезы параметров закона вобуляции зондирующего сигнала, включающие в себя число подпачек, число импульсов в подпачке и период следования. Периоды повторения пересчитываются к тактовым интервалам с сохранением взаимных соотношений. Приводится проверка условия излучения пачки за время наблюдения. Выбирается гипотеза с оптимальными параметрами закона вобуляции. Рассчитывается время корреляции флуктуации отражённого сигнала и определяется способ оценивания радиальной скорости с оптимальным временем когерентного накопления. Предлагаются параметры сигнала для реализации модифицированного нониусного метода при требовании постоянства числа импульсов или в случае технических ограничений для других способов устранения неоднозначности. Наглядность методики поясняется примером формирования гипотез, расчёта периодов повторения и выбора варианта зондирующего сигнала для применения того или иного способа оценки радиальной скорости.

Ключевые слова: вобуляция периода повторения, неоднозначная частота Доплера, измерение радиальной скорости, выбор параметров зондирующего сигнала, время корреляции, когерентное накопление, тактовый интервал.

Автор для переписки: Завиженец Виталий Николаевич, za_vi@mail.ru

Введение

Разработка новых радиолокаторов и модернизация старых ведется в целях улучшения тактических и технических характеристик радиолокационных станций (РЛС). Трёхкоординатные РЛС обзора обычно измеряют азимут, дальность и угол места цели. Оценка радиальной скорости чаще всего не производится ввиду её неоднозначности. Развитие технологий на сегодняшний день позволяет реализовывать новые алгоритмы обработки сигналов, формировать разнообразные последовательности импульсов (подпачки), отличающиеся периодами следования, несущими частотами, законами модуляции, числом импульсов, объединённых одинаковыми параметрами и количеством таких подпачек.

Техническая реализация каждого метода ограничивается различными факторами, в том числе техническими и экономическими. Экономические показатели реализации в данной статье не рассматриваются. Формулируются требования к условиям наблюдения отраженного сигнала (ОС), параметрам зондирующего сигнала и к методам обработки принятого сигнала.

Данная работа завершает в цикле статей, посвящённых измерению радиальной скорости объекта в когерентно импульсных (КИ) РЛС обзора.

Предыдущие статьи [1, 2] посвящены сопоставительному анализу разработанных методов измерения радиальной скорости для КИ РЛС обзора и формированию гипотез параметров зондирующих сигналов (ЗС). В данных материалах обобщены достоинства и недостатки каждого способа измерения радиальной скорости в условиях неоднозначности. Сформированы структуры устройств для реализации того или иного способа. Выработан подход по

формированию ограничений в выборе числа подпачек, числа импульсов в каждой подпачке и периода их следования.

Цель статьи: сформировать критерии выбора оптимального способа измерения радиальной скорости из ранее предложенных [1] и закона вобуляции ЗС, а также реализовать подход к выбору оптимального метода оценки радиальной скорости при ограничениях на время наблюдения ОС T_H , время корреляции флуктуаций ОС τ_c , время когерентного накопления (КН) ОС T_{KH} .

Постановка задачи

На начальном этапе считается, что мероприятия, которым посвящалась предыдущая статья выполнены, а именно:

- 1) Сформулированы ограничения для параметров закона вобуляции ЗС;
- 2) Сформировано множество гипотез параметров закона вобуляции ЗС Λ_H исходя из заданных характеристик РЛС;
- 3) Определены критерии обеспечения однозначного измерения радиальной скорости в заданном интервале;
- 4) В отдельное множество $\tilde{\Lambda}_H$ отобраны гипотезы параметров закона вобуляции ЗС, удовлетворяющие заданным критериям и условиям применения. Дальнейшее рассмотрение задачи имеет смысл при условии, что $\tilde{\Lambda}_H$ не является «пустым множеством» ($\tilde{\Lambda}_H \neq \emptyset$).

Число импульсов в подпачке имеет либо постоянное значение для всех режимов работы (например, равно 8-ми для РЛС 19Ж6), либо одинаково в каждой подпачке и может изменяться на значение из заданного перечня (например, РЛС 35Д6). При модернизации таких РЛС могут быть предъявлены требования по обеспечению постоянства числа импульсов в каждой подпачке.

Поскольку спектральный анализ реализуется по результатам КН, то временной интервал накопления не должен превышать τ_c . Поэтому при выборе способа надо сопоставлять требуемое T_{KH} с τ_c .

Расчётные $T_{\pi i}$ в каждой i -й подпачке, полученные на предварительных этапах, должны обеспечивать заданную дальность обнаружения, удовлетворять условию равенства полосы фильтра (для способа когерентного и некогерентного объединения результатов накопления), а так же кратны тактовому интервалу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) $\delta t_{\text{АЦП}}$ для синхронности работы по одноимённым элементам дальности в каждом периоде повторения.

Из многообразия решений по реализации закона вобуляции с учётом $\delta t_{\text{АЦП}}$ и способов измерения однозначной радиальной скорости определяется такая совокупность, которая позволит получить наилучшую точность оценки.

На рис. 1 представлена структурная схема методики решения задачи оценки однозначной частоты Доплера в КИ РЛС обзора.

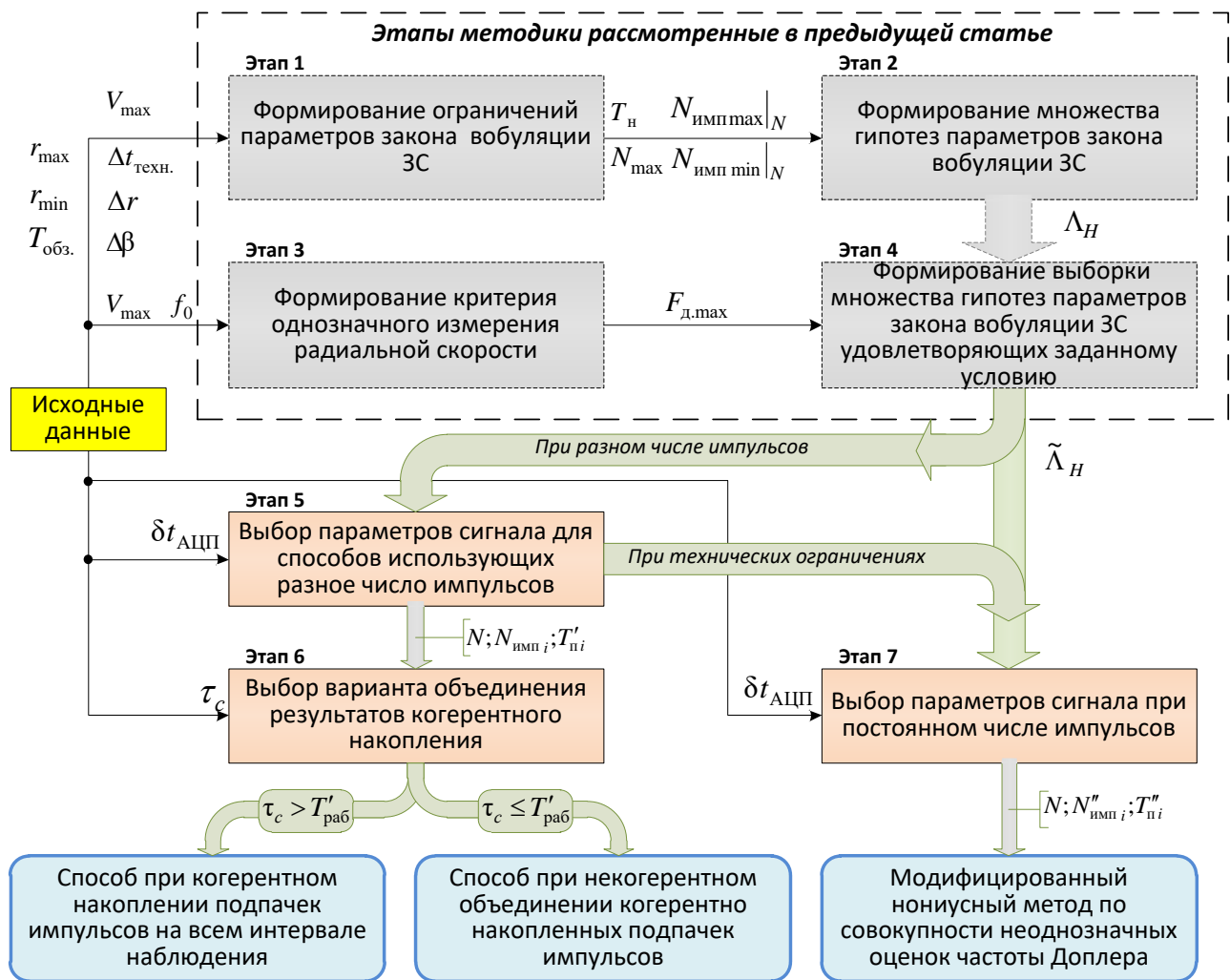


Рис. 1. Структурная схема методики решения задачи оценки однозначной частоты Доплера в КИ РЛС обзора

Решаемые задачи представим в виде этапов описываемой методики. Первые четыре этапа были рассмотрены в предыдущей статье.

В данной статье рассматриваются особенности пересчёта периодов повторения к тактовому интервалу АЦП для случая использования разного и одинакового числа импульсов в подпачках. Обоснован выбор одного из двух способов оценки радиальной скорости исходя из соотношения $T_{\text{кп}}$ и τ_c .

Если предусматривается возможность формирования подпачек с разным числом импульсов – выполнение переходит к 5-му этапу методики. В противном случае, стоит жёсткое требование формирования подпачек с одинаковым числом импульсов и осуществляется переход сразу к 7-му этапу.

Этап 5. Выбор параметров сигнала для способов использующих разное число импульсов

Подэтап 5.1 Проверка соотношения единого интервала дискретизации и тактового интервала АЦП

В работах [2, 3] приводилась связь максимального однозначного диапазона ($F_{\text{д_макс_одн}}$) и единого интервала дискретизации (Δt_e) с числом импульсов $N_{\text{имп}}$ через наименьшее общее кратное (НОК):

$$2F_{\text{д_одн_макс}}(N, h) = \frac{1}{\Delta t_e(N, h)} = \frac{\text{НОК}(N_{\text{имп}}(N, h))}{N_{\text{имп}} T_{\text{п1}}}, \quad (1)$$

где $\Delta t_e(N, h)$ – единый интервал дискретизации, обратно пропорциональный НОК, рассчитанный для h -ой комбинации чисел импульсов при использовании N подпачек в соответствии с выражением [3, (10)];

$\text{НОК}(N_{\text{имп}}(N, h))$ – НОК для комбинации чисел импульсов $N_{\text{имп}}(N, h)$.

В соответствии с (1) в [2] на этапе 4 был вычислен единый интервал дискретизации для каждой гипотезы Δt_e . Здесь и далее для пояснения общего смысла единого интервала дискретизации применяется обозначение Δt_e , а при рассмотрении частных реализаций – $\Delta t_e(N, h)$. Суть данной величины

заключается в том, что все периоды повторения кратны данному интервалу, что пояснено на рис. 2.

Хронология работы сложных радиоэлектронных устройств, таких как РЛС, определяется синхронизатором, который вырабатывает тактовые импульсы высокостабильного высокочастотного генератора. Из них в результате делений и/или умножений формируются последовательности импульсов с тактовыми интервалами следования обеспечивающих работу всех устройств входящих в состав изделия, в том числе и АЦП $\delta t_{\text{АЦП}}$.

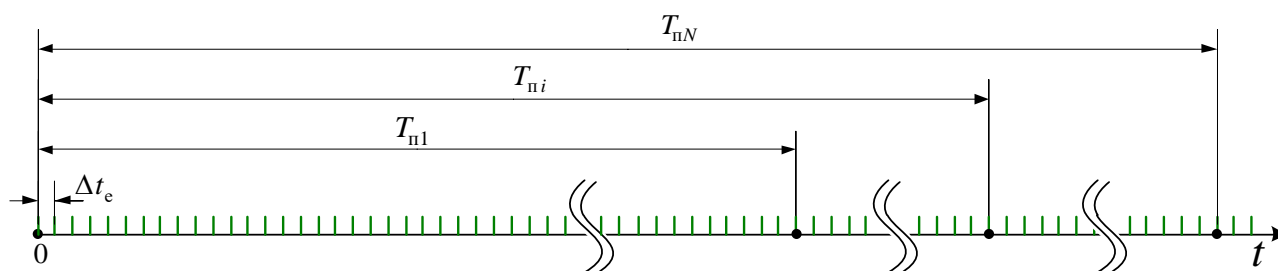


Рис. 2. Пояснение кратности периодов повторения единому интервалу дискретизации

На рис. 3 интервалы $\delta t_{\text{АЦП}}$ показаны как расстояние между двумя соседними синими штрихами *под осью* времени, а интервалы Δt_c зелеными штрихами *над этой* осью.

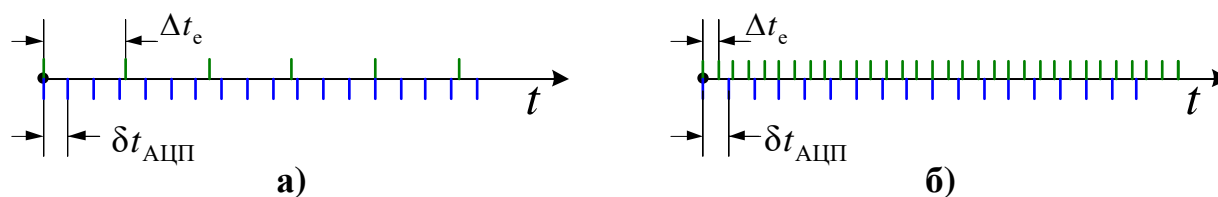


Рис. 3. Варианты соотношения единого интервала дискретизации к тактовому интервалу АЦП

Минимальная частота дискретизации АЦП на видеочастоте определяется теоремой Котельникова-Шеннона шириной спектра зондирующего сигнала $f_{\text{д,мин}} = 1/\delta t_{\text{АЦП}} = 2f_{\text{в}} = \Delta f_0$, где $f_{\text{в}}$ – верхняя граничная частота цифруемого сигнала. Но в интересах повышения точности измерений, реальной разрешающей способности, снижения энергетических потерь и т.д. частоту дискретизации повышают, соблюдая баланс между вычислительными затратами

и приростом эффективности. Отношение Δ между реальной и минимально допустимой частотами оцифровки на видеочастоте $\Delta = f_{\text{АЦП}} / f_{\text{АЦП}_{\min}} = \delta t_{\text{АЦП}_{\min}} / \delta t_{\text{АЦП}}$ рассмотрено, например, в [4]. Для работоспособности приемопередающего устройства и применимости рассматриваемых способов измерения радиальной скорости все временные интервалы, входящие в период повторения должны быть одновременно кратны единому интервалу дискретизации Δt_e [2, (1)] и такту оцифровки ОС $\delta t_{\text{АЦП}}$.

Начальные варианты соотношения между Δt_e и $\delta t_{\text{АЦП}}$ определим следующим условием:

$$\Delta t_e \geq \delta t_{\text{АЦП}}. \quad (2)$$

В случае выполнения условия (2) (вариант представлен на рис. 3а), есть возможность сформировать такты с интервалом не менее Δt_e путём прореживания (деления частоты) $\delta t_{\text{АЦП}}$.

При условии, когда Δt_e менее $\delta t_{\text{АЦП}}$ (см. рис. 3б), будем считать что формирование ЗС с разным числом импульсов технически невозможно. Если в результате проверки всех гипотез множества $\tilde{\Lambda}_H$ условие (2) не удовлетворено ни для одного варианта, значит применение подпачек с разным числом импульсов имеет технические ограничения и осуществляется переход к этапу 7 для выбора параметров сигнала с постоянным числом импульсов.

Подэтап 5.2 Пересчёт периодов повторения

Для гипотез удовлетворивших условию (2) выполняется пересчёт Δt_e к новому временному интервалу $\Delta t'_e$ кратному целому числу интервалов $\delta t_{\text{АЦП}}$ в соответствии с выражением

$$\Delta t'_e = \delta t_{\text{АЦП}} \cdot \text{ceil}(\Delta t_e / \delta t_{\text{АЦП}}) = \delta t_{\text{АЦП}} \cdot n_{\delta t}, \quad (3)$$

где $n_{\delta t} = \text{ceil}(\Delta t_e / \delta t_{\text{АЦП}})$ - коэффициент прореживания тактовых интервалов АЦП, представляющий собой наименьшее целое, большее или равное отношению в скобках.

Следовательно, новое значение периода повторения $T'_{\pi i}$ будет равно

$$T'_{\pi i} = \frac{T_{\pi i}}{\Delta t_e} \cdot n_{\delta t} \cdot \delta t_{\text{АЦП}} = L_i \Delta t'_e, \quad (4)$$

где $L_i = T_{\pi i} / \Delta t_e$ – кратность исходного единого интервала дискретизации Δt_e начальному значению периода повторения $T_{\pi i}$ [3] (выражение (9)).

На рис. 4 поясняется принцип пересчёта на примере периода повторения $T_{\pi i}$ к $T'_{\pi i}$.

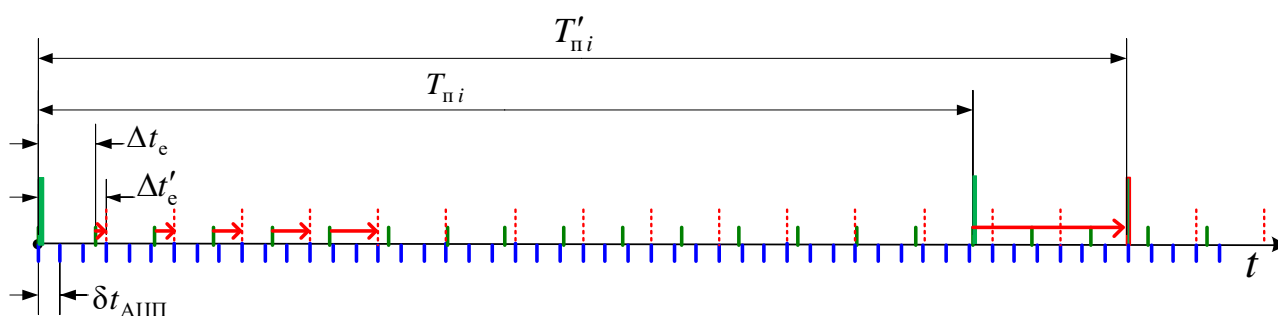


Рис. 4. Пояснение пересчёта периода повторения $T_{\pi i}$ к $T'_{\pi i}$ при использовании разного числа импульсов

В результате такого пересчёта $T_{\pi i}$ увеличится на $\Delta T_{\pi i}$:

$$\Delta T_{\pi i} = T'_{\pi i} - T_{\pi i} = L_i n_{\delta t} \delta t_{\text{АЦП}} - L_i \Delta t_e = L_i (\Delta t'_e - \Delta t_e). \quad (5)$$

Это приведёт к тому, что время излучения всей пачки вырастет на:

$$T'_{\text{раб}} - T_{\text{раб}} = \sum_{i=1}^N (N_{\text{имп } i} (N, h) L_i (\Delta t'_e - \Delta t_e)). \quad (6)$$

Из выражений (5) и (6) также следует, что уменьшение $\delta t_{\text{АЦП}}$ (т.е. увеличение частоты АЦП) позволит уменьшить рассмотренное отличие, как отдельного периода повторения, так и времени излучения всей пачки сигналов. Для каждой гипотезы множества $\tilde{\Lambda}_H$ значение превышения времени носит индивидуальный характер.

Подэтап 5.3 Проверка условия излучения всей пачки за время наблюдения

С целью исключения случая превышения времени излучения пачки импульсов с учётом пересчёта над временем наблюдения, выполняется проверка следующего неравенства:

$$T'_{\text{раб}} \leq T_{\text{н}} \quad (7)$$

где $T'_{\text{раб}} = \sum_{i=1}^N (N_{\text{имп } i}(N, h) T'_{\text{п } i})$ – время излучения пачки сигналов с учётом пересчёта периодов повторения.

Все гипотезы, для которых условие (7) верно, формируют собой множество потенциальных вариантов параметров закона возбуждения ЗС.

Если ни одна из гипотез не удовлетворила условию (7), значит техническая реализация способа с когерентным и некогерентным объединением результатов накопления невозможна. Осуществляется переход к этапу 7.

Подэтап 5.4 Выбор сигнала

Из всей совокупности сигналов удовлетворивших условие (7) выбираем гипотезу с наибольшим суммарным числом импульсов.

$$N_{\text{имп } \Sigma} = \sum_{i=1}^N N_{\text{имп } i}(N, h). \quad (8)$$

В случае если у двух и более гипотез суммарное число импульсов одинаково - отдаём предпочтение гипотезе с наибольшим однозначным диапазоном.

Пример: Для проверки гипотез множества $\tilde{\Lambda}_{\text{н}}$ выполнены промежуточные вычисления, результаты которых сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Результат пересчёта периодов повторения к тактовому интервалу АЦП

Число подпачек N	Гипотеза числа импульсов $N_{\text{ИМП}}(N, h)$	Суммарное число импульсов $N_{\text{ИМП } \Sigma}$	Единый интервал дискретизации Δt_e , мкс	Пересчитанный единый интервал дискретизации $\Delta t'_e$, мкс	Коэффициент прореживания $n_{\delta t}$	Выполнение условия $T'_{\text{раб}} \leq T_n$
2	$\tilde{\Lambda}_H(2) = \emptyset$	-	-		-	-
3	$N_{\text{ИМП}}(3,1) = [22; 21; 20]$	63	5.476	5.6	14	
	$N_{\text{ИМП}}(3,2) = [22; 21; 19]$	62	2.882	3.2	8	
	$N_{\text{ИМП}}(3,3) = [22; 21; 18]$	61	18.254	18.4	46	
	$N_{\text{ИМП}}(3,4) = [22; 21; 17]$	60	3.221	3.6	9	
	$N_{\text{ИМП}}(3,5) = [22; 21; 16]$	59	6.845	7.2	18	
	$N_{\text{ИМП}}(3,6) = [22; 21; 15]$	58	10.952	11.2	28	
	$N_{\text{ИМП}}(3,7) = [22; 20; 19]$	61	6.053	6.4	16	
	$N_{\text{ИМП}}(3,8) = [22; 20; 18]$	60	12.778	12.8	32	да
	$N_{\text{ИМП}}(3,9) = [22; 20; 17]$	59	6.765	6.8	17	
	$N_{\text{ИМП}}(3,10) = [22; 19; 18]$	59	6.725	6.8	17	
	$N_{\text{ИМП}}(3,11) = [22; 19; 17]$	58	3.56	3.6	9	
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	$N_{\text{ИМП}}(3,19) = [21; 20; 19]$	60	3.026	3.2	8	
	$N_{\text{ИМП}}(3,20) = [21; 20; 18]$	59	19.167	19.2	48	да
	$N_{\text{ИМП}}(3,21) = [21; 20; 17]$	58	3.382	3.6	9	
	$N_{\text{ИМП}}(3,22) = [21; 20; 16]$	57	14.375	14.4	36	да
	$N_{\text{ИМП}}(3,23) = [21; 19; 18]$	58	10.088	10.4	26	да
	$N_{\text{ИМП}}(3,24) = [21; 19; 17]$	57	3.56	3.6	9	да
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	$N_{\text{ИМП}}(3,31) = [20; 19; 18]$	57	6.725	6.8	17	да
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
4	$N_{\text{ИМП}}(4,1) = [16; 15; 14; 13]$	58	0.8425	1.2	2.106	
	$N_{\text{ИМП}}(4,2) = [16; 15; 14; 12]$	57	10.95	11.2	27.381	да
	$N_{\text{ИМП}}(4,3) = [16; 15; 13; 12]$	56	5.897	6.0	14.744	да
	$N_{\text{ИМП}}(4,4) = [16; 14; 13; 12]$	55	4.212	4.4	10.531	
	$N_{\text{ИМП}}(4,5) = [15; 14; 13; 12]$	54	3.159	3.2	7.898	да
5	$N_{\text{ИМП}}(5,1) = [13; 12; 11; 10; 9]$	55	0.5808	0.8	1.452	

Для трёх подпачек приведены расчётные данные для гипотез, у которых суммарное число импульсов не менее 57. В крайней правой колонке таблицы

приведён результат проверки условия (7). Для удобства отмечены лишь гипотезы, для которых выполняется данное условие.

Из всех вариантов гипотез, удовлетворивших условие однозначности измерения и условие не превышения времени наблюдения, в качестве итогового результата выбираем вариант, обладающий наибольшим суммарным числом импульсов. Для приведённого примера это гипотеза возбуждения тремя подпачками импульсов, в которых 22, 20 и 18 импульсов соответственно. Единый интервал дискретизации равен $\Delta t_c = 12.78$ мкс, а после пересчёта $\Delta t'_c = 12.8$ мкс. Период повторения: 1.1520 мс, 1.2672 мс, 1.4080 мс соответственно. Время излучения всей пачки составит $T'_{\text{раб}} = 76.032$ мс.

Этап 6. Выбор варианта объединения результатов когерентного накопления

Для выбора варианта объединения результатов КН необходимо априорно оценить время корреляции флуктуаций ОС.

Подэтап 6.1 Априорная оценка времени корреляции флуктуаций отражённого сигнала

Достаточно грубая, по сравнению, например, с [5], но дающая удовлетворительные результаты для анализируемой задачи, пространственно-временная модель времени корреляции ОС может быть аппроксимирована следующим выражением [6]

$$\tau_c = \delta\theta_{\text{ц}} / \Omega_{\text{ц}}, \quad (9)$$

где $\delta\theta_{\text{ц}}$ – ширина лепестка диаграммы обратного вторичного излучения в рад.;
 $\Omega_{\text{ц}} = d\theta/dt$, рад/с – скорость вращения цели относительно картинной плоскости;
 θ – угол между линией визирования цели и вектором ее скорости.

Вектор регулярной составляющей скорости вращения цели относительно картинной плоскости (математическое ожидание) представим в виде суммы двух составляющих. Первая $\Omega_{\text{ц1}}$ за счет влияния поступательного движения с полной скоростью V зависит от наклонной дальности до цели $r_{\text{ц}}$

$$\Omega_{ц1} = V \sin \theta / r_{ц} . \quad (10)$$

Вторая составляющая $\Omega_{ц2}$ возникает при плоском развороте цели по радиусу $R = V^2 / g \sqrt{n^2 - 1}$ [7] с заданной нормальной перегрузкой n (g – ускорение свободного падения)

$$\Omega_{ц2} = \frac{g \sqrt{n^2 - 1}}{V} \cos \theta . \quad (11)$$

Случайную составляющую скорости вращения цели обычно аппроксимируют гауссовской плотностью вероятности. Ее среднеквадратическое отклонение σ_{Ω} определяется состоянием атмосферы, скоростью полета, массой самолета, характеристиками планера и системы управления, видимым размером в картинной плоскости и т.д. Для самолета с одним или двумя двигателями, расположенными в фюзеляже, например, эта величина может равняться от 0.2 до 2 градусов в секунду [6].

Полагая, что регулярные составляющие вращения совпадают по знакам, а также добавляя к ним $3\sigma_{\Omega}$ случайной составляющей (рис. 5), получим максимальную скорость вращения

$$\Omega_{ц \max} = |\Omega_{ц1}| + |\Omega_{ц2}| + 3\sigma_{\Omega} . \quad (12)$$

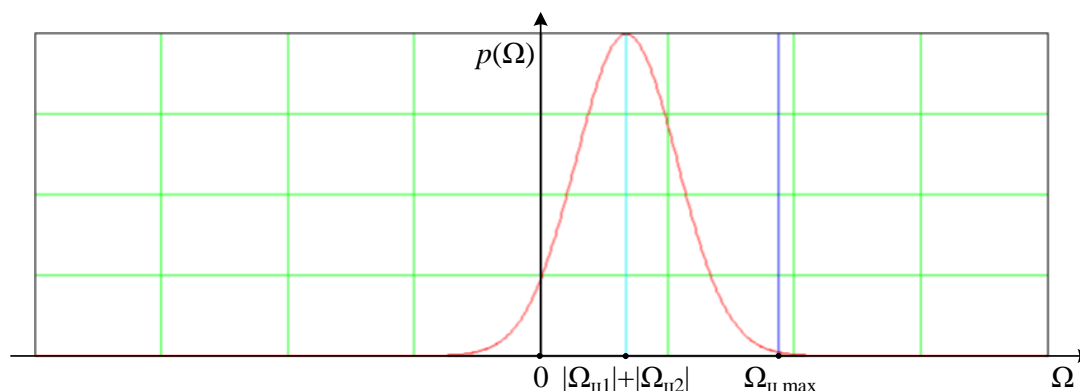


Рис. 5. К определению максимальной скорости вращения цели

Числитель $\delta\theta_{ц}$ выражения (9) определяется отношением длины волны λ к проекции размера цели на картинную плоскость $l_{ц, \text{вид.}}$ и коэффициенту формы цели $K_{ц} = 0.3 \dots 0.7$, зависящем от ее конфигурации. Коэффициент 0.886 [8] взят

для равномерного распределения поля на апертуре. С учетом всего вышесказанного, τ_c можно определить как

$$\tau_c = \frac{\delta\theta_{ц}}{\Omega_{ц\max}} = \frac{0.886 \cdot \lambda}{l_{ц,\text{вид.}} \Omega_{ц\max} K_{ц}}. \quad (13)$$

где $l_{ц,\text{вид.}}$ – проекция видимого размера цели на картинную плоскость.

Пример: Оценка времени корреляции флуктуаций отражённого сигнала для исходных данных: дальность до цели $r_{ц} = 100$ км; скорость цели $V = 300$ м/с; угол курса $\theta = 80$ град.; длина планера цели $l_{пл} = 15$ м; коэффициент формы цели $K_{ц} = 0.6$; нормальная перегрузка $n = 3$; СКО случайной составляющей $\sigma_{\Omega} = 1$ град/с. В результате расчёта время корреляции ОС составит $\tau_c = 140$ мс.

Подэтап 6.2 Выбор способа на основании интервала когерентного накопления

Для КН на всём интервале наблюдения необходимо чтобы время корреляции превышало время наблюдения пачки ОС. Учитывая пересчёт периодов повторения к тактам $\delta t_{АЦП}$, условие зададим следующим:

$$\tau_c > T'_{\text{раб}}. \quad (14)$$

Выполнение условия (14) говорит о том, что время корреляции отражённого от цели сигнала превышает время наблюдения сигнала, а также синхронизатор РЛС обеспечивает формирование ЗС с заданными параметрами. В этом случае для оценки радиальной скорости **применим метод, реализующий КН на всём интервале наблюдения (способ с когерентным суммированием спектральных отсчётов)**. Рассчитанные значения параметров ЗС выдаются потребителю.

Невыполнение условия (14) констатирует превышение времени корреляции отражённого от цели сигнала над временем КН подпачки, а также обеспечение синхронизатором РЛС формирования ЗС с заданными параметрами. В данном случае для оценки радиальной скорости определяется **применимость метода, реализующего некогерентное суммирование отсчётов**

размноженных спектров. Рассчитанные значения параметров ЗС выдаются потребителю.

Пример: Для приведённых ранее расчётов условие (14) выполняется ($\tau_c = 140 \text{ мс} > T'_{\text{раб}} = 76.032 \text{ мс}$). Поэтому применим способ измерения радиальной скорости цели, использующий КН на всём интервале наблюдения.

Этап 6 является конечным при выполнении (14). Полученный результат выдаётся как решение. Если же (14) не выполняется и нельзя использовать метод с некогерентным суммированием отсчётов размноженных спектров, или же есть иные причины, описанные далее, то переходят к этапу 7.

Этап 7. Выбор параметров сигнала при постоянном числе импульсов

В случае модернизации существующих радиолокаторов возможны ограничения по глубине переработки. Не исключен тот случай, когда требуется чтобы число импульсов в каждой подпачке, а соответственно и число фильтров КН было одинаковым (постоянным). Применение подпачки с числом импульсов 2^k , где k -натуральное число, позволит применить алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), что повысит быстродействие расчётов.

Переход к данному этапу обусловлен одной из следующих причин:

- число импульсов должно быть постоянным ($N_{\text{имп } i} = \text{const}$);
- не обеспечивается равенство времени КН каждой подпачки;
- в результате пересчёта периодов повторения к тактовому интервалу АЦП время излучения пачки ЗС превышает время наблюдения (не выполняется условие (7)) для всех гипотез из имеющегося множества $\tilde{\Lambda}_H$.

Подэтап 7.1 Пересчёт периодов повторения к сетке АЦП

Пересчитываются периоды повторения с учётом тактового интервала АЦП для выбранной гипотезы:

$$T''_{\pi i} = \text{ceil} \left(\frac{T_{\pi i}}{\delta t_{\text{АЦП}}} \right) \delta t_{\text{АЦП}}, \quad (15)$$

где $\text{ceil}(x)$ – возвращает наименьшее целое большее или равное x .

Округление до большего целого гарантирует значение периода повторения не менее $T_{\pi \min}$ (см. рис. 6).

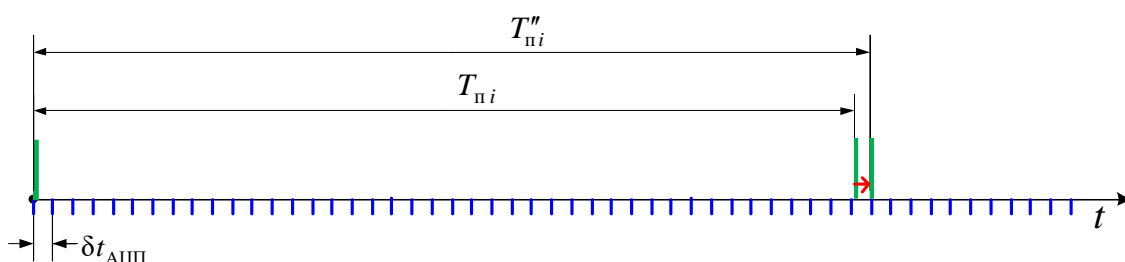


Рис. 6. Пояснение пересчёта периода повторения $T_{\pi i}$ к $T_{\pi i}''$ при использовании одинакового числа импульсов в подпачках

В результате пересчёта (15) $T_{\pi i}''$ может превышать $T_{\pi i}$ не более чем на тактовый интервал АЦП (см. рис. 6), в отличие от $T_{\pi i}'$ (4).

Подэтап 7.2 Пересчёт числа импульсов исходя из периодов повторения

Модифицированный нониусный метод не имеет жёстких требований к временным параметрам периодов повторения и числу импульсов. Число импульсов в каждой подпачке может быть как равным, так и различным.

Подход с одинаковым для каждой последовательности числом импульсов упростит адаптацию существующей реализации РЛС при модернизации. В этом случае первоначально определяются периоды в соответствии с (15). Число импульсов определяется тогда как:

$$N_{\text{имп}}'' = [T_{\text{н}} / \sum_{i=1}^N T_{\pi i}''], \quad (16)$$

где $[x]$ – наименьшее целое от x .

Время излучения всей пачки импульсов $T_{\text{раб}}'' = N_{\text{имп}}'' \sum_{i=1}^N T_{\pi i}''$ не будет превышать время наблюдения, поскольку расчёт в (16) отталкивается от $T_{\text{н}}$. Исключение дробной части минимизирует используемый временной интервал.

Пример: Для проверки гипотез множества $\tilde{\Lambda}_{\text{н}}$ выполнены промежуточные вычисления, результаты которых сведены в таблицу 2. Во

второй и третий столбец внесены данные полученные на этапе формирования гипотез. В последующих колонках приведены число импульсов в каждой из подпачек и суммарное число импульсов в пачке с учётом пересчёта (16), а также процент использования времени наблюдения. Для трёх подпачек приведены расчётные данные только для гипотез с суммарным числом импульсов не менее 58.

Таблица 2. Результат пересчёта периодов повторения к тактовому интервалу АЦП при равном числе импульсов

Число подпачек N	Гипотеза числа импульсов $N_{имп}(N, h)$	Суммарное число импульсов $N_{имп \Sigma}$	Число импульсов в подпачках $N''_{имп}$	Суммарное число импульсов $N''_{имп \Sigma}$	Соотношение времени $\frac{T''_{раб}}{T_H} 100\%$	
2	$\tilde{\Lambda}_H(2) = \emptyset$	-		-	-	
3	$N_{имп}(3,1) = [22; 21; 20]$	63	21	63	99.74	
	$N_{имп}(3,2) = [22; 21; 19]$	62	20	60	96.73	
	$N_{имп}(3,3) = [22; 21; 18]$	61	20	60	98.67	
	$N_{имп}(3,4) = [22; 21; 17]$	60	19	57	95.8	
	$N_{имп}(3,5) = [22; 21; 16]$	59	19	57	98.13	
	$N_{имп}(3,6) = [22; 21; 15]$	58	18	54	95.45	
	$N_{имп}(3,7) = [22; 20; 19]$	61	20	60	98.32	
	$N_{имп}(3,8) = [22; 20; 18]$	60	19	57	95.24	
	$N_{имп}(3,9) = [22; 20; 17]$	59	19	57	97.31	
	$N_{имп}(3,10) = [22; 19; 18]$	59	19	57	96.9	
	$N_{имп}(3,11) = [22; 19; 17]$	58	19	57	98.96	
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
	$N_{имп}(3,19) = [21; 20; 19]$	60	21	63	95.96	
	$N_{имп}(3,20) = [21; 20; 18]$	59	20	60	98.44	
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	
4	$N_{имп}(4,1) = [16; 15; 14; 13]$	58	14	56	93.8	
	$N_{имп}(4,2) = [16; 15; 14; 12]$	57	14	56	95.97	
	$N_{имп}(4,3) = [16; 15; 13; 12]$	56	14	56	97.83	
	$N_{имп}(4,4) = [16; 14; 13; 12]$	55	14	56	99.44	
	$N_{имп}(4,5) = [15; 14; 13; 12]$	54	14	56	94.55	
5	$N_{имп}(5,1) = [13; 12; 11; 10; 9]$	55	11	55	99.75	

По данным таблицы 2 можно сделать вывод, что полученные параметры закона вобуляции ЗС позволяют максимально (более 93%) использовать время

наблюдения. Это в свою очередь обеспечивает наибольшую энергетику принятых сигналов. Для гипотез $N_{\text{имп}}(4,4)$ и $N_{\text{имп}}(4,5)$ суммарное число импульсов при фиксированном $N_{\text{имп}}''$ на единицу превосходит $N_{\text{имп}\Sigma}$, рассчитанное в соответствии с (8) на этапе формирования гипотез.

Подэтап 7.3 Выбор гипотезы параметров закона вобуляции ЗС

В качестве результирующей комбинации из множества $\tilde{\Lambda}_H$ выбирается гипотеза, обладающая наибольшим суммарным числом импульсов ($N_{\text{имп}\Sigma}'' = N \cdot N_{\text{имп}}''$), а при наличии нескольких гипотез с равным числом импульсов, выбор склоняется к гипотезе обеспечивающей наибольший однозначный диапазон частоты Доплера $F_{\text{д одн макс}}$. Данный подход обусловлен наилучшими показателями качества восстановления [3].

В итоге формируется решение о применимости модифицированного нониусного метода, поскольку выполняются следующие условия:

- 1) время корреляции превышает время КН каждой из подпачек;
- 2) нет возможности обеспечить вариацию числа импульсов в каждой из подпачек или нет возможности обеспечить требуемые значения периодов повторения.

Рассчитанные значения параметров закона вобуляции ЗС выдаются потребителю.

Пример: Для приведённых в табл. 2 расчётов условие наибольшего суммарного числа импульсов выполняется для гипотезы излучения трёх подпачек по 21 импульсу со следующими периодами повторения: 1.1500 мс, 1.2048 мс, 1.26520 мс. Время излучения всей пачки составит $T_{\text{раб}}'' = 76.02$ мс, что составляет 99.74% от $T_H = 76.22$ мс.

Заключение

Статья является завершающей в серии работ, посвящённых методике измерения радиальной скорости при неоднозначной частоте Доплера.

В результате выработан подход к выбору одного из предлагаемых законов вобуляции ЗС учитывающий:

- требуемый интервал однозначного измерения радиальной скорости;
- применимость математического аппарата, заложенного в способе однозначной оценки радиальной скорости;
- ограничение времени наблюдения ОС, связанное как с характеристиками наблюдаемых объектов, так и с тактико-техническими характеристиками РЛС;
- возможности технической реализации расчётных значений периода повторения с учётом тактовых интервалов работы АЦП.

В статье приведён расчёт оценки времени корреляции флуктуации ОС, результат которого определяет выбор одного из двух предложенных способов устранения неоднозначности использующих подпачки с разным числом импульсов – с КН всей пачки [3] либо подпачки [9] импульсов.

В [2] и настоящей статье изложен пример расчёта, что придаёт наглядность методике. Определены параметры закона вобуляции ЗС для заданных условий использования способа однозначной оценки частоты Доплера в радиолокаторах обзора на основе КН ОС с разными периодами повторения [3] ($N=3$; $N_{\text{имп } i}=[22, 20, 18]$; $T'_{\text{п } i}=[1.1520, 1.2672, 1.4080]$ мс) и для модифицированного нониусного метода [10] ($N=3$; $N''_{\text{имп}}=21$; $T''_{\text{п } i}=[1.1500, 1.2048, 1.26520]$ мс).

Литература

1. Завиженец В.Н., Горшков С.А. Сравнительный анализ разработанных методов измерения радиальной скорости для когерентно-импульсных РЛС обзора. *Наука и военная безопасность*. 2022. №4. С.40-44.
2. Завиженец В.Н., Горшков С.А., Солонар А.С. Формирование гипотез параметров вобуляции зондирующего сигнала в методике решения задачи оценки однозначной частоты Доплера в когерентно-импульсных РЛС обзора. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.10>
3. Завиженец В.Н., Горшков С.А. Способ однозначной оценки частоты Доплера в радиолокаторах обзора на основе когерентного накопления отраженных сигналов с разными периодами повторения. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2019. №1. С.29-40.
4. Горшков С.А., Аль-Желили Б. Анализ характеристик цифровых адаптивных устройств принятия решения. *Прикладная радиоэлектроника*. 2004. Т.5. №3. С.405-407.
5. Костромицкий С.М., Давыденко И.Н. Связь времени и уровня взаимной корреляции сигналов сложной цели с величиной разноса анализаторов. *Научно-практический журнал. Базис*. 2019. №1. С.9-13.
6. Горшков С.А., Латушкин В.В., Седышев С.Ю. *Основы радиолокации. Конспект лекций, Часть 1*, Минск. ВАРБ. 2003. 126 с.
7. Кузьмин С.З. *Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации*. Москва, Советское радио. 1974. 432 с.
8. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк. 1970, Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.И. Трофимова. Т.2. Радиолокационные антенные устройства. Под ред П.И. Дудника. Москва, Советское радио, 1977. 408 с.

9. Горшков С.А., Завиженец В.Н. Оценивание однозначной частоты Доплера принятого сигнала путём размножения спектра в импульсно-доплеровских РЛС обзора. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2006. №3. С.48-52.
10. Завиженец В.Н. Модифицированный нониусный метод для автоматического восстановления частоты Доплера в условиях неоднозначности. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2006. №2. С.57-61.

Для цитирования:

Завиженец В.Н., Горшков С.А., Солонар А.С. Выбор способа и гипотезы параметров возбуждения зондирующего сигнала в методике решения задачи оценки однозначной частоты Доплера в когерентно-импульсных РЛС обзора. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.5>