



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.5.10>

УДК: 621.396.1

ФОРМИРОВАНИЕ ГИПОТЕЗ 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 ООО "МилитСофт Солюшенс"

220901, Республика Беларусь, г. Минск, тр. Логойский, д.37, пом. 8а

Статья поступила в редакцию 22 марта 2023 г.

Аннотация. Для когерентно-импульсных радиолокационных станций (КИ РЛС) обзора рассмотрен подход выбора числа подпачек импульсов с вобуляцией периода повторения, а также значений периода повторения и числа импульсов для каждой подпачки. Определены ограничения, влияющие на область поиска комбинаций.

Ключевые слова: вобуляция периода повторения, неоднозначная частота Доплера, измерение радиальной скорости, выбор параметров зондирующего сигнала.

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

Введение

В РЛС обнаружения большой дальности и радиовысотомерах используется импульсный зондирующий сигнал (ЗС) с однозначным периодом повторения для измерения радиальной дальности. Но при этом неоднозначно измеряется частота Доплера скоростных целей. Вместе с тем, для низкой частоты повторения при когерентной компенсации мешающих отражений возникают «слепые скорости», для борьбы с которыми часто используют вобуляцию (изменение во времени) периода повторения ЗС. Реже изменяют несущую частоту, закон модуляции ЗС или используют другие методы. Понятия оценка однозначной частоты Доплера и оценка радиальной скорости (V_r) считаются синонимами.

В большинстве известных источников [1, 2, 3, 4] рассмотрены подходы к выбору параметров вобуляции ЗС для борьбы со «слепыми скоростями» без оценки V_r . В ряде источников приводятся методы оценки радиальной скорости без пояснения способа выбора параметров вобуляции [5, 6, 7]. Практически во всех статьях авторы ограничиваются вобуляцией одной пары периодов повторения ЗС с их поочерёдной сменой.

Данная статья вторая в цикле, посвящённом решению задачи измерения радиальной скорости объекта в КИ РЛС обзора. Первая статья была посвящена сопоставительному анализу разработанных методов (способов) измерения радиальной скорости для КИ РЛС обзора [8]. В ней рассмотрены достоинства и недостатки следующих методов: модифицированного нониусного [9], размножения спектра [10], на основе когерентного накопления отраженных сигналов с разными периодами повторения [11].

Прежде чем использовать один из предложенных методов, необходимо определить число подпачек N , число импульсов в каждой подпачке $N_{\text{имп } i}$ и период повторения импульсов в каждой подпачке $T_{\text{п } i}$ ($i=1...N$) (см. рис. 1).

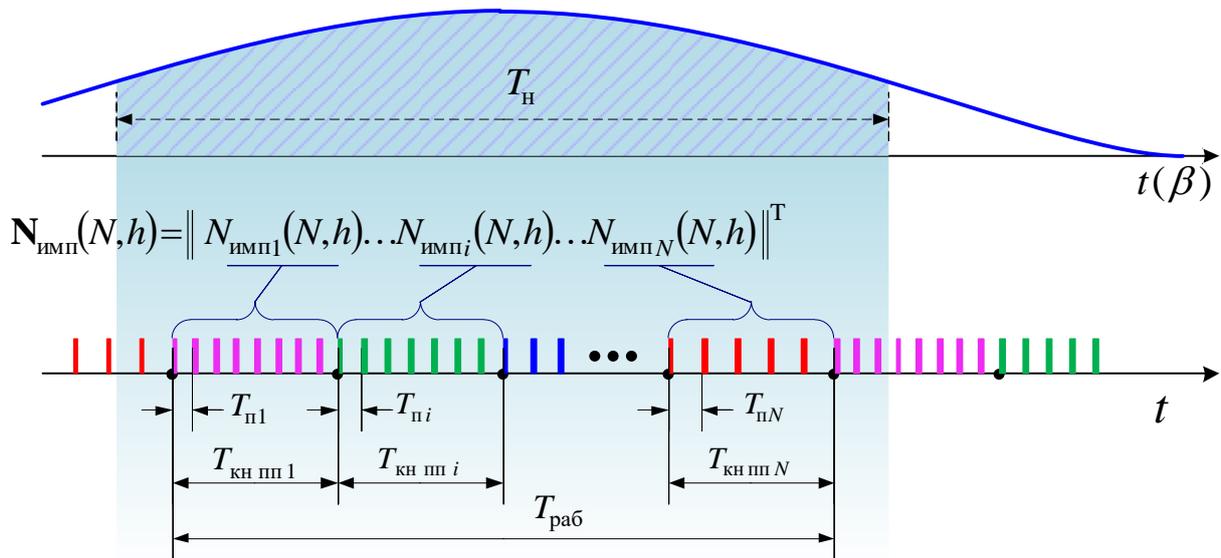


Рис. 1. Пояснение параметров закона вобуляции ЗС

Хронологию излучения отдельных импульсов и смены их подпачек назовем **законом вобуляции ЗС**. Значения $N_{имп i}$ и $T_{пi}$ ($i=1...N$) для заданного N будут определять **параметры закона вобуляции ЗС**. С учётом практической реализации множество вариантов параметров вобуляции ЗС с **общим числом сочетаний (гипотез) $M_H(N)$** при использовании N подпачек.

Для пачки излучаемых сигналов, состоящей из N подпачек, введём понятие **гипотеза параметров закона вобуляции ЗС – $H(N, h)$** , которая объединяет в себе **комбинацию числа импульсов**

$$\mathbf{N}_{имп}(N, h) = \left\| N_{имп 1}(N, h) \dots N_{имп i}(N, h) \dots N_{имп N}(N, h) \right\|^T \quad (1)$$

и **комбинацию периодов повторения**

$$\mathbf{T}_{п}(N, h) = \left\| T_{п 1}(N, h) \dots T_{п i}(N, h) \dots T_{п N}(N, h) \right\|^T \quad (2)$$

для h -го сочетания ($h=1...M_H(N)$) виде N -мерного вектора:

$$H(N, h) = \{ \mathbf{N}_{имп}(N, h), \mathbf{T}_{п}(N, h) \}. \quad (3)$$

Выбор параметров закона вобуляции ЗС для КИ РЛС обзора осложняется ограниченным временем наблюдения T_H в различных режимах работы и противоречащими требованиями по обеспечению заданной дальности действия

r_{\max} при максимальной скорости объектов $V_{r\max} = V_{\max}$ при условии движения на нас (далее по тексту $V_{r\max}$).

Порядок расчёта $N_{\text{имп } i}$ и $T_{\text{п } i}$ с целью устранения неоднозначности оценки радиальной скорости, исходя из параметров радиолокатора и требуемых характеристик обнаружения целей в известной научно-технической литературе детально не рассматривался. Таким образом, первоочередная задача методики оценки однозначной частоты Доплера в КИ РЛС обзора, заключающаяся в определении параметров закона вобуляции ЗС, является актуальной.

Цель статьи: сформировать параметры закона вобуляции ЗС для предложенных в [8] методов оценки радиальной скорости при ограничениях на время наблюдения $T_{\text{н}}$, радиальную скорость $V_{r\max}$ и наклонную дальность r_{\max} .

Постановка задачи

Требуется разработать подход по формированию гипотез параметров закона вобуляции ЗС для КИ РЛС, учитывающий число подпачек импульсов с вобуляцией периода повторения, а также значений периода повторения и числа импульсов для каждой подпачки. Использование полученных параметров закона вобуляции ЗС должно обеспечивать однозначное измерение радиальной скорости V_r в диапазоне $\pm V_{r\max}$ (частоты Доплера в диапазоне $\pm F_{\text{д } \max}$). Так же, требуется учесть дополнительные ограничения на реализацию методов оценки радиальной скорости, перечисленных во введении: на время наблюдения – $T_{\text{н}}$; на максимальное число подпачек – N_{max} ; на минимальный период повторения – $T_{\text{п } \min}$; на максимальное и минимальное число импульсов в каждой подпачке и их взаимное соотношение; на время когерентного накопления.

В целом, разрабатываемая методика оценки однозначной частоты Доплера в КИ РЛС обзора должна решать задачи:

- 1) Формирования ограничений для параметров закона вобуляции ЗС;
- 2) Формирование множества возможных гипотез параметров закона вобуляции ЗС исходя из заданных характеристик РЛС;

- 3) Формирования критерия обеспечения однозначного измерения радиальной скорости в заданном интервале;
- 4) Отбора гипотез параметров закона вобуляции ЗС, удовлетворяющих заданным критериям и условиям применения, в отдельное множество.
- 5) Формирования ограничений для методов оценки радиальной скорости, связанных с соотношением времени когерентного накопления и времени корреляции отражённого сигнала;
- 6) Выбора метода оценки радиальной скорости и параметров закона вобуляции ЗС для его реализации, обеспечивающего наименьшую ошибку оценивания с учётом технической реализуемости.

На рис. 2 представлена структурная схема методики решения задачи оценки однозначной частоты Доплера в КИ РЛС обзора. Элементы данной схемы будут описаны ниже.

Решаемые задачи представим в виде этапов описываемой методики. **В данной статье** рассматриваются этапы вплоть до формирования выборки множества гипотез параметров закона вобуляции ЗС удовлетворяющих заданному условию. Этап формирования ограничений для способов оценки радиальной скорости и этап совместного выбора способа оценки радиальной скорости и параметров закона вобуляции ЗС для его реализации (на рис. 2 приведены в виде блоков с штриховым контуром и серой заливкой) будут рассмотрены **в следующей статье**.

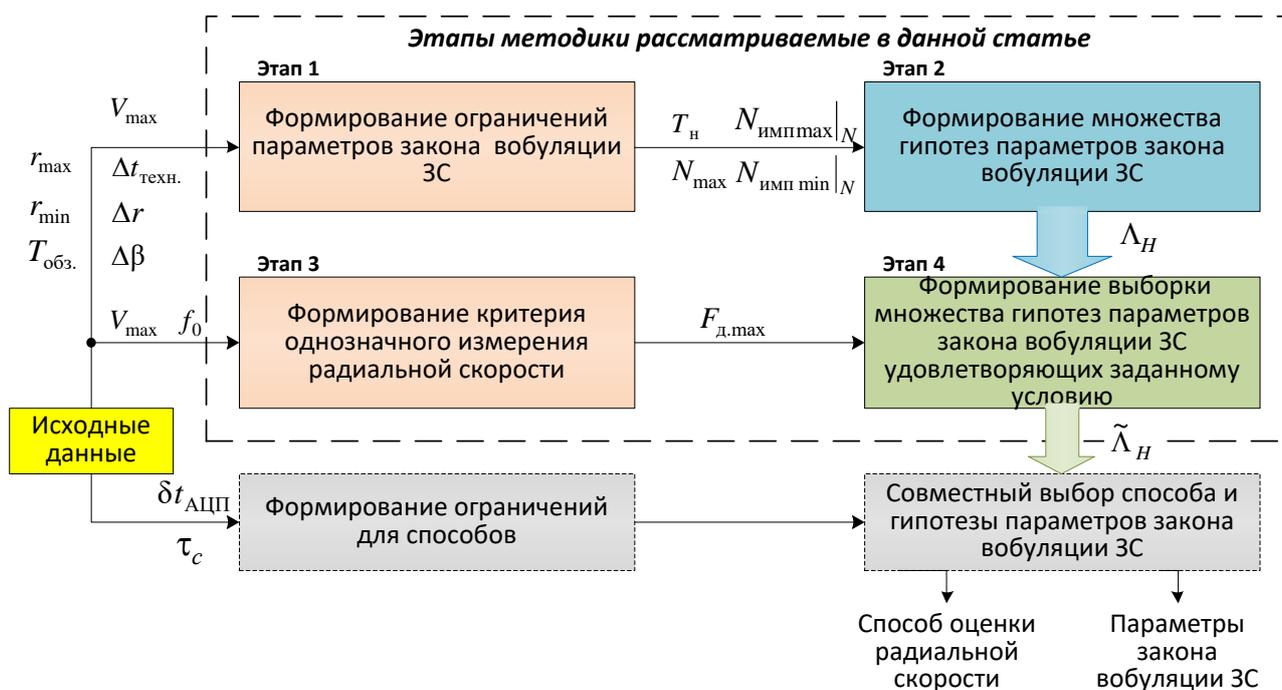


Рис. 2. Структурная схема методики решения задачи оценки однозначной частоты Доплера в КИ РЛС обзора

Рассмотрим содержание этапов связанных с формированием гипотез параметров вобуляции зондирующего сигнала.

Исходные данные

Эффективность и качество решения задач радиолокационного наблюдения непосредственно зависит от тактико-технических (ТТХ) характеристик РЛС. Такими характеристиками являются те параметры, которые определяют возможности РЛС по ее назначению и средства, которыми это достигается [12, 13].

Из **тактических показателей**, в качестве входных данных, в методике используются максимальная скорость объекта $V_{r \max}$; максимальная r_{\max} и минимальная r_{\min} дальности обнаружения; сектор обзора по азимуту $\beta_{\text{обз.}}$ и углу места $\epsilon_{\text{обз.}}$; разрешающая способность РЛС по дальности Δr .

Из **технических параметров** используются длина волны электромагнитного излучения λ (частота несущего колебания f_0); ширина диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту $\Delta \beta$, определяющая разрешающую способность в этой плоскости; - технологический временной

интервал $\Delta t_{\text{тех.}}$, включающий в себя время переключения приём-передача и обратно, анализ помеховой обстановки и т.п. Как правило, он кратен тактовому интервалу аналого-цифрового преобразователя (АЦП) $\delta t_{\text{АЦП}}$ для синхронности работы по одноимённым элементам дальности в каждом периоде повторения.

При неизменной λ (постоянной f_0) оценка радиальной скорости эквивалентна оценке частоты Доплера с учётом трансформации базиса.

Применение методики рассмотрено на примере вычислений применительно к РЛС дециметрового диапазона 19Ж6 [14] с исходными данными, приведёнными в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики РЛС

Название параметра	Значение параметра
Частота несущего колебания f_0 , ГГц (длина волны λ , см)	3 (10)
Максимальная дальность обнаружения r_{max} , км	150
Минимальная дальность обнаружения r_{min} , км	2,5
Сектор обзора по азимуту $\beta_{\text{обз.}}$, гр.	360
Период обзора по азимуту $T_{\text{обз.}}$, с	10
Разрешающая способность по дальности Δr , м	300
Разрешающая способность по азимуту $\Delta \beta$, гр.	4

Максимальную скорость обнаруживаемых целей примем равной $V_{\text{max}} = 1200$ м/с. Тактовый интервал синхронизатора $\delta t_{\text{АЦП}} = 0,4$ мкс, что соответствует частоте синхронизации 2,5 МГц.

Этап 1. Формирование ограничений параметров закона вобуляции ЗС

Подэтап 1.1 Определение времени наблюдения отраженного сигнала

Для наблюдения сигнала на разных частотах повторения необходимо, чтобы полная смена всех частот повторения прошла за время, не превышающее время наблюдения отраженного сигнала от цели $T_{\text{н}}$. Значение $T_{\text{н}}$

рассчитывается в соответствии с методикой, изложенной в [1 выражение (3.2), (13.5)]. Для РЛС обзора с зеркальной антенной, одновременным обзором по дальности и скорости, а также последовательным по азимуту и условию отсутствия манёвра в момент наблюдения целей:

$$T_{\text{H}} = \left(t_{\Delta r}^{-1} + t_{\Delta \beta}^{-1} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где $t_{\Delta r}$, $t_{\Delta \beta}$ – время пребывания цели в пределах одного элемента разрешения по дальности и азимуту соответственно.

Пример: Время наблюдения при последовательном обзоре по азимуту и одновременном по дальности для приведенных данных составит $T_{\text{H}} = 76,22$ мс.

Подэтап 1.2 Определение максимального числа частотных подпачек

По мере увеличения числа частотных подпачек уменьшается число импульсов не только в каждой подпачке, но и суммарное [11]. Кроме того, в [11] было определено, что оптимальное значение максимального числа частотных подпачек $N_{\text{max}} = 4$, а в случае решения задачи при включенном СДЦ, с учётом возможной потери сигнала в одной из подпачек в результате попадания в зону режекции устройства ККМО, примем $N_{\text{max}} = 5$.

Подэтап 1.3 Определение минимального периода повторения и максимальной частоты Доплера

Частота повторения $F_{\text{П}}$ обратно пропорциональна периоду повторения импульсов $T_{\text{П}}$, а $T_{\text{П min}}$ вычисляется при заданных r_{max} и $\Delta t_{\text{техн.}}$:

$$T_{\text{П min}} = 2r_{\text{max}} / c + \Delta t_{\text{техн.}} = 1 / F_{\text{П max}}, \quad (5)$$

где $F_{\text{П max}}$ – максимальная частота повторения импульсов.

Пример: Допустим, что $\Delta t_{\text{техн.}}$ составляет 15% от минимального потенциального значения периода повторения, тогда $T_{\text{П min}} = 1,15$ мс (соответственно максимальная частота повторения $F_{\text{П max}} = 869,6$ Гц).

Для заданной r_{\max} искомые периоды повторения увеличиваются относительно $T_{\text{п min}}$, а частоты повторения убывают относительно $F_{\text{п max}}$.

Подэтап 1.4 Определение максимального и минимального числа импульсов в каждой подпачке и их взаимного соотношения

Число импульсов в подпачке зависит от времени, отводимого на её излучение, и периода следования импульсов. Длительность каждой подпачки, для методов с когерентным [11] и некогерентным объединением результатов накопления подпачек [10], должна быть одинакова. Хотя для модифицированного нониусного метода [9] это условие может не соблюдаться. В дальнейшем используется условие равенства длительности подпачек [11,10]:

$$T_{\text{кн пп } i} = N_{\text{имп } i} T_{\text{п } i} = \frac{N_{\text{имп } i}}{F_{\text{п } i}} = \text{const}, \text{ для } i=1\dots N. \quad (6)$$

За время $T_{\text{н}}$ должны быть излучены все подпачки, т.е. должно выполняться неравенство $T_{\text{раб}} = NT_{\text{кн пп}} \leq T_{\text{н}}$ (см. рис. 1). В свою очередь, время для излучения одной из подпачек, обратно пропорционально общему числу подпачек $T_{\text{кн пп}} \leq T_{\text{н}}/N$.

С использованием минимального периода повторения (5), получают $N_{\text{имп max}}|_N$ – **максимально возможное число импульсов** в одной из N подпачек. В дальнейшем подпачка с наименьшим периодом повторения определяется как первая, а число импульсов для неё ($N_{\text{имп } 1}$) определяет максимальное граничное значение в соответствии с выражением:

$$N_{\text{имп max}}|_N = N_{\text{имп } 1} = [T_{\text{н}}/(NT_{\text{п min}})], \quad (7)$$

где $[\bullet]$ – наименьшее целое, обоснованное тем, что число импульсов – натуральное число, а округление в бóльшую сторону приведёт к тому, что период повторения, рассчитанный в дальнейшем, не обеспечит максимальную дальность обнаружения.

Пример: При отсутствии вобуляции число импульсов излучённых за время наблюдения с минимальным периодом повторения составит $N_{\text{имп max}}|_{N=1} = [66,278] = 66$. В случае использования двух частот повторения $N=2$ (т.е. при первой итерации формирования гипотез), максимальное число импульсов в каждой из подпачек составит $N_{\text{имп max}}|_{N=2} = 33$. По мере увеличения числа подпачек максимально допустимое число импульсов в подпачке составят: $N_{\text{имп max}}|_{N=3} = 22$; $N_{\text{имп max}}|_{N=4} = 16$; $N_{\text{имп max}}|_{N=5} = 13$.

Минимально возможное число импульсов ($N_{\text{имп min}}|_N$) в одной из N подпачек определяется как:

$$N_{\text{имп min}}|_N = [T_n / (NT_{\text{п доп. max}})] = [T_{\text{кн пп}} / T_{\text{п доп. max}}], \quad (9)$$

где $T_{\text{кн пп}}$ – время когерентного накопления подпачки;

$T_{\text{п доп. max}}$ – максимально допустимый период повторения (в силу технических ограничений тех или иных устройств РЛС данное значение может варьироваться). Более детально период повторения может быть выбран в каждой индивидуальной ситуации, но он обязательно удовлетворяет условию $T_{\text{п min}} < T_{\text{п доп. max}} < 2T_{\text{п min}}$.

Пример: Предположим, что на этапе проектирования определен максимально допустимый период повторения, превышающий минимальный в полтора раза (т.е. на 50%): $T_{\text{п доп. max}} = 1,5T_{\text{п min}} = 1,725 \text{ мс}$.

Значения минимального числа импульсов, рассчитанные в соответствии с выражением (8), следующие: при отсутствии вобуляции (т.е. для $N=1$) $N_{\text{имп min}}|_{N=1} = 45$; в случае использования вобуляции на двух, трёх, четырёх и пяти частотах повторения ($N=2\dots5$) результат составит $N_{\text{имп min}}|_{N=2} = 23$; $N_{\text{имп min}}|_{N=3} = 15$; $N_{\text{имп min}}|_{N=4} = 12$ и $N_{\text{имп min}}|_{N=5} = 9$ импульсов соответственно.

Если сигнал попал в область «слепой» скорости на одной из частот повторения, то для наблюдения сигнала на другой частоте повторения необходимо, чтобы он отличался по частоте минимум на элемент разрешения,

т.е. на полюсу фильтра $\Delta F_{\text{кн}} = 1/T_{\text{кн}}^{\text{имп}}$. Следовательно, с учётом постоянства полюсы когерентного накопления (6), число импульсов в последовательностях должно отличаться друг от друга

$$N_{\text{имп}i} \neq N_{\text{имп}j}, \text{ для } i, j = \overline{1 \dots N}; i \neq j; \quad (9)$$

Условие (9) обязательно для когерентного и некогерентного способа. При использовании модифицированного метода число импульсов может быть как одинаковым, так и различным. В дальнейшем, для формирования гипотез параметров возбуждения ЗС с целью удовлетворения условий всех трёх методов, условие (9) полагается обязательное к выполнению.

Этап 2. Формирование множества гипотез параметров закона возбуждения ЗС

Множество гипотез параметров закона возбуждения ЗС (Λ_H) представляет собой совокупность *подмножеств гипотез параметров закона возбуждения ЗС* ($\Lambda_H(N)$):

$$\Lambda_H = \{\Lambda_H(N)\}_{N=2}^{N_{\text{max}}}. \quad (10)$$

При этом для всех подмножеств выполняется условие $\Lambda_H(N) \in \Lambda_H$.

Подмножества $\Lambda_H(N)$ формируются последовательно для N от 2 до N_{max} , каждое из которых объединяет в себе все гипотезы $H(N, h)$ (3):

$$\Lambda_H(N) = \{H(N, h)\}_{h=1}^{M_H(N)}. \quad (11)$$

Процесс формирования $\Lambda_H(N)$ для очередного числа подпачек начинается с пересчёта ограничений, которые зависят от N .

Первоначально, из состава гипотезы $H(N, h)$ (3), определяется $N_{\text{имп}}(N, h)$, а затем для каждой комбинация числа импульсов рассчитывается комбинация периодов повторения:

$$\mathbf{T}_{\text{п}}(N, h) = T_{\text{кн}}^{\text{имп}} / N_{\text{имп}}(N, h) \text{ для } N = \overline{1 \dots N_{\text{max}}} \text{ и } h = \overline{1 \dots M_H(N)}. \quad (12)$$

Формирование возможных комбинаций числа импульсов $N_{\text{имп}}(N, h)$ поясняется на рис. 3 для трёх подпачек импульсов.

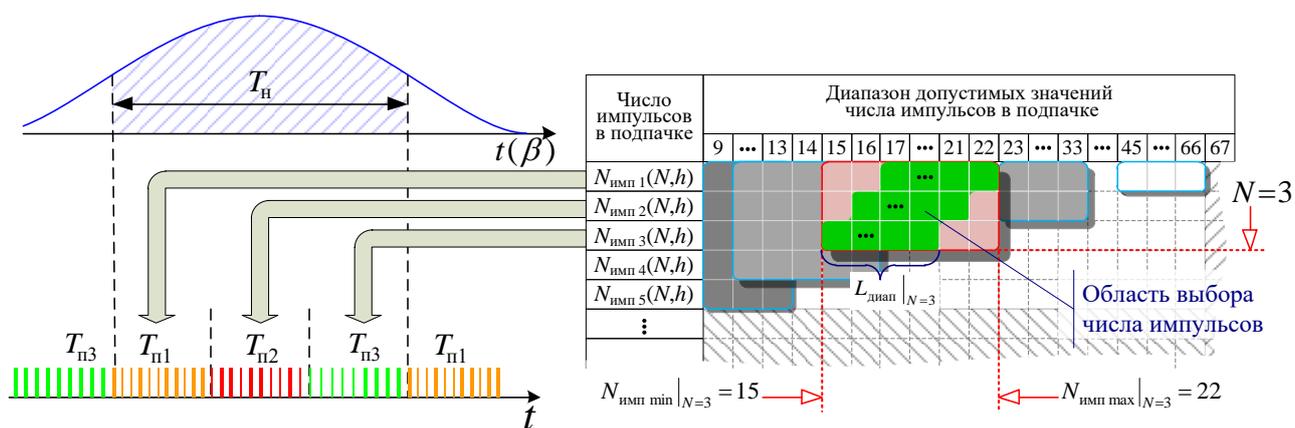


Рис. 3. Область выборки значений для формирования комбинаций чисел импульсов применительно для $N=3$

На рис. 3 слева сопоставлено время наблюдения, обусловленное азимутальной огибающей отражённого сигнала, и время излучения пачки импульсов. В правой части рис. 3 изображена графическая интерпретация возможных значений чисел импульсов при различном количестве подпачек в виде двумерной таблицы. При этом строки таблицы соответствуют элементам вектора $\mathbf{N}_{\text{имп}}(N, h)$ (1). Число импульсов для произвольной подпачки $N_{\text{имп}i}(N, h)$ из общего числа подпачек может присваивать любое значение из заданной области (клеточки с соответствующими значениями выделены зелёным цветом) которая определяется системой условий:

$$N_{\text{имп}i}(N, h) \geq N_{\text{имп} \min |_{N=3}} - \text{определяет левую границу области выбора};$$

$$N_{\text{имп}i}(N, h) \leq N_{\text{имп} \max |_{N=3}} - \text{определяет правую границу области выбора};$$

$$N_{\text{имп}i}(N, h) > N_{\text{имп}i+1}(N, h) - \text{учитывает взаимное отличие числа импульсов}$$

между подпачками (9) минимум на единицу и преобразует прямоугольную область выбора (уменьшается диапазон по направлению второстепенной диагонали, как со стороны левого верхнего угла, так и в области нижнего правого угла). Таким образом, область перебора трансформируется в форму ступенчатого параллелограмма с наклоном в правую сторону (на рис. 3 область перебора выделена зелёным фоном).

Номера подпачек i изменяются от 1 до N . В свою очередь число частотных подпачек N ($N=2 \dots N_{\text{max}}$) определяет число строк области выбора.

Пример: В правой части рис. 3 в качестве примера на передний план выведена область выбора значений для формирования комбинаций чисел импульсов для трёх частотных подпачек импульсов ($N = 3$) с учётом ограничений которые были приведены в качестве примеров выше по тексту.

С увеличением числа подпачек (N) наблюдается видоизменение области выбора числа импульсов, а именно: ступенчатое снижение нижней границы, уменьшение левой и правой границ, что следует из выражений (7) и (8) соответственно, и их сближение друг к другу, что объясняется выражениями для $N_{\text{имп min}}|_N$ и $N_{\text{имп max}}|_N$.

С учётом условий перебора и диапазона возможных значений общее число комбинаций $M_H(N)$ для произвольного числа подпачек при заданных ограничениях минимального и максимального числа импульсов в подпачке определяется выражением (см. (П.9) Приложения):

$$M_H(N) = \frac{(N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N + 1)!}{N!(N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N + 1 - N)!}. \quad (13)$$

Это даёт нам возможность применять выражение расчёта числа сочетаний

$$C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad [15 \text{ стр.42}], \text{ заменив в нём } n \text{ на } N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N + 1 \text{ и } k \text{ на}$$

N . Выражение (13) может быть представлено в виде:

$$M_H(N) = C_N^{(N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N + 1)}. \quad (14)$$

При формировании очередной комбинации вектора $\mathbf{N}_{\text{имп}}(N, h)$, число зондирующих импульсов в каждой последующей подпачке выбирается из убывающего ряда натуральных чисел (вследствие роста T_{Π}) в заданном диапазоне с учётом введённых ограничений.

Пример: На рис. 4 пояснён принцип формирования числа импульсов для двух частотных подпачек. Число гипотез в сформированном подмножестве с учётом перебора от $[33, 32]$ до $[24, 23]$ составляет $M_H(2) = 55$.

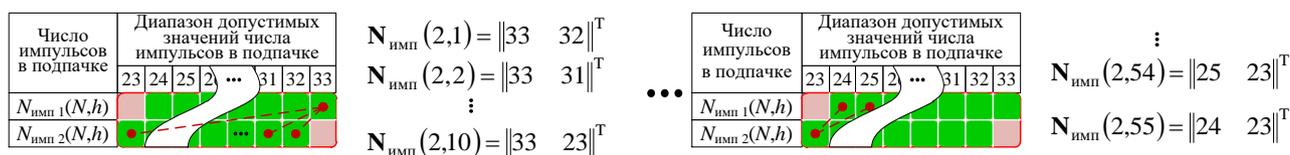


Рис. 4. Пояснение перебора для двух частотных подпачек

На рис. 4 выписаны выборочные гипотезы комбинаций числа импульсов для каждой из подпачек и визуализированы на области выбора значений в виде точек со штриховым соединением.

Сформировав очередную комбинацию числа импульсов $\mathbf{N}_{\text{имп}}(N,h)$ и рассчитав значения периодов повторения $\mathbf{T}_{\text{п}}(N,h)$ (12), полученная гипотеза включается в состав подмножества

$$\Lambda_H(N) := \Lambda_H(N) \cup H(N,h). \tag{15}$$

В качестве начального значения подмножеству гипотез $\Lambda_H(N)$ для текущего значения N присваивается «пустое множество» ($\Lambda_H(N) := \emptyset$). Включая в себя очередную гипотезу $H(N,h)$, подмножество гипотез $\Lambda_H(N)$ расширяется, а счётчик гипотез последовательно увеличивается на единицу $h = h + 1$. Данный подход един для всех вариантов числа подпачек N .

Пример: На рис. 5 пояснён принцип перебора для $N = 3$.

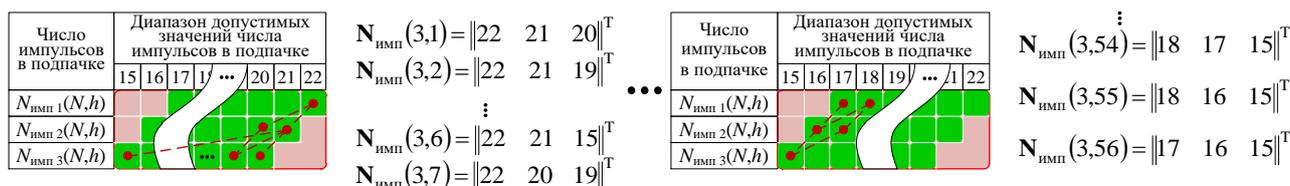


Рис. 5. Пояснение перебора для трёх частотных подпачек

Из всех возможных комбинаций, с учётом перебора от [22,21,20] до [17,16,15] (см. рис. 5) образуется подмножество $\Lambda_H(3)$, включающее в себя $M_H(3) = 56$ гипотез. Выборочные комбинации числа импульсов в каждой подпачке выписаны и представлены на области выбора значений в виде точек со штриховым соединением.

На рис. 6 пояснён принцип перебора для $N=4$.



Рис. 6. Пояснение перебора для четырёх частотных подпачек

Для данного случая подмножество $\Lambda_H(4)$ содержит всего $M_H(4)=5$ гипотез, которые представлены на рис. 6.

На рис. 7 представлена область выбора значений и выписана единственная комбинация числа импульсов для $N=5$.

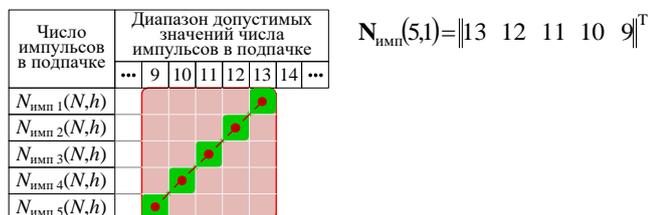


Рис. 7. Пояснение перебора для пяти частотных подпачек

На рис. 7 видно, что при отличии минимального и максимального числа импульсов менее чем $(N-1)$ сформировать комбинации числа импульсов не представляется возможным.

Этап 3. Формирование критерия однозначного измерения радиальной скорости

Исходя из длины волны РЛС и максимальной радиальной скорости обнаруживаемых целей, рассчитана максимальная частота Доплера $F_{д\max}$:

$$F_{д\max} = 2V_{r\max} / \lambda. \tag{16}$$

Пример: Для заданных $V_{r\max}$ и λ максимальное значение $F_{д\max} = 24\text{кГц}$.

Этап 4. Формирование выборки множества гипотез параметров закона вобуляции ЗС удовлетворяющих заданному условию

Не смотря на сложность ограничений не все полученные комбинации могут обеспечить требуемый диапазон измерения радиальной скорости. В работе [11] приводилась связь максимального однозначного диапазона с числом импульсов через наименьшее общее кратное (НОК). Удвоенная максимальная однозначная частота Доплера приближающейся или удаляющейся цели определяется в соответствии с выражением:

$$2F_{\text{д_одн_max}}(N, h) = \frac{1}{\Delta t_e(N, h)} = \frac{\text{НОК}(N_{\text{имп}}(N, h))}{N_{\text{имп}} T_{\text{п1}}}, \quad (17)$$

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 [11, (10)];

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

По результатам (17) для h -ой гипотезы параметров ЗС $H(N, h)$ при использовании N подпачек проверяется условие:

$$F_{\text{д_одн_max}}(N, h) \geq F_{\text{д_max}} \quad (18)$$

Все гипотезы, для которых обеспечивается заданный диапазон однозначности (18) (диапазон однозначного измерения превышает удвоенное значение максимальной частоты Доплера), сохраняются в *подмножестве гипотез удовлетворяющих критерию* $\tilde{\Lambda}_H(N)$

$$\tilde{\Lambda}_H(N) := \tilde{\Lambda}_H(N) \cup H(N, h). \quad (19)$$

В качестве начального значения $\tilde{\Lambda}_H(N)$ присваивается «пустое множество» $\tilde{\Lambda}_H(N) := \emptyset$. Подмножество, удовлетворяющее критерию выбора, принадлежит исходному: $\tilde{\Lambda}_H(N) \in \Lambda_H(N)$.

Пример: Из всего подмножества гипотез $\Lambda_H(2)$ для двух подпачек (см. рис. 4) ни один вариант не удовлетворяет условию (18), следовательно

подмножество гипотез удовлетворивших условие остаётся равным «пустому множеству»: $(\tilde{\Lambda}_H(2) = \emptyset)$. Наилучшими показателями (по критерию максимума НОК $(N_{\text{имп}}(N, h))$ импульсов) обладает комбинация $N_{\text{имп}}(2, 1) = [33, 32]$. Для данной гипотезы единый интервала дискретизации - наименьший и равен $\Delta t_e(2, 1) = 35,938$ мкс, что соответствует однозначному интервалу частоты Доплера $F_{\text{д одн макс}}(2, 1) = 13,913$ кГц, меньшему чем $F_{\text{д макс}} = 24$ кГц.

Для $N=3$ (см. рис. 5) из всех возможных $M_H(3) = 56$ гипотез условию однозначности измерения удовлетворяют только 46 гипотез, которые составят подмножество $\tilde{\Lambda}_H(3)$. Среди всех гипотез выделим комбинацию с наибольшим суммарным числом импульсов: $N_{\text{имп}}(3, 1) = [22, 21, 20]$ и вариант с наибольшим НОК: $N_{\text{имп}}(3, 2) = [22, 21, 19]$ (поскольку числа импульсов являются взаимопростыми). Для данных гипотез единые интервалы дискретизации и максимальные однозначные интервалы по частоте Доплера (17) соответственно составляют $\Delta t_e(3, 1) = 5,476$ мкс, $\Delta t_e(3, 2) = 2,882$ мкс и $F_{\text{д одн макс}}(3, 1) = 91,304$ кГц, $F_{\text{д одн макс}}(3, 2) = 173,478$ кГц.

Данная процедура проверки проводится для всех гипотез каждого подмножества. В результате формируется **множество гипотез параметров закона вобуляции ЗС удовлетворяющих критерию $(\tilde{\Lambda}_H)$** , которое представляет собой совокупность $\tilde{\Lambda}_H(N)$:

$$\tilde{\Lambda}_H = \{\tilde{\Lambda}_H(N)\}_{N=2}^{N_{\text{max}}} . \quad (20)$$

Из полученного множества путём совместного выбора метода и гипотезы параметров закона вобуляции ЗС в последующем будет формироваться оптимальное решение задачи измерения радиальной скорости, чему и будет посвящена следующая статья.

Если же для всех гипотез множества Λ_H условие (18) не выполнено, то образуется «пустое множество» $(\tilde{\Lambda}_H = \emptyset)$ – что соответствует отсутствию решения задачи измерения радиальной скорости в условии неоднозначности.

Заключение

В [10, 11] приводились требования к соотношению числа импульсов в подпачках, раскрывались особенности обработки сигнала исходя из реализуемого метода [8], но не раскрывался подход к выбору численных значений исходя из заданных исходных данных. В данной статье выработан поэтапный подход к формированию параметров вобуляции ЗС.

На первом этапе первоначально рассчитывается время наблюдения сигнала, отражённого от цели, которое является главным ограничением. На его основе получено минимальное и максимальное число импульсов для различного числа подпачек. Пример расчёта для типовой РЛС наглядно демонстрирует влияние тактико-технических и тактических требований на ограничения при решении задачи оценки радиальной скорости.

На третьем этапе формируются подмножества гипотез параметров закона вобуляции ЗС ($\Lambda_H(N)$) при использовании от двух до пяти подпачек.

В результате исследования получено выражение позволяющее рассчитывать число гипотез в каждом подмножестве на основании числа подпачек, минимального и максимального числа импульсов в каждой подпачке, так же определено условие наличия гипотез (наличие возможных решений):

$$N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N - N \geq -1.$$

В результате моделирования, для рассматриваемого примера, сформированы множества гипотез параметров закона вобуляции ЗС и представлены на рис. 8. В левой части рис. 8а изображены подмножества в виде замкнутых непересекающихся фигур. Общий контур всех подмножеств есть множество Λ_H . Каждое подмножество имеет счётное число гипотез. Каждой гипотезе числа импульсов соответствует точка на плоскости, которая для разных N имеет свою заливку цветом. Горизонтальная ось обозначает число используемых подпачек, вдоль вертикальной оси откладывается максимальная однозначная частота Доплера, рассчитанная в соответствии с (17).

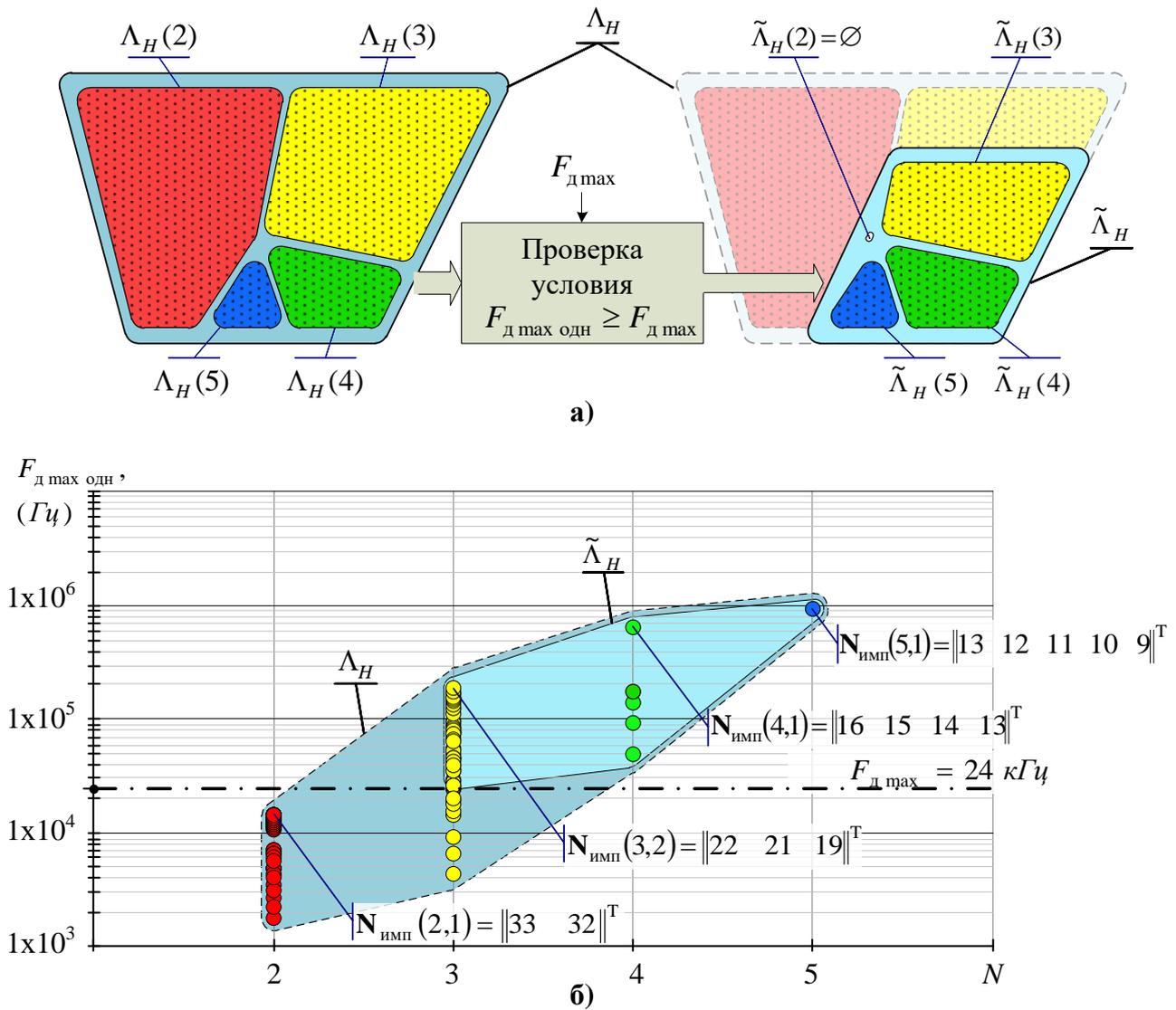


Рис. 8. Пояснение формирования множества гипотез параметров закона вобуляции ЗС удовлетворяющих критерию

Анализ подмножеств $\Lambda_H(N)$ показывает, что по мере увеличения числа подпачек уменьшается число гипотез. Данное явление качественно отображено в отличии площадей подмножеств на верхней части рис. 8а. Максимальное число гипотез принадлежит для трёх подпачек ($M_H(3) = 56$), минимальное, (одно единственное) – для пяти подпачек $M_H(5) = 1$, а вот для большего числа N решений нет.

Из анализа результатов четвёртого этапа стоит отметить, что для двух подпачек ни одна гипотеза не удовлетворяет условию однозначности измерения радиальной скорости (точки на графике см. рис. 8б находятся ниже порогового уровня $2F_{d \max} = 48 \text{ кГц}$) и в результате чего формируется пустое подмножество.

При использовании трёх подпачек для 47 гипотез из 56 условие выполняется. Подмножество $\tilde{\Lambda}_H(3)$ будет сформировано, но при этом будет иметь меньший размер относительно $\Lambda_H(3)$, что геометрически отражено на рис. 8а и 8б. Для четырёх и пяти подпачек для всех гипотез условие (18) является истинным, а значит $\tilde{\Lambda}_H(4) = \Lambda_H(4)$ и $\tilde{\Lambda}_H(5) = \Lambda_H(5)$ (геометрическая интерпретация подмножеств не изменяется).

Приведённые в статье результаты исследования решают задачу определения параметров вобулированных последовательностей ЗС (количества подпачек, числа импульсов в каждой из них и периода их следования) на основании заданных технических параметров РЛС и тактических требований по обнаруживаемым объектам.

Приложение. Вывод выражения расчёта числа гипотез в подмножестве

Задача: необходимо получить выражение для расчёта числа гипотез $M_H(N)$ с учётом максимального $N_{\text{имп max}}|_N$ и минимального $N_{\text{имп min}}|_N$ числа импульсов и числа подпачек \mathcal{N} .

При формировании гипотезы выбирается число импульсов для каждой из подпачек из заданной области, которая слева ограничена $N_{\text{имп min}}|_N$, справа – $N_{\text{имп max}}|_N$, \mathcal{N} определяет число строк. Пояснение на примере для трёх подпачек приведено на рис. 3 (здесь и ниже приведены ссылки на рисунки из основного текста статьи).

Учёт требования к взаимному отличию числа импульсов между подпачками изменит область выбора относительно прямоугольной формы. Конечный вариант области выбора обозначен на рис. 3 зелёным цветом. Для каждой подпачки минимально- и максимально возможное значение числа импульсов будет отличаться, но длина диапазона выбора значений $L_{\text{диап.}}|_N$ (см. рис. 3) при этом одинакова и рассчитывается в соответствии с выражением:

$$L_{\text{диап.}}|_N = N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N - N + 2. \quad (\text{П.1})$$

С целью выявления зависимости от исходных данных ($N_{\text{имп min}}|_N, N_{\text{имп max}}|_N, N$) и её последующей систематизации в конечном выражении числа гипотез, рассматриваются последовательно частные случаи для различного числа подпачек. В рассматриваемом примере максимальное число импульсов при минимальном периоде повторения за время наблюдения составляет $N_{\text{имп max}}|_1 = 65$.

Пусть число частотных подпачек $N=2$, а минимальное и максимальное число импульсов в подпачке соответственно равны $N_{\text{имп max}}|_2=33$ и $N_{\text{имп min}}|_2=23$. Область выбора числа импульсов представлена на рис. 4.

При формировании сочетаний производится последовательный перебор числа импульсов для первой подпачки от максимально ($N_{\text{имп 1}}=33$) до минимально возможного $N_{\text{имп 1}}=24$ и при этом для каждого случая последовательно перебираются числа импульсов для второй подпачки. Максимально возможное число импульсов каждой последующей пачки будет на единицу меньше, чем выбранное число импульсов предыдущей.

Первая комбинация числа импульсов для двух подпачек $N = 2$ – 33 импульса в первой подпачке ($N_{\text{имп 1}}=33$) и 32 импульса во второй подпачке ($N_{\text{имп 2}}=32$). Она определяет первую гипотезу $h = 1$ и может быть представлена в виде вектора $\mathbf{N}_{\text{имп}}(N = 2, h = 1)=[33,32]$.

Следующая комбинация будет с тем же числом импульсов в первой подпачке, а во второй подпачке на единицу меньше - $\mathbf{N}_{\text{имп}}(2,2)=[33,31]$ и т.д. В итоге для $N_{\text{имп 1}}=33$ перебирается в соответствии с (П.1) $L_{\text{диап.}}|_2 = 33 - 23 - 2 + 2 = 10$ значений $N_{\text{имп 2}}$ и формируется столько же гипотез. Закончив перебор $N_{\text{имп 2}}$ от 32 до 23, значение $N_{\text{имп 1}}$ уменьшается на единицу (т.е. $N_{\text{имп 1}}=32$). Перебор $N_{\text{имп 2}}$ в данном случае будет уже от 31 до 23 импульсов

и в совокупности составит 9 комбинаций. По мере перебора $N_{\text{имп } 1}$ доходит до 24. Число комбинаций представляет собой убывающий ряд натуральных чисел от 10 до 1 (для $N_{\text{имп } 1}=24$ возможно лишь $N_{\text{имп } 2}=23$).

Число комбинаций для рассмотренного частного случая следующее:

$$M_H(2) = 10 + 9 + 8 + \dots + 2 + 1 = \sum_{a=1}^{10} a = 55 \text{ для } N_{\text{имп max}}|_2 = 33 \text{ и } N_{\text{имп min}}|_2 = 23. \quad (\text{П.2})$$

Таким образом, для двух подпачек и произвольных $N_{\text{имп min}}|_2$ и $N_{\text{имп max}}|_2$ выражение для расчёта числа гипотез представляет собой сумму убывающего ряда натуральных чисел от $L_{\text{диап.}}|_2$ до 1 (сумма первых $L_{\text{диап.}}|_2$ чисел натурального ряда):

$$M_H(2) = \sum_{a=1}^{L_{\text{диап.}}|_2} a = \frac{L_{\text{диап.}}|_2 (L_{\text{диап.}}|_2 + 1)}{2}. \quad (\text{П.3})$$

Поскольку «2» в знаменателе (П.3) может быть трактовано и как N , и $N!$, то окончательная зависимость будет определена по совокупности частных случаев.

С целью выяснения этой закономерности следующим рассмотрим частный случай для $N=3$ при $N_{\text{имп max}}|_3 = 22$ и $N_{\text{имп min}}|_3 = 15$. В соответствии с (П.1) диапазон выбора значений $L_{\text{диап.}}|_3 = 6$. Эта область показана на рис. 5.

Перебор для трёх подпачек соответственно имеет три степени свободы: для каждого $N_{\text{имп } 1}$ возможны комбинации с убывающим рядом $N_{\text{имп } 2}$ любому значению которого ставится в соответствие также убывающий ряд $N_{\text{имп } 3}$. Например, при $N_{\text{имп } 1}=22$ и $N_{\text{имп } 2}=21$ возможны 6 вариантов $N_{\text{имп } 3}$ – от 20 до 15; при $N_{\text{имп } 1}=22$ и $N_{\text{имп } 2}=20$ – уже 5 вариантов $N_{\text{имп } 3}$ – от 19 до 15, а при $N_{\text{имп } 1}=22$ и $N_{\text{имп } 2}=16$ только один вариант – $N_{\text{имп } 3}=15$.

Наименьшее число вариаций соответствует крайним значениям перебора, так для $N_{\text{имп}1} = 17$ возможен только один вариант: $N_{\text{имп}2} = 16$ и $N_{\text{имп}3} = 15$.

Число комбинаций $M_H(3)$ для рассматриваемого частного случая следующее:

$$M_H(3) = (6 + 5 \dots + 1) + \dots + (2 + 1) + 1 = \sum_{b=1}^6 \sum_{a=1}^b a = 56 \text{ для } N_{\text{имп max}}|_3 = 22 \text{ и } N_{\text{имп min}}|_3 = 15. \quad (\text{П.4})$$

Из (П.4) следует, что верхний предел первой суммы равен длине диапазона $L_{\text{диап.}}|_3$, соответственно выражение для числа гипотез у трёх подпачек и произвольных значений левой и правых границ имеет вид:

$$M_H(3) = \sum_{b=1}^{L_{\text{диап.}}|_3} \sum_{a=1}^b a = \frac{L_{\text{диап.}}|_3 (L_{\text{диап.}}|_3 + 1)(L_{\text{диап.}}|_3 + 2)}{6}. \quad (\text{П.5})$$

Из сопоставления (П.3) и (П.5) можно сделать вывод, что знаменатель – это факториал от числа подпачек – $N!$. В свою очередь числитель можно представить частным от двух факториалов:

$$\begin{aligned} L_{\text{диап.}}|_3 \times (L_{\text{диап.}}|_3 + 1) \times (L_{\text{диап.}}|_3 + 2) = \\ L_{\text{диап.}}|_3 \times \dots \times (L_{\text{диап.}}|_3 + N - 1) = \frac{(L_{\text{диап.}}|_3 + N - 1)!}{(L_{\text{диап.}}|_3 - 1)!}. \end{aligned} \quad (\text{П.6})$$

Основываясь на (П.5), (П.6) и переходя от частного случая к общему получим выражение для расчёта числа гипотез в следующем виде:

$$M_H(N) = \frac{(L_{\text{диап.}}|_N + N - 1)!}{N! (L_{\text{диап.}}|_N - 1)!}. \quad (\text{П.7})$$

Проверим (П.7) при $N=4$, $N_{\text{имп min}}|_4 = 12$ и $N_{\text{имп max}}|_4 = 16$ (см. рис. 6) для которых $L_{\text{диап.}}|_4 = 2$, а число гипотез $M_H(4) = 5$. Выражение для четырёх подпачек

$$M_H(4) = \sum_{c=1}^{L_{\text{диап.}}|_4} \sum_{b=1}^c \sum_{a=1}^b a = \frac{L_{\text{диап.}}|_4 (L_{\text{диап.}}|_4 + 1)(L_{\text{диап.}}|_4 + 2)(L_{\text{диап.}}|_4 + 3)}{24}, \quad (\text{П.8})$$

полностью подтверждает истинность формулы (П.7).

После замены $L_{\text{диап.}}|_N$ в (П.7) в соответствии с (П.1) получим:

$$M_H(N) = \frac{(N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N + 1)!}{N!(N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N + 1 - N)!}. \quad (\text{П.9})$$

Поскольку пределы суммирования определяются длиной диапазона, то из (П.1) следует, что гипотезы будут сформированы при условии:

$$N_{\text{имп max}}|_N - N_{\text{имп min}}|_N - N \geq -1. \quad (\text{П.10})$$

Таким образом, (П.9) позволяет рассчитать число гипотез для произвольного числа подпачек N , минимального $N_{\text{имп min}}|_N$ и максимального $N_{\text{имп max}}|_N$ числа импульсов, а (П.10) – граничное условие наличия гипотез.

Литература

1. Охрименко А.Е. *Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации.* Москва, Воениздат. 1983. 456 с.
2. Сколник М.И. *Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн.1 пер. с англ. под ред. В.С. Вербь.* Москва, Техносфера. 2014. 672 с.
3. Гейстер С.Р. *Системное проектирование и расчет радиолокаторов противовоздушной обороны. Ч.1. Выбор типа и расчет параметров зондирующего сигнала.* Минск, ВАРБ. 1998. 221 с.
4. Гейстер С.Р., Куренев А.В. Методика определения параметров радиолокационного зондирующего сигнала. *Доклады БГУИР.* 2006. №4. С.11-16.
5. Пиза Д.М., Семёнов Д.С., Бугрова Т.И. *Проектирование радиолокационных систем.* Запорожье, ЗНТУ. 2017. 121 с.
6. Канащенков А.И., Меркулов В.И. *Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч.1.* Москва, Радиотехника. 2004. 312 с.

7. Попов Д.И. Обработка неэквилистантных сигналов на фоне пассивных помех. *Вестник РГРТУ*. 2022. №80. С.24-31.
8. 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.
9. Завиженец В.Н. Модифицированный нониусный метод для автоматического восстановления частоты Доплера в условиях неоднозначности. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2006. №2. С.57-61.
10. 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.
11. 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.
12. Бакулев П.А. *Радиолокационные системы*. Москва, Радиотехника. 2004. 320 с.
13. Белоцерковский Г.Б. *Основы радиолокации и радиолокационные устройства*. Москва, Советское радио. 1975. 336 с.
14. Радиолокационная станция 19Ж6 (СТ-68У). Москва, Военное издательство. 1992. 392 с.
15. Виленкин Н.Я. *Комбинаторика*. Москва, Наука. 1969. 328 с.

Для цитирования:

Завиженец В.Н., Горшков С.А., Солонар А.С. Формирование гипотез параметров возбуждения 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>