



УДК 621.396.96

А. В. Чепкасов, А. В. Сухоплюев

Радиолокационный прием пачки импульсов большой длительности при обнаружении движущихся целей

Предложен алгоритм обнаружения пачки радиоимпульсов, учитывающий набег фаз из-за доплеровского эффекта при постоянной радиальной скорости цели. Данный алгоритм учитывает степень когерентности импульсов в принимаемой пачке и практически не уступает по характеристикам обнаружения алгоритмам когерентного или некогерентного накопления.

Ключевые слова: радиолокационные станции обнаружения, накопление пачки радиоимпульсов, алгоритм обнаружения пачки радиоимпульсов.

Введение

Внедрение радиолокационных станций (РЛС) с активными фазированными антенными решетками (АФАР) на твердотельных приборах, которые не обладают высокой пиковой мощностью, требует применения в РЛС дальнего обнаружения сигналов большой длительности. В этом случае используются пачки радиоимпульсов с применением когерентного и некогерентного накопления. Следует отметить, что на когерентность радиоимпульсов пачки влияет ряд факторов, снижающих эффективность их накопления. Такими факторами являются движение целей, влияние среды распространения, стабильность параметров апертуры антенны.

Выражение, описывающее одиночный радиоимпульс, излучаемый АФАР:

$$S_{\Pi}(t) = S(t)e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)},$$

где $S(t)$ – прямоугольный модулирующий импульс;

ω_0 – круговая несущая частота;

φ_0 – начальная фаза на несущей частоте для передаваемого сигнала.

Считаем, что РЛС использует пачку радиоимпульсов $S_{\Pi}(t)$ с периодом повторения T . Выражение для излучаемой передатчиком пачки радиоимпульсов:

$$S_{\Pi}(t) = \sum_{i=1}^N S(t - T(i-1))e^{j[\omega_0(t - T(i-1)) + \varphi_0]},$$

где N – количество импульсов в пачке.

В зависимости от движения цели происходит изменение задержки сигнала.

Принято допущение, что цель движется с постоянной радиальной скоростью V_r , а деформация огибающей сигнала не учитывается.

Тогда время приема импульса с номером i по переднему фронту относительно момента излучения РЛС первого импульса пачки описывается выражением

$$t_{zi} = \frac{2R_0}{c} - \frac{2V_r R_0}{c(c + V_r)} + (i-1)T \left(1 - \frac{2V_r}{c + V_r}\right),$$

где R_0 – дальность до цели в момент излучения переднего фронта первого импульса пачки;

c – скорость света.

Следовательно, период повторения принимаемых импульсов

$$T_{\text{пр}} = T - \Delta T,$$

где $\Delta T = \frac{2V_r T}{c + V_r}$.

Таким образом, период следования принимаемых сигналов отличается от периода следования зондирующих сигналов и от опорного сигнала. При периоде повторения импульсов в пачке в десятки миллисекунд, радиальной скорости цели в несколько тысяч метров в секунду и периоде повторения порядка десятка миллисекунд изменение периода ΔT составляет единицы микросекунд.

При накоплении пачки импульсов с несущей частотой f_0 через период T разность фаз между соседними принимаемыми импульсами при частоте Доплера f_d за счет движения цели составит

$$\Delta\varphi = 2\pi(f_0 + f_d)\Delta T.$$

© Чепкасов А. В., Сухоплюев А. В., 2019



Таким образом, при постоянной радиальной скорости без учета эффектов распространения радиоволн в среде разность фаз сигналов в смежных импульсах пачки постоянна, но неизвестна. Для когерентного накопления необходимо учитывать набег фаз за период зондирования, возникающий вследствие доплеровского эффекта.

Суть предлагаемого решения

Матрица откликов согласованного фильтра на пачку из N радиоимпульсов, описываемых комплексными числами $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_N$, имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} Y_1 Y_1^* & Y_1 Y_2^* & \dots & Y_1 Y_k^* & \dots & Y_1 Y_N^* \\ Y_2 Y_1^* & Y_2 Y_2^* & \dots & Y_2 Y_k^* & \dots & Y_2 Y_N^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_k Y_1^* & Y_k Y_2^* & \dots & Y_k Y_k^* & \dots & Y_k Y_N^* \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_N Y_1^* & Y_N Y_2^* & \dots & Y_N Y_k^* & \dots & Y_N Y_N^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

Сумма элементов, расположенных на главной диагонали матрицы M , является результатом алгоритма некогерентного накопления пачки импульсов [1] после квадратичного

детектирования:

$$Y_{\Sigma\text{НО}} = Y_1 Y_1^* + Y_2 Y_2^* + \dots + Y_N Y_N^* = Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_N^2,$$

а сумма всех элементов корреляционной матрицы – результатом алгоритма когерентного накопления пачки импульсов:

$$Y_{\Sigma} = (Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n)^2 = Y_{\Sigma\text{НО}} + Y_{\Sigma\text{ПД}},$$

где $Y_{\Sigma\text{ПД}}$ – сумма элементов матрицы M , расположенных на ее побочных диагоналях,

$$Y_{\Sigma\text{ПД}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N Y_i Y_j^*, \quad i \neq j.$$

В предлагаемом алгоритме обнаружения пачки импульсов с учетом межпериодного доплеровского набега фазы рассчитываются суммы элементов, расположенных на каждой из диагоналей матрицы произведений откликов согласованного фильтра, которые затем подаются на детектор, пороговое устройство (ПУ) и логически объединяется по схеме «ИЛИ» (рис. 1).

Поясним работу предлагаемой схемы.

Сумма элементов матрицы M , расположенных на первой побочной диагонали, описывается выражением

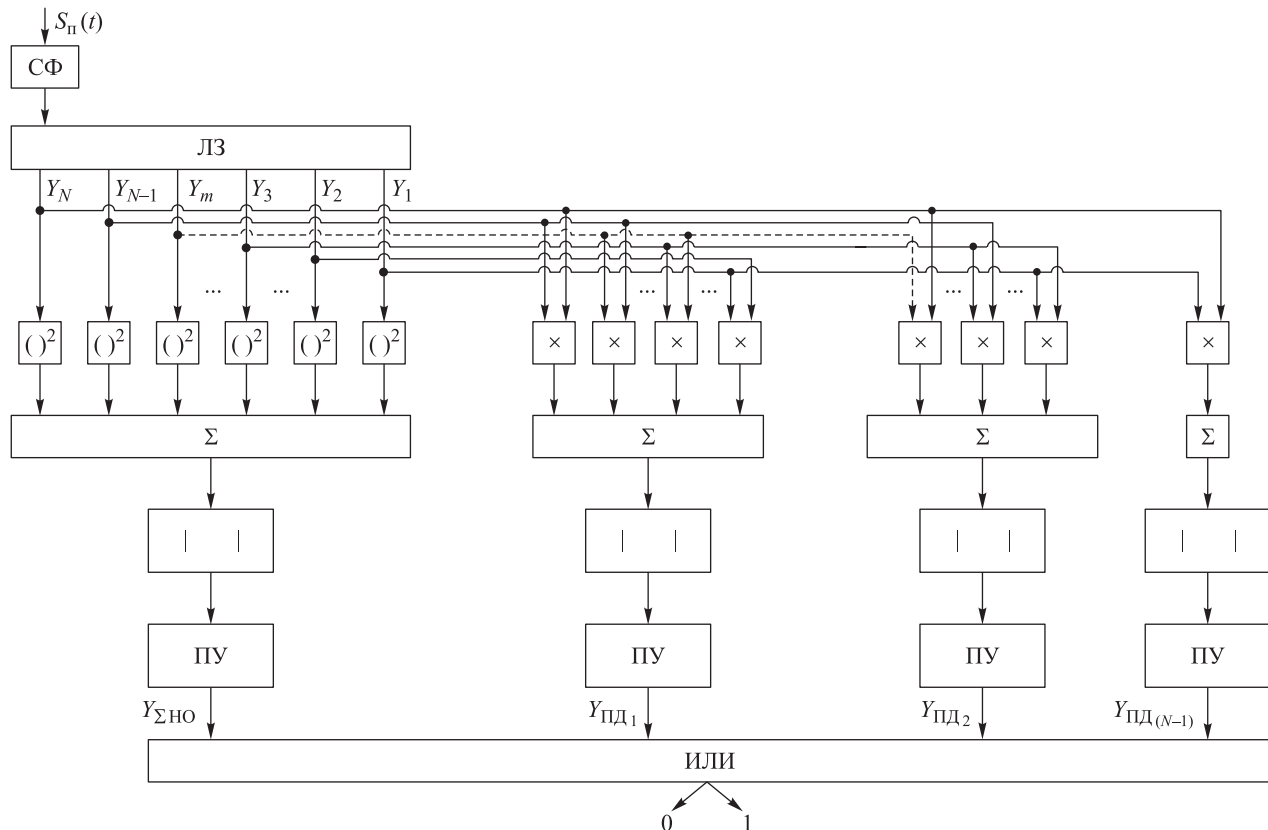


Рис. 1. Блок-схема алгоритма приема пачки импульсов с учетом межпериодного доплеровского набега фазы



$$Y_{\Sigma \text{ПД}_1} = Y_1 Y_2^* + Y_2 Y_3^* + Y_3 Y_4^* + \dots + Y_{N-1} Y_N^* = \sum_{k=2}^N Y_{k-1} Y_k^*,$$

где $Y_{k-1} Y_k^* = Y_{k-1} e^{j\varphi_{k-1}} Y_k e^{-j\varphi_k} = Y_{k-1} Y_k^* e^{j(\varphi_k - \varphi_{k-1})}$,

$(\varphi_k - \varphi_{k-1}) = \Delta\varphi_1$ – набег фазы между двумя соседними импульсами в пачке, который является постоянной величиной при равномерном прямолинейном движении цели, т. е. при условии, что изменение несущей частоты за счет эффекта Доплера за период T является постоянной величиной [2].

Аналогично сумма элементов матрицы \mathbf{M} , расположенных на побочной диагонали с номером m , описывается выражением

$$Y_{\Sigma \text{ПД}_m} = Y_1 Y_{1+m}^* + Y_2 Y_{2+m}^* + Y_3 Y_{3+m}^* + \dots + Y_{N-m} Y_N^* = \sum_{k=1+m}^N Y_{k-m} Y_k^*,$$

где $Y_{k-m} Y_k^* = Y_{k-m} e^{j\varphi_{k-m}} Y_k e^{-j\varphi_k} = Y_{k-m} Y_k^* e^{j(\varphi_k - \varphi_{k-m})}$;

$(\varphi_k - \varphi_{k-m}) = \Delta\varphi_m$ – набег фазы между двумя импульсами в пачке, расположенными через m периодов повторения, который, как и $\Delta\varphi_1$, является постоянной величиной при равномерном прямолинейном движении цели.

Таким образом, для сигналов, отраженных от равномерно движущейся цели, у элементов матрицы \mathbf{M} , расположенных на каждой из ее побочных диагоналей, набег фаз $\Delta\varphi_m$ одинаковы, хотя и неизвестны. Это позволяет синфазно суммировать элементы каждой из побочных диагоналей матрицы \mathbf{M} , учитывая таким образом неизвестное доплеровское изменение частоты.

Поскольку при этом в окончательном результате учитываются суммы всех побочных диагоналей матрицы \mathbf{M} , предлагаемое решение по эффективности оказывается близким к когерентному накоплению, но при этом оно существенно более экономично по объему вычислений, так как позволяет избежать многоканальности по доплеру.

Кроме того, поскольку в схеме «ИЛИ» участвует и сумма элементов главной диагонали матрицы \mathbf{M} , эквивалентная результату некогерентного накопления, предлагаемая схема без всяких изменений эффективно обрабатывает и некогерентную пачку импульсов, т. е. учитывает степень когерентности импульсов пачки.

Оценка эффективности предлагаемого решения

Оценка характеристик обнаружения проведена путем математического моделирования. Сигнал $S_{\text{п}}(t)$ в виде пачки из 12 импульсов после прохождения согласованного фильтра (СФ) подается через линию задержки (ЛЗ) на входы когерентного накопителя, некогерентного накопителя или на схему алгоритма приема пачки импульсов с учетом межпериодного доплеровского набег фазы (рис. 1). На рис. 1 блоки с обозначением $()^2$ выполняют возведение в квадрат, с обозначением \times – перемножение, с обозначением $|\ |$ – взятие модуля. Вероятность ложной тревоги является постоянной для всех алгоритмов обнаружения и приблизительно равна для всех алгоритмов накопления $2 \cdot 10^{-3}$. Для установки порога обнаружения [1, 3] выбрано 30 240 экспериментов. Вероятность правильного обнаружения (при фиксированной вероятности ложной тревоги) оценивается отношением количества экспериментов с превышением порога обнаружения к общему числу экспериментов.

Кривые обнаружения для пачки радиоимпульсов с различным уровнем когерентности для алгоритмов обнаружения после когерентного накопления импульсов, после некогерентного накопления и предлагаемого алгоритма с учетом межпериодного доплеровского набег фазы приведены на рис. 2–5.

Таким образом, значение вероятности правильного обнаружения $D = 0,9$ при поступлении некогерентных импульсов с коэффициентом корреляции между импульсами $r = 0$ на входы трех различных алгоритмов накопления (см. рис. 2) достигается при отношении сигнал – шум 14 дБ после их некогерентного накопления (красная кривая) и при чуть меньшем отношении сигнал – шум для предлагаемого алгоритма с учетом межпериодного доплеровского набег фазы (штриховая кривая). Обнаружить пачку некогерентных импульсов после прохождения схемы когерентного накопления не удастся (зеленая кривая).

Значение вероятности правильного обнаружения $D = 0,9$ при поступлении частично когерентных импульсов с коэффициентом корреляции между импульсами $r = 0,35$ на

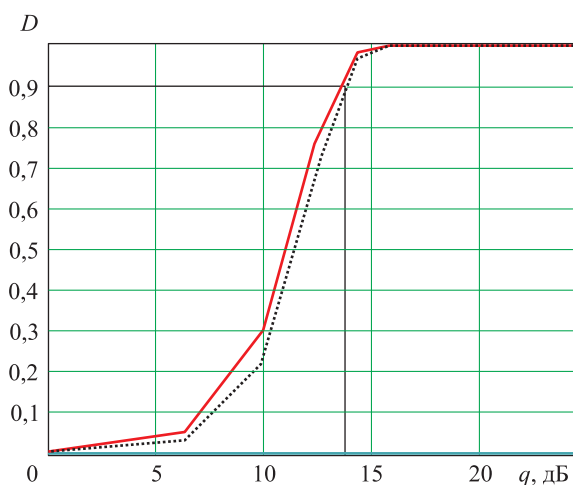


Рис. 2. Кривые обнаружения пачки некогерентных импульсов (с коэффициентом корреляции между импульсами $r = 0$) после их некогерентного накопления (—), при обработке по предлагаемому алгоритму с учетом межпериодного доплеровского набега фазы (.....) и после их когерентного накопления (—)

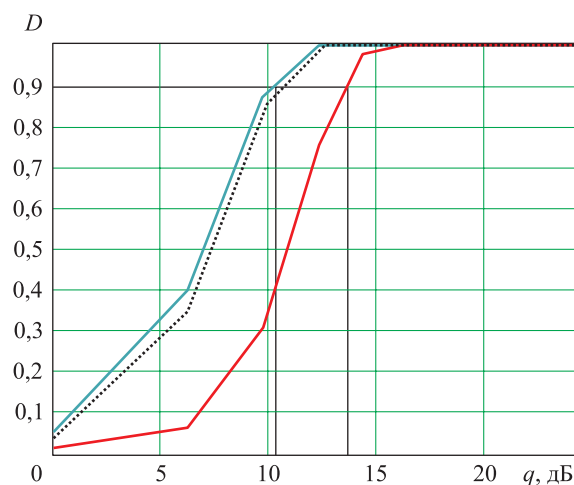


Рис. 4. Кривые обнаружения пачки когерентных импульсов (с коэффициентом корреляции $r = 1$) после их некогерентного накопления (—), при обработке по предлагаемому алгоритму с учетом межпериодного доплеровского набега фазы (.....) и после их когерентного накопления (—)

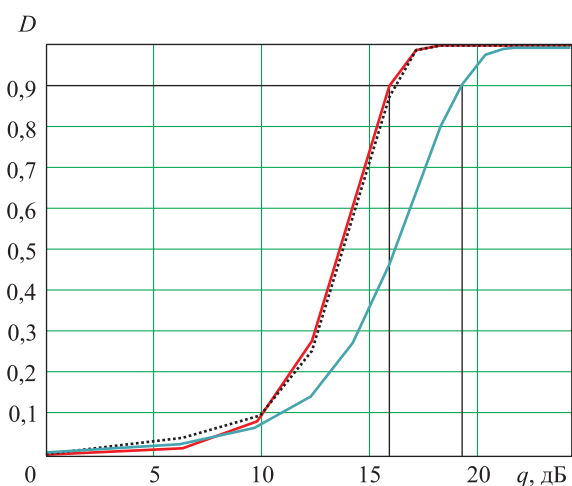


Рис. 3. Кривые обнаружения пачки частично когерентных импульсов (с коэффициентом корреляции между импульсами $r = 0,35$) после их некогерентного накопления (—), при обработке по предлагаемому алгоритму с учетом межпериодного доплеровского набега фазы (.....) и после их когерентного накопления (—)

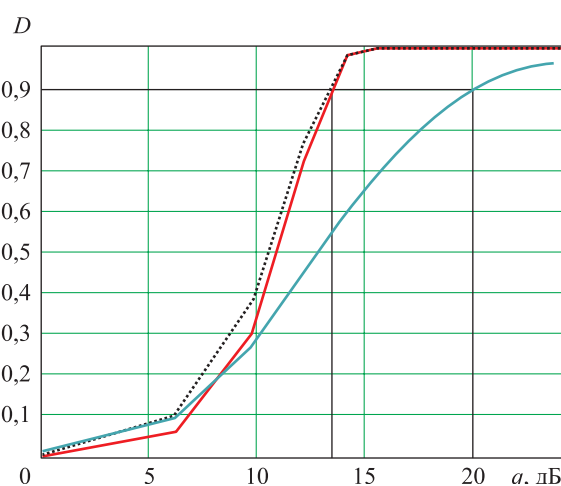


Рис. 5. Кривые обнаружения пачки частично когерентных импульсов, состоящей из четырех некогерентных субпачек (с коэффициентом корреляции между субпачками $r = 0$), после их некогерентного накопления (—), при обработке по предлагаемому алгоритму с учетом межпериодного доплеровского набега фазы (.....) и после их когерентного накопления (—)

входы трех различных алгоритмов накопления (см. рис. 3) достигается при отношении сигнал-шум 15 дБ после их некогерентного накопления (красная кривая) и при чуть меньшем отношении сигнал – шум для предлагаемого алгоритма с учетом межпериодного доплеровского набега фазы (штриховая кривая). Обнаружить пачку таких некогерентных импульсов с вероятностью $D = 0,9$ на выходе схемы когерентного накопления удастся при большем отношении сигнал – шум 19 дБ (зеленая кривая).

Обнаружить пачку когерентных импульсов (см. рис. 4) с вероятностью $D = 0,9$ удастся при отношении сигнал – шум 10 дБ после когерентного накопления импульсов (зеленая кривая), при чуть меньшем отношении сигнал – шум для предлагаемого алгоритма с учетом межпериодного доплеровского набега фазы (штриховая кривая) и при 14 дБ на выходе схемы некогерентного накопления (красная кривая).

Обнаружить пачку частично когерентных импульсов, состоящую из четырех некогерентных импульсов, состоящую из четырех некогерентных



герентных субпачек (рис. 5), с вероятностью $D = 0,9$ удается при отношении сигнал – шум 14 дБ для алгоритма с учетом межпериодного доплеровского набега фазы (штриховая кривая), при чуть меньшем отношении сигнал – шум после некогерентного накопления импульсов (кривая 1) и при 23 дБ на выходе схемы когерентного накопления. В данном случае предлагаемый алгоритм обладает лучшими характеристиками по сравнению с алгоритмами обнаружения после когерентного или некогерентного накопления пачки импульсов.

Таким образом, применение предложенного алгоритма позволяет проводить обнаружение сигналов в виде пачки импульсов с различной степенью когерентности, обусловленной доплеровским набегом фаз. При этом характеристики обнаружения (значения отношения сигнал – шум q , приведенного ко входу приемника, и вероятности правильного обнаружения D) близки к лучшим (см. рис. 2–4), в том числе и для длинной пачки из $N = 12$ радиоимпульсов, разделенной на $K = 4$ субпачки, причем субпачки являются попарно некогерентными (плотность распределения вероятности начальных фаз субпачек равномерна на интервале $[-\pi, \pi]$), а импульсы в составе каждой из субпачек когерентны.

Заключение

Разработан алгоритм приема пачки импульсов с учетом межпериодного доплеровского

набега фазы при постоянной радиальной скорости цели, основанный на использовании сумм элементов матрицы вида (1) произведений принимаемых сигналов, расположенных на каждой из ее диагоналей.

Алгоритм не требует знания радиальной скорости цели или применения многоканальной по доплеру схемы обработки и позволяет успешно обрабатывать когерентные, частично когерентные и некогерентные пачки импульсов, практически не уступая по эффективности соответственно алгоритмам когерентного или некогерентного накопления.

Эффективность алгоритма подтверждается результатами цифрового моделирования.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.
2. Чепкасов А. В., Молчанов Ф. А., Лякин Е. А. Оценка интервала когерентного накопления в радиолокационной станции дальнего обнаружения // Сборник докладов VI научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (18–19 сентября 2014 г., ФГУП «НПЦАП», Москва). М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2015. С. 438 – 443.
3. Справочник по радиолокации. В 2 кн. Кн. 1 / под ред. М. И. Скольника. М.: Техносфера, 2014. 672 с.

Поступила 29.11.19

Чепкасов Алексей Владимирович – ведущий инженер Публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А. А. Расплетина», г. Москва.
Область научных интересов: радиолокационный обзор и обнаружение целей.

Сухоплюев Алексей Вадимович – инженер 1-й категории Публичного акционерного общества «Научно-производственное объединение «Алмаз» имени академика А. А. Расплетина», г. Москва.
Область научных интересов: радиолокационный обзор и обнаружение целей.

Radar receiving of long pulse burst when detecting moving targets

The paper introduces an algorithm for detecting a burst of radio pulses. The algorithm takes into account the phase advance due to the Doppler effect at a constant radial velocity of the target, as well as the degree of pulse coherence in the received burst. The algorithm proposed is highly competitive in terms of detection performance with the algorithms of coherent or incoherent integration.

Keywords: radar detection, integration of radio pulse bursts, algorithm for detecting radio pulse bursts.

Chepkasov Aleksey Vladimirovich – leading engineer, Public joint-stock company “Research and Production Corporation “Almaz” named by Academician A. A. Raspletin”, Moscow.
Science research interests: radar surveillance and target detection.

Sukhoplyuev Aleksey Vadimovich – first category engineer, Public joint-stock company “Research and Production Corporation “Almaz” named by Academician A. A. Raspletin”, Moscow.
Science research interests: radar surveillance and target detection.