

УДК 621.391

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЕНСАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ В РЛС С КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

С.М.Кустов, В.М.Реганов, А.Д.Чеботарев

*Научно-исследовательский центр НовГУ, Sergey.Kustov@novsu.ru*

В работе приводятся результаты экспериментального исследования методов подавления мешающих отражений в РЛС с квазинепрерывными сложными сигналами большой длительности. Анализируется эффективность временной режекции и когерентной компенсации мешающих отражений. Приведенные зависимости демонстрируют достаточно высокую степень подавления помех в реальных условиях. Установлены источники погрешностей, препятствующие достижению более высокой эффективности.

**Ключевые слова:** *сложный сигнал, когерентная компенсация, цифровая обработка, временная режекция, порог обнаружения*

The paper contains the results of experimental research of clutter suppression method for radiolocation station with quasi-continuous long-duration compound signals. The efficiency of time rejection and coherent compensation of radar clutter is analyzed. The given dependences demonstrate quite high-scale of interference rejection in actual practice. We found out the source of errors, preventing from higher efficiency achievement.

**Keywords:** *compound signal, coherent compensation, digital processing, time rejection, detection threshold*

Существующая в настоящее время тенденция перехода на твердотельные приемопередающие устройства радиолокационных систем (РЛС) органично сочетается с использованием сложных зондирующих сигналов, имеющих низкую среднюю скважность и большую длительность когерентно обрабатываемой пачки импульсов. В этом случае даже при относительно небольшой мощности твердотельного передатчика за счет когерентного накопления энергосыщенного сигнала большой длительности обеспечивается достаточный потенциал РЛС.

Квазинепрерывные сигналы с псевдослучайным законом манипуляции амплитуды и фазы имеют ряд преимуществ перед регулярными периодически импульсными последовательностями с высокой частотой повторения. Наиболее явно эти преимущества проявляются в виде возможности однозначного измерения радиальной составляющей скорости целей, реализации режима селекции движущихся и неподвижных целей, обеспечения малой величины «мертвой зоны». Существенным недостатком сигналов это-

го вида является недостаточно высокая помехоустойчивость к отражениям от подстилающей поверхности, обусловленная фоном боковых лепестков функции неопределенности.

Работы, направленные на решение указанной проблемы, ведутся в области как синтеза сигналов, так и методов их обработки [1-3]. В результате проведенных теоретических исследований разработаны методы временной режекции и когерентной компенсации мешающих отражений, эффективность которых подтверждена расчетами и имитационным моделированием. Для аппаратной реализации этих методов требовалась проверка их работоспособности в реальной сигнально-помеховой обстановке.

Целью проведенной работы являлась оценка эффективности методов временной режекции и когерентной компенсации мешающих отражений при обработке реальных отраженных сигналов. Для этого на экспериментальном образце РЛС с квазинепрерывным псевдослучайным зондирующим сигналом была произведена доработка устройства формирования и

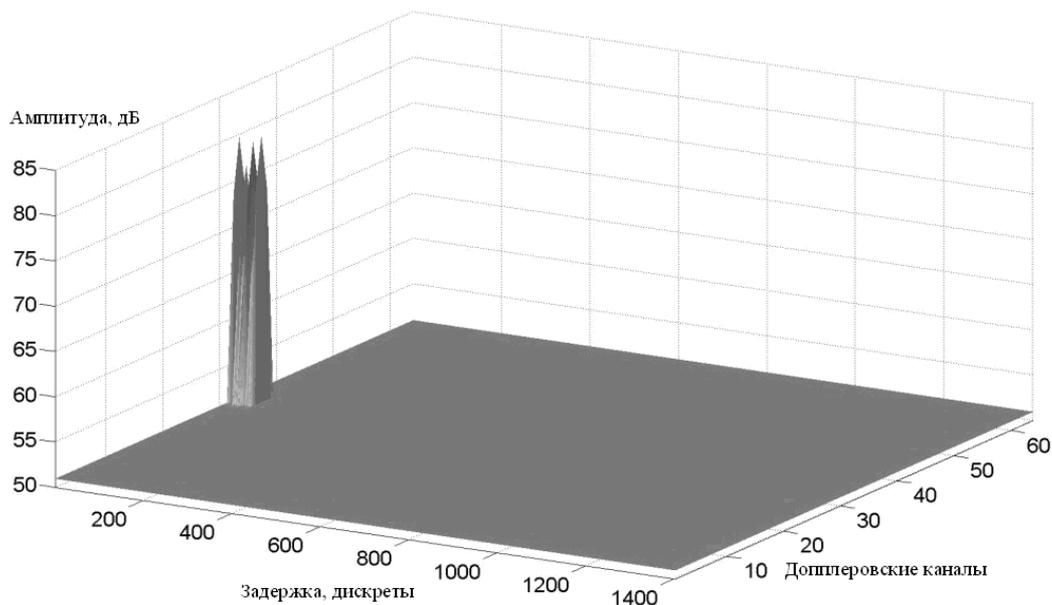


Рис.1. Корреляционно-фильтровая обработка сигналов с дискретом фазовой манипуляции  $\tau_z = 200$  нс (разрешение по задержке 30 м) и дискретом амплитудной манипуляции  $\tau_x = 1,6$  мкс. Длина обрабатываемого сигнала  $N = 65536$  отсчетов

обработки сигналов (УФРС), позволяющая сохранять (буферизовать) в реальном времени комплексные отсчеты отраженного сигнала на видеочастоте. Запись отраженных сигналов для последующей обработки производилась при работе РЛС в условиях городской застройки при мощности излучения 120 Вт в 10-сантиметровом диапазоне длин волн радиоизлучения. Это позволило при относительно невысокой пиковой мощности радиоизлучения получить в смеси отраженных сигналов как мощные отражения от близко расположенных объектов, так и маломощные отражения. Корреляционно-фильтровая обработка записанных реализаций отраженных сигналов проводилась на ПК.

Проведенные ранее исследования [4,5] показали, что мощные мешающие отражения в ближней зоне значительно превышают динамический диапазон при-

емного тракта и создают значительный уровень помех по боковым лепесткам функции неопределенности (БЛФН) в корреляционных каналах обработки. Типичный пример результатов обработки одной из реализаций смеси отраженных сигналов приведен на рис.1.

Как видно из рисунка, при корреляционно-фильтровой обработке выделяются только мощные отражения от городской застройки в ближней зоне. Порог обнаружения определяется средневластным уровнем БЛФН при рассматриваемой базе сигнала и составляет 50 дБ, что препятствует обнаружению слабых сигналов.

Известно, что для устранения мощных помех по БЛФН целесообразно вводить их временную режекцию только в удаленных дальномерных каналах обработки [4]. Обработка той же реализации сигналов при введении временной режекции показана на рис.2.

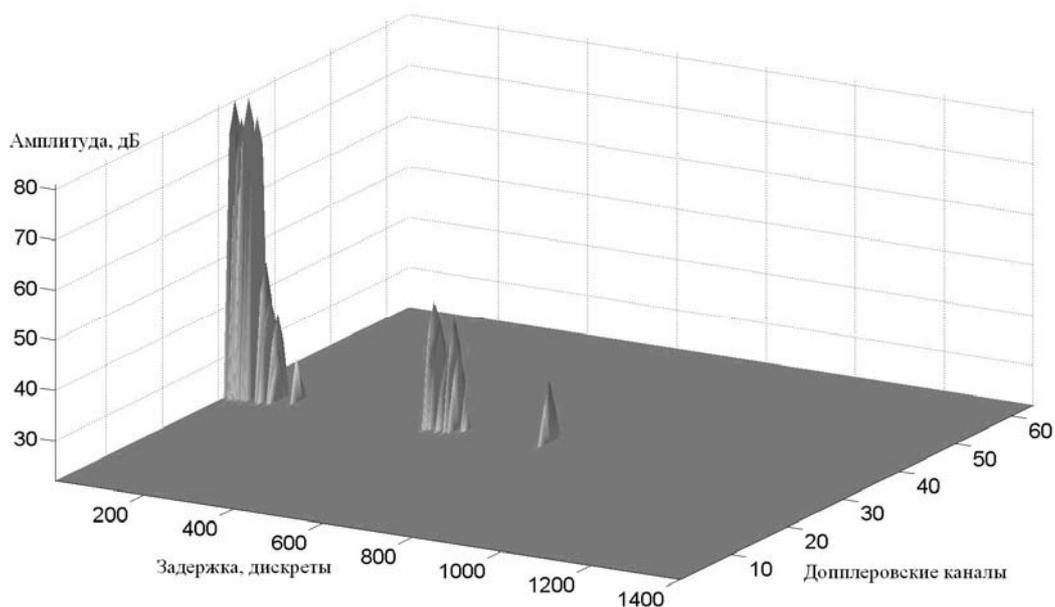


Рис.2. Корреляционно-фильтровая обработка с временной режекцией

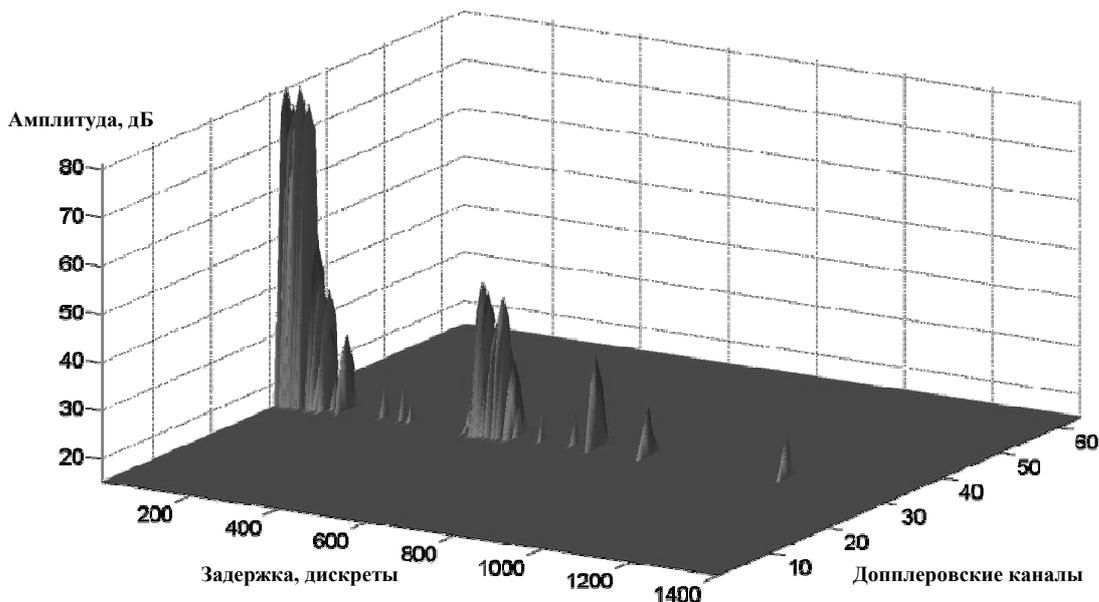


Рис.3. Рекурсивная компенсационная обработка с временной режекцией

В данном случае установленная зона режекции составляет 70 дискретных значений задержек сигналов ( $L_{\text{РЕЖ}} = 2100$  м).

Следует отметить, что за счет режекции мощных отражений удалось снизить порог обнаружения почти на 30 дБ и обеспечить обнаружение более слабых сигналов, вплоть до 800 дискретных значений задержек (до 24 км). Заметим, однако, что увеличение зоны режекции приводит к некоторым энергетическим потерям вследствие увеличения пик-фактора обрабатываемых сигналов и росту БЛФН.

Рассмотрим эффективность обработки записанных реализаций отраженных сигналов на основе блочного и рекурсивного алгоритмов когерентной компенсации [3] в дополнение к временной режекции мощных отражений. Результаты обработки анализируемой смеси отраженных сигналов с применением рекурсивного алгоритма когерентной компенсации помех приведены на рис.3.

Отметим, что введение в обработку алгоритма когерентной компенсации дает дополнительный выигрыш, обеспечивая снижение порога обнаружения еще на 7 дБ. Это позволило выделить более слабые сигналы. Так, уверенно обнаруживаются сигналы до 1200 дискретных значений задержек (до 34,8 км).

В ходе исследований было выявлено, что в зависимости от помеховой обстановки при обработке моделью с блочным алгоритмом когерентной компенсации порог обнаружения в общем случае оказывается на 1-2 дБ ниже, чем в модели с рекурсивным компенсатором. Таким образом, в данном примере за счет комбинирования в обработке алгоритмов временной режекции и когерентной компенсации было получено снижение порога обнаружения на 37 дБ.

Наилучший выбор ширины зоны режекции обусловлен текущей помеховой обстановкой в момент наблюдения. Расширение зоны устраняет влияние от все большего числа отражений, с одной стороны, но в то же время увеличивает энергетические потери, — с

другой. На рис.4 представлено семейство зависимостей эффективности режекции, когерентной компенсации и их сочетания в зависимости от ширины зоны режекции для двух различных длительностей обрабатываемого сигнала (8192 и 65535 отсчетов).

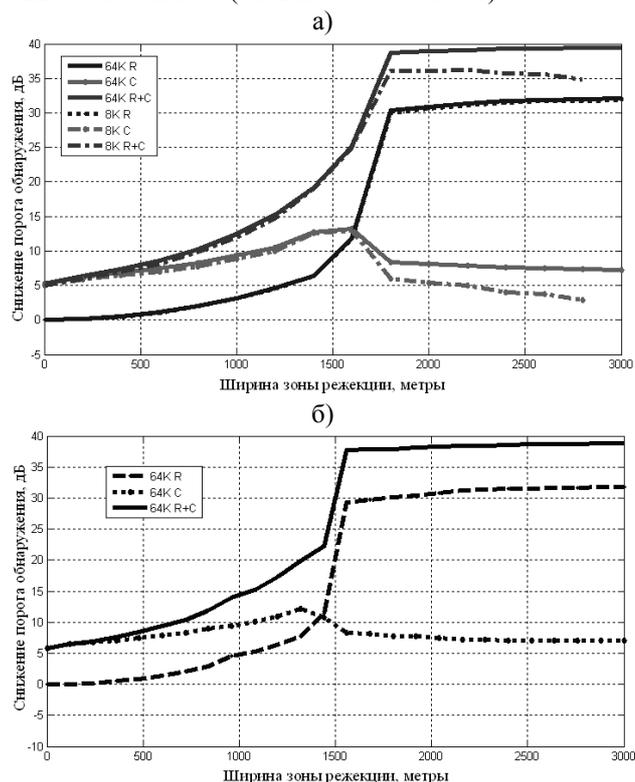


Рис.4. Зависимость эффективности режекции (64K R, 8K R), когерентной компенсации (64K C, 8K C) и их сочетания (64K R+C, 8K R+C) в зависимости от ширины зоны режекции;  $\tau_x = 1,6$  мкс,  $\tau_z = 200$  нс; а) для алгоритма с блочной компенсацией; б) для алгоритма с рекурсивной компенсацией для длительности сигнала 64K

В качестве критерия эффективности здесь, как и ранее, используется величина снижения порога обнаружения.

ружения по сравнению с согласованной обработкой. При выключенной режекции, при воздействии мощных отражений, значительно превышающих динамический диапазон приемного тракта, эффективность компенсационных алгоритмов составляет 5-7 дБ. При этом, как можно заметить, рекурсивный компенсатор (рис.4б) лучше отслеживает эти помехи, что дает порог обнаружения на 1-2 дБ ниже, чем при обработке блочным алгоритмом (рис.4а). По мере расширения зоны все большее число помех режектируется, вследствие чего одновременно возрастает как эффективность режекции, так и эффект от работы компенсатора. При дальнейшем увеличении зоны, начиная с определенного момента, рост эффективности прекращается и даже начинает снижаться. Как уже отмечалось, это связано с тем, что большая часть мощных мешающих отражений уже попала в зону режекции, а дальнейшее ее расширение только приводит к снижению энергетики в каналах обработки. Особенно это заметно для зависимости с длительностью сигнала 8192 отсчетов (8К на рис.4а), которая оказывается практически параллельной зависимости энергетических потерь, вызванных временной режекцией (рис.4а).

Из приведенных зависимостей также видно, что при снижении длительности обрабатываемого сигнала несколько снижается эффективность компенсации и как следствие — общая эффективность рассматриваемых алгоритмов обработки. Причина этого — снижение эффективной базы сигнала. Одновременно с уменьшением длины обрабатываемого сигнала уменьшается число ненулевых отсчетов из-за расширения зоны режекции. В такой ситуации оказывается недостаточно информации в сигнале для точной оценки амплитуд, что приводит к неточному формированию компенсационного сигнала и, следовательно, к увеличению ошибки компенсации. Следует заметить, что рекурсивный алгоритм в таких условиях также оказывается точнее блочного.

И хотя зависимости на рис.4 были получены для одной реализации сигнала, характер их неизменен и для других случаев помеховой обстановки.

Семейство графиков на рис.5 отражает типичное влияние изменения дискрета амплитудной манипуляции на эффективность описываемых алгоритмов. Здесь наблюдается аналогичный вид зависимостей с монотонным ростом эффективности до тех пор, пока зона режекции не охватит некоторое оптимальное для данной реализации количество задержек с мощными отражениями от подстилающей поверхности. При последующем расширении зоны эффективность остается на неизменном уровне. При увеличении длительности кванта амплитудной манипуляции эффективность алгоритма снижается, так как при этом снижается и степень перекрытия отражений в сигнале с разных задержек, что приводит к снижению порога обнаружения при согласованной обработке. Этим же объясняется и более широкий «максимум» эффективности компенсационной обработки ( $L_{РЕЖ} = 1000...2000$  м на рис.5 против  $L_{РЕЖ} = 1200...1700$  м на рис.4). Однако одновременно с этим ухудшаются статистические свойства сигнала, что приводит к ломаному виду графиков, особенно заметному в рекурсивном компенсаторе

(рис.5б). Действительно, для кривой сигнала с отношением квантов амплитудной к фазовой манипуляции, равным 24 ( $X_I = 24$ ),  $\tau_X = 9,6$  мкс, при длине сигнала 65536 отсчетов и пик-факторе 10 в среднем выпадает 273 ненулевых выборки сигнала. При включении режекции число активных выборок сигнала становится еще меньше, что серьезно искажает статистику сигнала в каждом конкретном корреляционном канале.

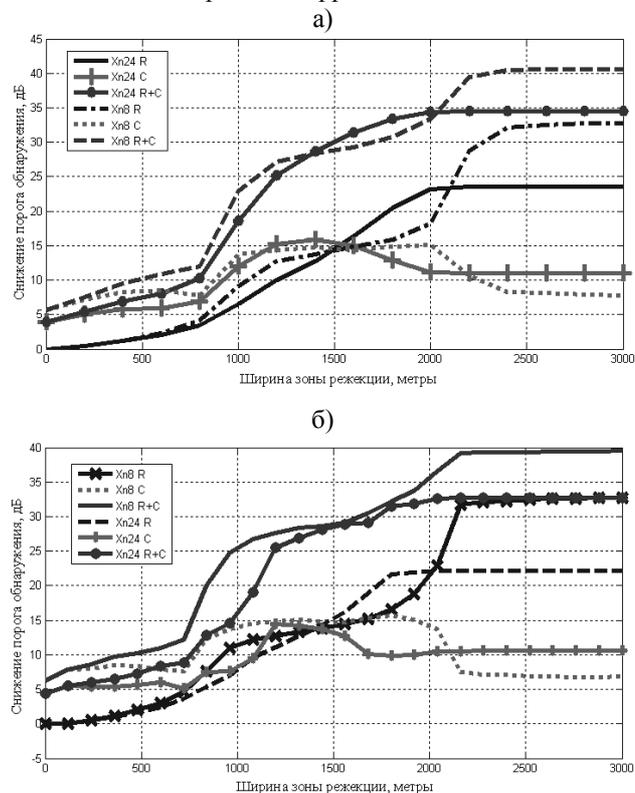


Рис.5. Зависимость эффективности режекции, компенсации и их сочетания в зависимости от ширины зоны режекции для разных длительностей дискрета амплитудной манипуляции;  $N = 65536$ ,  $\tau_Z = 400$  нс; а) для алгоритма с блочной компенсацией; б) для алгоритма с рекурсивной компенсацией

Наличие выраженного «максимума» и слабое монотонное спадание эффективности компенсационной обработки при расширении зоны режекции позволяет предположить, что в этой области адаптивным фильтром скомпенсированы все обнаруженные коррелированные отражения вплоть до уровня шумов. Это, в частности, выражается в заметном «проигрыше» эффективности компенсации для сигнала  $X_I = 8$  против остальных при  $L_{РЕЖ} > 2100$  м на рис.5 при одновременно более высокой глубине режекции. При этом общая эффективность подавления помех от подстилающей поверхности для  $X_I = 8$  превышает 40 дБ.

В ходе работ было выявлено, что снижение длительности дискрета фазовой манипуляции крайне негативно сказывается на эффективности компенсации отражений. Так, при  $\tau_Z = 50$  нс, когда ширина спектра сигнала оказывается сопоставима с шириной полосы пропускания тракта промежуточной частоты, эффективность компенсации в наилучшем случае не превышает 6 дБ. Пока остается неясным, чем вызван этот порог эффективности компенсации, и это является предметом наших даль-

нейших исследований. Точно так же неочевидна причина неполной компенсации мешающих отражений от подстилающей поверхности, не превышающих линейный динамический диапазон приемного тракта.

Таким образом, в ходе исследований приведены оценки эффективности метода временной режекции и двух вариантов метода когерентной компенсации мешающих отражений. Показано, что в реальных условиях работоспособность алгоритмов когерентной компенсации обеспечивается только в сочетании с временной режекцией сосредоточенных мешающих отражений, превышающих линейный динамический диапазон приемника. Совокупная эффективность подавления отражений от подстилающей поверхности достигает 40 дБ, что позволяет приблизиться к потенциально достижимым

характеристикам обнаружения для используемого твердотельного приемо-передатчика.

1. Быстров Н.Е. // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2003. Вып.3. С.15-22.
2. Чеботарев Д.В., Быстров Н.Е., Крылов Ю.В., Удальцов А.В. Широкополосные сигналы с квазинепрерывным спектром для частотной режекции мешающих отражений. // Докл. 12-й междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». Воронеж, 18-20 апреля 2006 г. Воронеж, 2006. С.339-348.
3. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы: анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника, 2005. 400 с.
4. Быстров Н.Е. // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2004. №28. С.44-50.
5. Чеботарев Д.В., Рерганов В.М. // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. науки. 2003. №23. С.80-85.