

УДК 551.501.81

## СИНТЕЗ СИММЕТРИЧНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ ЕКАТЕРИНБУРГСКОГО КОГЕРЕНТНОГО ДЕКАМЕТРОВОГО РАДАРА

*О. И. Бернгардт\**, *К. В. Гркович*, *Р. Р. Фёдоров*

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

В рамках обобщения разработанной ранее 13-импульсной зондирующей последовательности радаров SuperDARN проведён синтез оптимальных зондирующих последовательностей, описываемых парной комбинацией взаимно-симметричных линеек Голомба с длительностью от 12 до 18 импульсов. Последовательности представляют собой пару идентичных взаимно-симметричных во времени подпоследовательностей, разнесённых по задержке, и не содержат дополнительного импульса, использованного ранее для измерения профиля мощности рассеянного сигнала. Поиск оптимальных подпоследовательностей проводится методом полного перебора в классе оптимальных и почти оптимальных линеек Голомба. Критерием оптимальности является обеспечение максимальной информативности полученного сигнала в смысле высокого спектрального разрешения при минимальном времени накопления, а также требование эффективности измерения профиля мощности рассеянного сигнала. В работе продемонстрирована потенциальная эффективность одного из построенных сигналов (16-элементного) для проведения спектральных измерений на Екатеринбургском когерентном декаметровом радаре.

### ВВЕДЕНИЕ

Радиозондирование является одним из основных методов исследования ионосферы Земли. Короткие радиоволны испытывают существенную рефракцию в ионосфере, из-за чего обладают высокой чувствительностью к изменениям ионосферных характеристик и ионосферным неоднородностям с различными масштабами и динамикой. Для изучения неоднородностей с различными масштабами в этом диапазоне частот используются различные приборы: ионозонды вертикального и наклонного зондирования (импульсные и с линейной частотной модуляцией), системы радиозонд—пеленгатор и др.. Структуру, динамику и скорости мелкомасштабных неоднородностей изучают в основном с помощью импульсных радаров обратного рассеяния — радаров частичных отражений, когерентных радаров и радаров некогерентного рассеяния. Наиболее крупной сетью однотипных радаров обратного рассеяния на сегодня является, по-видимому, сеть когерентных радаров SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) и аналогичных им [1, 2].

Изучение динамики и особенно скоростей ионосферных неоднородностей в коротковолновом диапазоне сопряжено с определёнными трудностями. Характерные ионосферные скорости существенно ниже скорости звука на ионосферных высотах и имеют порядок десятков и сотен метров в секунду. Это приводит к необходимости измерять доплеровские смещения с точностями не хуже единиц герц. Использование на таких радаров простых радиоимпульсов приводит к тому, что пространственное разрешение становится сравнимым с характерными масштабами ионосферы.

Поэтому чаще всего задача повышения пространственного разрешения без потери спектрального решается использованием сложных сигналов со специально подобранными свойствами и соответствующими им методами обработки принятых сигналов, которые позволяют одновременно

---

\* [berng@iszf.irk.ru](mailto:berng@iszf.irk.ru)

обеспечить высокое пространственное и спектральное разрешение. Среди таких сложных сигналов можно отметить многоимпульсные последовательности [3], использование фазоманипулированных сигналов, кодированных случайной фазой [4], чередующиеся коды [5]) и аperiodические последовательности [6].

Наиболее распространённым из этих подходов на международной сети радаров SuperDARN является использование многоимпульсных последовательностей [1]. Основной задачей радаров SuperDARN является исследование сигналов, рассеянных вытянутыми вдоль магнитного поля Земли ионосферными неоднородностями  $F$ -слоя ионосферы, и использование их спектральных характеристик для изучения процессов высокоширотной ионосферной конвекции. Рабочие частоты подобных радаров составляют  $8 \div 20$  МГц, обычно один радар исследует сектор обзора порядка  $50^\circ$ , сканируя его по шестнадцати направлениям (лучам). Принимаемые сигналы исследуются в диапазоне расстояний от 180 до более чем 3000 км с пространственным разрешением 45 км.

Длительность традиционной 7-импульсной зондирующей последовательности радара SuperDARN составляет около 70 мс с периодом повторения последовательностей порядка 100 мс [1]. Традиционной обработкой на этих радаров является получение усреднённых комплекснозначных автокорреляционных функций (АКФ) или автокорреляционных матриц [5] принятого сигнала. Полученные АКФ аппроксимируются модельными функциями для получения оценок мощности рассеяния, продольной доплеровской скорости и ширины спектра сигнала как функций дальности от радара [7].

Наиболее просто построение многоимпульсных зондирующих последовательностей можно провести, базируясь на свойствах известного математического объекта — линейки Голомба. Свойства этого объекта соответствуют требованиям, накладываемым на форму сигнала, способного одновременно обеспечить высокое пространственное и спектральное разрешение в методе обратного рассеяния [8, 9]. Для трансформации выбранной линейки Голомба в зондирующую многоимпульсную последовательность расстояния между короткими импульсами последовательности выбираются кратными: равными произведению элемента линейки Голомба на базовый временной дискрет. Стандартный дискрет межимпульсного расстояния на таких радаров составляет 2400 мкс, а длительность элементарного короткого зондирующего импульса равняется  $100 \div 300$  мкс. В настоящее время при регулярных измерениях на радаров SuperDARN используются два типа последовательностей: стандартная 7-импульсная [10] и 8-импульсная katscan [7].

Как уже отмечалось, декаметровые радиоволны чувствительны как к вариациям фоновой ионосферы, так и к характеристикам мелкомасштабных ионосферных неоднородностей. Кроме рассеяния от неоднородностей  $F$ -области, существует множество различных типов рассеяния: рассеяние в  $E$ -слое, рассеяние от неоднородностей земной и водной поверхности, метеорное и мезосферное эхо [1]. Способы интерпретации сигнала для каждого типа рассеяния различны, и одними из основных отличий, позволяющим разделить эти сигналы, являются их спектральные характеристики.

Вследствие особенностей частотного диапазона таких радаров, на траекторию сигнала существенно влияет ионосферная рефракция, и принятый сигнал является смесью сигналов, рассеянных на ионосферных неоднородностях (ionospheric scatter, IS) и сигналов, преломленных ионосферой и рассеянных от земной поверхности (ground backscatter, GS). Задача идентификации этих сигналов является очень важной и достаточно сложной и рассматривается во многих работах (см., например, [11–13]). В настоящее время для выделения сигналов, рассеянных земной поверхностью (GS-сигналов), на большинстве радаров SuperDARN используется методика выделения, реализованная в стандартной программе FitACF [7]. Основными характеристиками сигнала, используемыми для такого разделения, являются доплеровское смещение частоты и спектральная

ширина сигнала. Таким образом, спектральное разрешение метода в задаче идентификации типов рассеянных сигналов имеет важное значение.

В настоящее время в работе радаров SuperDARN используется зондирование 7- и 8-импульсными последовательностями класса линеек Голомба [7, 10], сложной 13-импульсной последовательностью [8], а на самых современных моделях радаров — аperiodическими последовательностями [14]. В работе [13] было показано, что характерное время жизни IS-сигналов может достигать 200 мс, а характерное время жизни GS-сигналов превышает 250 мс. Поэтому для уверенного разделения и анализа этих типов рассеяния длительность зондирующих последовательностей не должна быть меньше 200 мс. Использование слишком коротких 7- и 8-импульсных зондирующих последовательностей в некоторых ситуациях приводит к сложностям в вопросах идентификации сигналов различных типов. Ситуацию можно улучшить, если применять более протяжённые последовательности, состоящие из большего числа импульсов. В частности, использование более длинных последовательностей на Екатеринбургском когерентном декаметровом радаре ЕКВ ИС-ЗФ СО РАН (далее — радар ЕКВ), аналогичном радарам SuperDARN, позволяет существенно улучшить спектральное разрешение [9]. Несмотря на разработку и запуск в октябре 2014 года на радаре ЕКВ новых 10-импульсных последовательностей [9], обеспечивающих повышенное спектральное разрешение, а также на разработку более сложных и длинных последовательностей на основе линеек Голомба, спектральное разрешение зачастую остаётся недостаточным, либо накопление сигналов требует слишком большого времени.

Улучшением такого метода является способ, предложенный в работе [8] и основанный на использовании взаимно-симметричных линеек Голомба для построения зондирующей последовательности. Такой метод при удачном подборе зондирующей последовательности позволяет компенсировать часть эффектов, связанных с отключением приёмника на время излучения и перекрытием зондирующих сигналов на различных дальностях, не компенсируемых при использовании обычных линеек Голомба.

В данной работе этот метод обобщён на случай произвольных взаимно-симметричных пар линеек Голомба с длиной  $6 \div 24$ . Сформулированы требования к оптимальным последовательностям такого типа. Прямым перебором по известным почти оптимальным линейкам Голомба показано, что оптимальные последовательности нового типа могут быть построены на основе линеек Голомба с длиной от 6 до 9. Также продемонстрирована потенциальная эффективность одного из построенных сигналов (16-элементного) с точки зрения проведения спектральных измерений на радаре ЕКВ.

## 1. ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

Использование сложных импульсных зондирующих последовательностей позволяет проводить на радарх SuperDARN оценку спектральных характеристик рассеивающих неоднородностей по АКФ принятого сигнала, усреднённой по сеансам зондирования. Особенностью построения АКФ является необходимость пространственной привязки каждой точки (задержки) корреляционной функции, поскольку каждая задержка рассчитывается для своей дальности. Положения этих точек в пространстве могут быть описаны в терминах весового объёма [9].

Известно, что для линеек Голомба высоких порядков нельзя создать совершенную линейку, которая будет измерять все расстояния в заданных пределах, и поэтому используют оптимальные линейки, на которых относительное количество таких проблемных расстояний минимально (или линейки, обладающие минимальной длиной). На практике это соответствует тому, что не все задержки корреляционной функции принятого сигнала (lags) соответствуют реальным на-

блюдениям, некоторые содержат только шум. Такие точки в корреляционной функции, которые не содержат информации о рассеянном сигнале, называются пропущенными задержками (missed lags), определяются кодом последовательности и не зависят от радиолокационной дальности.

Количество задержек, непригодных для анализа корреляционной функции, дополнительно увеличивается на однопозиционных радарх, в которые используются одни и те же антенны для излучения и приёма сигналов. В этом случае невозможно регистрировать принятый сигнал во время излучения. Задержки корреляционной функции, на которых наблюдается этот эффект, их количество и положение будет зависеть от дальности, на которой исследуется рассеянный сигнал (range gate) [9]. Такие точки корреляционной функции называются плохими задержками (bad lags).

Поэтому важной проблемой является поиск зондирующих сигналов, минимизирующих количество плохих и пропущенных задержек. Нахождение оптимальных зондирующих сигналов, максимально сдвигающих пропущенные задержки в область высоких задержек корреляционной функции, рассматривалось нами в работе [9]. Эти сигналы в настоящее время используются на радаре ЕКВ.

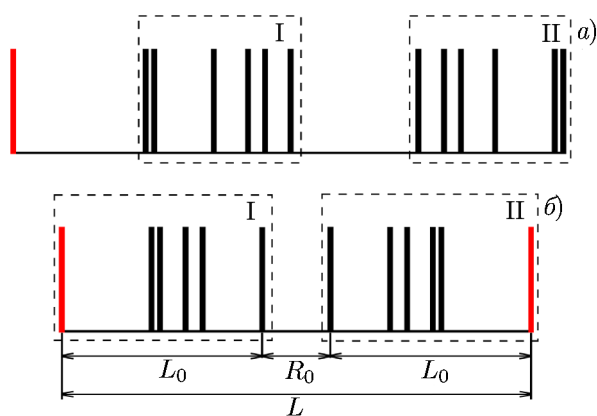


Рис. 1. Структура последовательности tauscan [8] (а) и симметричной последовательности, построенной из 6-импульсной подпоследовательности (б). Красным помечены импульсы, которые могут использоваться для расчёта профиля мощности, цифрой I отмечена прямая подпоследовательность, цифрой II — обратная

ци неоднородностей порядка 40 мс [8]. Существенное внимание в работе [8] уделялось эффективному повышению временного разрешения за счёт использования значений АКФ на малых задержках, при накоплении которых есть возможность эффективного накопления сигнала. Значения АКФ на больших задержках, определяемых полной длиной последовательности, получают с меньшим накоплением (и худшим временным разрешением). Эти значения АКФ в работе [8] не анализировались.

Рассмотрим вопрос сокращения количества пропущенных и плохих задержек. Для этого формализуем задачу выбора оптимального зондирующего сигнала, используя последовательность, предложенную в работе [8]. В основе этой последовательности лежит пара взаимно-симметричных линеек Голомба, разделённых промежутком.

Как показал предварительный анализ, построение таких последовательностей можно упростить и формализовать. Очевидно, что дополнительный импульс для вычисления профиля (рис. 1а, красный импульс) не обязателен, поскольку для измерений достаточно, чтобы в по-

В работе [8] традиционный метод построения зондирующих последовательностей на основе линеек Голомба [3] был расширен с учётом особенностей функционирования радаров Super-DARN. В основу построения новых зондирующих последовательностей положен принцип дополнения последовательности её обращённым во времени вариантом и добавления одного импульса в начале для определения профиля мощности рассеянного сигнала. Полученная в результате 13-импульсная последовательность, состоящая из двух последовательных 6-импульсных последовательностей и одного предшествующего импульса приведена на рис. 1а.

При анализе сигналов, полученных зондированием такой 13-импульсной последовательностью, учитывается лишь малая часть точек АКФ, соответствующая области задержек  $0, \dots, 17$ , что соответствует временам корреля-

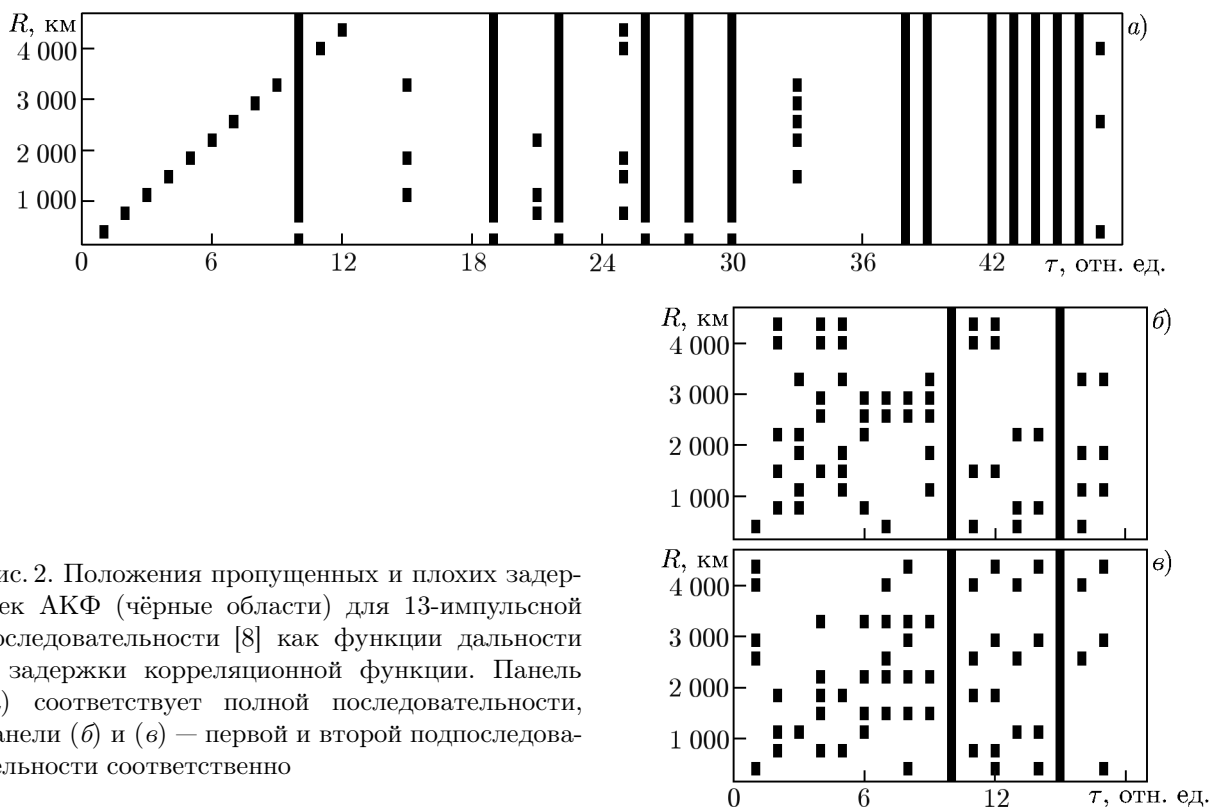


Рис. 2. Положения пропущенных и плохих задержек АКФ (чёрные области) для 13-импульсной последовательности [8] как функции дальности и задержки корреляционной функции. Панель (а) соответствует полной последовательности, панели (б) и (в) — первой и второй подпоследовательности соответственно

следовательности были импульсы, допускающие измерение профиля. Это требование достаточно легко формализуется [9] как поиск в последовательности импульса, наиболее удалённого от соседних (рис. 1б, красные импульсы). Если такое расстояние больше заданного (определяемого требуемой максимальной дальностью работы радара), то этот импульс может быть использован для получения профиля мощности рассеянного сигнала, и влияние на полученный профиль мощности сигналов рассеяния от соседних импульсов будет пренебрежимо мало. Таким образом, при формировании последовательности можно обойтись без дополнительного начального импульса и тем самым эффективно укоротить её, увеличив эффективность накопления, требуемого для получения средней корреляционной функции.

На рис. 2 точками показано положение плохих и пропущенных задержек в зависимости от радиолокационной дальности для 13-импульсной последовательности, рассмотренной в работе [8]. Рисунки 2б, в соответствуют использованию только половины импульсов в последовательности (импульсов 2–7 и 8–13), которые соответствуют взаимно-симметричным линейкам Голомба. Вертикальные полосы отвечают пропущенным задержкам, а отдельные точки — плохим задержкам.

Использование пары последовательностей приводит к тому, что для каждой задержки корреляционной функции на каждой дальности существует несколько измерений значения этой функции. Основные правила получения итоговой корреляционной функции в этом случае формулируются аналогично [8]:

- 1) для построения итоговой корреляционной функции для каждой задержки и радиолокационной дальности использовать усреднённое значение по тем значениям корреляционной функции, для которых эта задержка на этой дальности не является плохой или пропущенной;
- 2) если для всех вариантов корреляционной функции на заданной задержке и дальности присутствует плохая задержка, то эта задержка является плохой для этой задержки и дальности.

На рис. 2а точками показано положение плохих и пропущенных задержек корреляционной

функции в зависимости от радиолокационной дальности для 13-импульсной последовательности [8], построенное в соответствии с этими принципами.

Из рис. 2а видно, что количество плохих задержек с использованием данной обработки может быть существенно уменьшено по сравнению с одиночной 6-импульсной последовательностью (рис. 2б, в), а также могут быть восстановлены значения корреляционной функции для некоторых пропущенных задержек (например 10-ая задержка, соответствующая расстоянию между последовательностями в новом коде, отмеченному  $R_0$  на рис. 1).

Кроме того, из рис. 2а также видно, что существуют задержки, которые превышают длину элементарной линейки Голомба, но не являются плохими и пропущенными. Использование этих значимых точек корреляционной функции также позволяет эффективно повысить спектральное разрешение метода. Далее мы будем называть такие задержки перекрёстными, поскольку они соответствуют расстояниям между импульсами первой и второй подпоследовательностей.

Таким образом, исследуемый нами класс последовательностей составлен из двух взаимно-симметричных последовательностей, соответствующих линейкам Голомба, разделённых некоторым временным промежутком. Общий вид последовательности приведён на рис. 1б.

Для оценки степени оптимальности такой последовательности найдём ожидаемое максимально возможное количество определяемых задержек в корреляционной функции. Задержки разделяются на два типа: задержки, определяющиеся по импульсам одиночной подпоследовательности, и задержки, определяющиеся по импульсам, находящимся в разных подпоследовательностях.

Количество  $L_1$  задержек, определяющихся по одиночной подпоследовательности (прямые задержки), определяется количеством уникальных неупорядоченных пар, составленных из  $N$  импульсов, и равно

$$L_1 = \frac{N(N-1)}{2}. \quad (1)$$

При этом прямая и обратная последовательности вследствие симметрии дают идентичный набор определяемых задержек, поэтому каждой такой задержке может соответствовать два значения корреляционной функции.

Количество  $L_2$  задержек, определяющихся по двум последовательностям (перекрёстные задержки), определяется количеством уникальных неупорядоченных пар, таких, что один из импульсов принадлежит первой последовательности, а другой — второй:

$$L_2 = \frac{N(N+1)}{2}. \quad (2)$$

При этом часть задержек уникальна и соответствует расстоянию между идентичными симметричными импульсами в подпоследовательностях (поэтому их число равно  $N$ ); на этих задержках можно получить только одно измерение корреляционной функции сигнала. Остальные задержки вследствие симметрии прямой и обратной последовательности проводят идентичный набор определяемых задержек, поэтому каждой такой задержке может соответствовать два значения корреляционной функции.

На тех задержках, где возможно измерение двух значений корреляционной функции, эффективность накопления может быть улучшена использованием описанного ранее усреднения. Именно это свойство позволяет эффективно повысить временное разрешение метода [8] на последовательностях данного класса зондирующих сигналов.

Таким образом, полное количество  $L_S$  определяемых задержек равно

$$L_S \leq L_1 + L_2 = N^2, \quad (3)$$

причём  $N$  из них соответствуют одно значение корреляционной функции, а остальным — два.

Следует заметить, что в некоторых случаях часть задержек, входящих в  $L_1$  и  $L_2$ , может совпадать, поэтому для величины  $L_S$  значение  $N^2$  является максимально возможным. Очевидно, что если расстояние  $R_0$  между подпоследовательностями больше длины подпоследовательности  $L_0$ , то все задержки, входящие в  $L_1$  и  $L_2$ , не совпадают, и величина  $L_S$  принимает своё максимальное значение  $N^2$  (3).

Можно предположить, что для каждой симметричной подпоследовательности существуют расстояния  $R_0$  между подпоследовательностями, меньшие длины одиночной последовательности  $L_0$ , при которых количество определяемых задержек  $L_S$  также достигает  $N^2$ . Такие расстояния  $R_0$  мы будем далее называть оптимальными. На рис. 3 приведён пример зависимости количества уникальных определяемых задержек  $L_S$  от расстояния между одиночными последовательностями  $R_0$ . Зависимость получена для последовательности, построенной на основе стандартного 7-импульсного кода вида (0, 9, 12, 20, 22, 26, 27) — базовой последовательности с длительностью 27, используемой на радарх SuperDARN [10]. Из рис. 3 видно, что при расстоянии  $R_0 = 23$  количество определяемых задержек достигнет теоретического эффективного максимума 49.

В работе [9] было показано, что при построении зондирующих последовательностей удобно использование такого параметра, как первая пропущенная задержка в корреляционной функции (далее — первая пропущенная задержка, first missed lag,  $L_{FM}$ ). Поиск последовательностей, максимизирующих этот параметр, позволяет найти зондирующие последовательности, обладающие наиболее высоким «чистым» спектральным разрешением, позволяющим получать спектр сигнала из первых  $L_{FM} - 1$  задержек корреляционной функции без введения дополнительных аппроксимаций. Предполагается, что использование параметра  $L_{FM}$  в этой задаче также позволит найти оптимальные для зондирования последовательности. Очевидно, что основным требованием к использованию второй (дополнительной) последовательности является требование неухудшения чистого спектрального разрешения, т. е.  $L_{FM,S}$  для симметричной последовательности должна быть больше, чем  $L_{FM,1}$  для одиночной подпоследовательности.

Таким образом, будем называть квазиоптимальной последовательность, составленную из двух одиночных взаимно-симметричных подпоследовательностей, полученных по линейкам Голomba, если для неё одновременно выполняются два следующих условия:

1)  $L_{FM,S} > L_{FM,1}$  (первая пропущенная задержка симметричной последовательности больше первой пропущенной задержки одиночной подпоследовательности);

2)  $L_S = N^2$ ,  $R_0 < L_0$  (прямая и обратная одиночные подпоследовательности разнесены на оптимальное расстояние  $R_0$ , не превышающее длины одиночной подпоследовательности, и количество определяемых задержек  $L_S$  максимально возможное ( $N^2$ )).

Множество линеек Голomba бесконечно, поэтому в основе поиска квазиоптимальных последовательностей лежит полный перебор вариантов только по набору оптимальных и почти оптимальных линеек Голomba, приведённых в базе [15], в соответствии с выбранными выше критериями. Такой метод впервые был предложен и реализован в работе [9] при поиске оптимальных

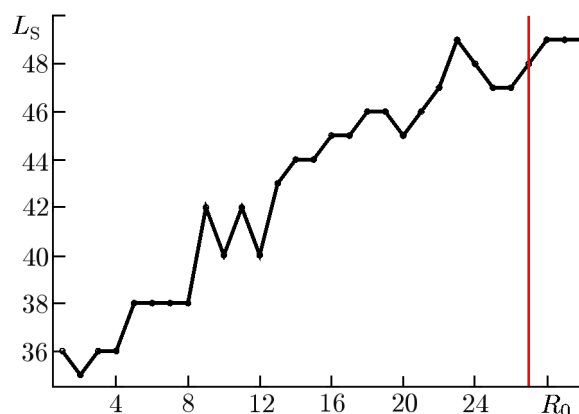


Рис. 3. Пример зависимости количества уникальных определяемых задержек  $L_S$  симметричной последовательности от расстояния  $R_0$  между подпоследовательностями. Расчёт сделан для подпоследовательности в виде стандартной 7-импульсной последовательности, используемой в радарх SuperDARN [10]. Вертикальная линия соответствует расстоянию  $R_0$ , равному длине подпоследовательности

последовательностей класса линеек Голомба и показал свою эффективность.

Для каждого заданного  $N \in [6, \dots, 20]$  были перебраны все оптимальные и почти оптимальные линейки Голомба, из которых были составлены симметричные пары, и для каждого расстояния между парами  $R_0 < L_0$  была рассчитана первая пропущенная задержка симметричной последовательности ( $L_{FM,S}$ ). При сравнении её с первой пропущенной задержкой одиночной последовательности ( $L_{FM,1}$ ) были найдены все квазиоптимальные последовательности (т. е. последовательности, удовлетворяющие всем критериям квазиоптимальности, приведённым выше).

В табл. 1 приведены все квазиоптимальные последовательности, полученные нами для одиночных подпоследовательностей с количеством импульсов  $6 \div 9$ . Для большего количества импульсов  $N > 9$  квазиоптимальных последовательностей найдено не было, что, по-видимому, связано с отсутствием последовательностей, обеспечивающих достаточно малый  $R_0$  (условие 2 критерия квазиоптимальности) и, возможно, с малым количеством линеек Голомба, использованных для перебора (использовались только оптимальные и почти оптимальные линейки).

Найденные последовательности упорядочены в порядке убывания  $L_{FM,S}$ . Таким образом, последовательности, обеспечивающие наилучшее «чистое» спектральное разрешение для заданного  $N$ , расположены сверху. В табл. 1 также приведена первая пропущенная задержка одиночной подпоследовательности  $L_{FM,1}$ .

Для выбора оптимальной последовательности вследствие большого количества квазиоптимальных последовательностей требуется введение дополнительного критерия отбора. Одним из таких критериев является упомянутая выше необходимость эффективного использования построенной зондирующей последовательности для оценки профиля мощности сигнала. Именно реализация этого режима потребовала добавления 13-го импульса в симметричную последовательность [8]. Поскольку нашей целью является создание последовательностей, не уступающих 13-импульсной, потребуем, чтобы в оптимальной последовательности присутствовал импульс, допускающий определение профиля мощности рассеянного сигнала до достаточно большой дальности. Положение такого импульса определяется условием максимальной дальности межимпульсной помехи: соседние импульсы должны отстоять как можно дальше от этого импульса, чтобы рассеянный сигнал, вызванный ими, не влиял на сигнал, рассеянный от основного импульса. В работе [9] было сформулировано условие поиска такого импульса как принцип минимакса:

$$N_{CF} = \max \left\{ \begin{array}{l} \min(P_{i+1} - P_i, P_i - P_{i-1}); \quad i \in [2, 2N - 1] \\ P_2 \\ P_{2N} - P_{2N-1} \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Здесь  $P_i$  — положение  $i$ -го импульса,  $P_1 = 0$ . При этом можно найти расстояние, свободное от межимпульсных помех (clutter free distance),  $D_{CF}$ :

$$D_{CF}[\text{км}] = 360N_{CF}[\text{км}]. \quad (5)$$

Таким образом, можно определить оптимальную последовательность как такую квазиоптимальную последовательность, которая обеспечивает максимальное расстояние  $D_{CF}$ , свободное от межимпульсной помехи. Найденные оптимальные импульсные последовательности приведены в табл. 2.

Кроме дальности, свободной от межимпульсных помех, которая определяет максимальную дальность работы радара в режиме измерения профиля мощности рассеянного сигнала, для каждой оптимальной последовательности была рассчитана её эффективность (в смысле отношения числа хороших задержек к максимальной задержке АКФ  $\xi_0 = M/L$  и в смысле отношения первой пропущенной задержки к максимальной задержке АКФ  $\xi = L_{FM}/L$ ).



Таблица 1. Квазиоптимальные симметричные последовательности, построенные на основе оптимальных и почти оптимальных линеек Голомба с  $N \in [6, \dots, 20]$ . Здесь  $N$  — количество импульсов в подпоследовательности,  $R_0$  — расстояние между прямой и обратной подпоследовательностями,  $M$  — количество определяемых задержек,  $L$  — длина последовательности (максимальная определяемая задержка),  $L_{FM,S}$  — первая пропущенная задержка симметричной последовательности,  $L_{FM,1}$  — первая пропущенная задержка подпоследовательности

$N$	Позиции импульсов	$R_0$	$M$	$L$	$L_{FM,S}$	$L_{FM,1}$
6	0 10 11 14 16 23 31 38 40 43 44 54	8	36	54	18	8
6	0 5 6 8 15 19 31 35 42 44 45 50	12	36	50	17	12
6	0 4 11 13 14 19 31 36 37 39 46 50	12	36	50	16	12
6	0 1 7 9 12 22 26 36 39 41 47 48	4	36	48	16	4
6	0 2 7 8 11 21 33 43 46 47 52 54	12	36	54	15	12
6	0 7 9 12 13 23 31 41 42 45 47 54	8	36	54	15	8
6	0 4 9 10 12 23 30 41 43 44 49 53	7	36	53	15	7
6	0 1 8 11 13 17 31 35 37 40 47 48	14	36	48	15	14
6	0 1 4 10 12 17 31 36 38 44 47 48	14	36	48	15	14
6	0 1 7 11 20 23 25 28 37 41 47 48	2	36	48	15	2
6	0 3 4 9 11 21 34 44 46 51 52 55	13	36	55	14	13
6	0 7 8 11 13 23 32 42 44 47 48 55	9	36	55	14	9
6	0 2 7 10 11 23 29 41 42 45 50 52	6	36	52	14	6
6	0 2 3 8 12 19 32 39 43 48 49 51	13	36	51	14	13
6	0 3 4 10 12 23 28 39 41 47 48 51	5	36	51	14	5
6	0 1 3 7 12 20 30 38 43 47 49 50	10	36	50	14	10
6	0 1 3 8 12 18 31 37 41 46 48 49	13	36	49	14	13
7	0 5 8 9 15 26 28 40 42 53 59 60 63 68	12	49	68	22	12
7	0 1 5 7 15 18 27 43 52 55 63 65 69 70	16	49	70	19	16
7	0 2 6 7 16 19 27 42 50 53 62 63 67 69	15	49	69	18	15
7	0 4 6 7 16 21 29 40 48 53 62 63 65 69	11	49	69	18	11
7	0 1 7 9 12 22 26 42 46 56 59 61 67 68	16	49	68	18	16
8	0 4 5 17 19 25 28 35 57 64 67 73 75 87 88 92	22	64	92	26	22
8	0 6 7 10 15 26 28 40 57 69 71 82 87 90 91 97	17	64	97	23	17
8	0 4 11 20 25 26 28 38 57 67 69 70 75 84 91 95	19	64	95	23	19
8	0 1 6 10 13 21 38 40 54 56 73 81 84 88 93 94	14	64	94	22	14
8	0 2 3 10 16 28 33 37 48 52 57 69 75 82 83 85	11	64	85	22	11
9	0 4 10 11 19 31 33 36 49 73 86 89 91 103 111 112 118 122	24	81	122	28	24

Оба параметра характеризуют эффективность работы радара в этом режиме. Параметр  $\xi_0$  показывает, насколько эффективно используется цикл работы радара для получения результативных точек на корреляционной функции: чем выше  $\xi_0$ , тем больше информации можно извлечь из радара за единицу времени его работы. Параметр  $\xi$  определяет эффективность «чистых» спектральных измерений — относительное количество точек на корреляционной функции, по которым можно оценить спектр рассеянного сигнала без дополнительных предположений о форме корреляционной функции и без её аппроксимации между пропущенными задержками. Соответственно, чем выше параметр  $\xi$ , тем более точную информацию о спектре неоднородностей можно получить за единицу времени работы радара. При сравнении последовательностей лучше выбирать последовательность с наиболее высоким значением  $\xi_0$ , что позволяет наиболее эффективно использовать время работы радара для получения ионосферных данных. При всех прочих (включая  $\xi_0$ ) равных параметрах для одинакового количества импульсов надо выбирать последовательность с более высоким  $\xi$ . Звёздочками в табл. 2 отмечены оптимальные последовательности, у которых все характеристики эффективности максимальны. Как видно из табл. 2, для каждого количества

Таблица 2. Квазиоптимальные симметричные последовательности, способные эффективно измерять профиль мощности сигнала. Звёздочкой обозначены оптимальные последовательности. Здесь  $N$  — количество импульсов в подпоследовательности,  $M$  — количество определяемых задержек,  $L$  — длина последовательности (максимальная определяемая задержка),  $L_{FM,S}$  — первая пропущенная задержка симметричной последовательности,  $\xi_0 = M/L$  — эффективность последовательности по полному количеству задержек,  $\xi = L_{FM,S}/L$  — эффективность последовательности по величине первой пропущенной задержки,  $N_p$  — положение импульсов, используемых для определения профиля мощности,  $N_{CF}$  — минимаксное расстояние до соседних импульсов,  $D_{CF}$  — дистанция, свободная от межимпульсных помех (для межимпульсного дискрета последовательности 2,4 мс)

$N$	Позиции импульсов	$M$	$L$	$L_{FM,S}$	$\xi_0$	$\xi$	$N_p$	$N_{CF}$	$D_{CF}$ , км
6*	0 10 11 14 16 23 31 38 40 43 44 54	36	54	18	0,66	0,33	0; 54	10	3 600
6	0 2 7 8 11 21 33 43 46 47 52 54	36	54	15	0,66	0,27	21; 33	10	3 600
6	0 3 4 9 11 21 34 44 46 51 52 55	36	55	14	0,65	0,25	21; 34	10	3 600
7*	0 1 5 7 15 18 27 43 52 55 63 65 69 70	49	70	19	0,70	0,27	27; 43	9	3 240
8*	0 6 7 10 15 26 28 40 57 69 71 82 87 90 91 97	64	97	23	0,65	0,23	40; 57	12	4 320
9*	0 4 10 11 19 31 33 36 49 73 86 89 91 103 111 112 118 122	81	122	28	0,66	0,22	49; 73	13	4 680

импульсов вплоть до  $N = 9$  в подпоследовательности существует оптимальная последовательность.

Из табл. 2 видно, что все полученные последовательности обладают примерно одинаковой эффективностью по полному числу определяемых задержек  $\xi_0$  в области  $0,65 \div 0,70$  и небольшими максимумами по  $\xi$  для 12-импульсной и 14-импульсной последовательности ( $N = 6; 7$ ).

Существенных отличий в характеристиках для различных последовательностей, приведённых в табл. 2, не наблюдается. Поскольку 16-элементная последовательность (8+8) является наиболее короткой последовательностью, обеспечивающей  $D_{CF} > 4000$  км (это требуемая на сегодня дальность функционирования радара ЕКВ), она обеспечит оптимальное временное разрешение при исследовании этого диапазона дальностей, поэтому для дальнейшей экспериментальной проверки методики использовалась именно она.

Для сравнения в табл. 3 приведены положения импульсов в зондирующих последовательностях: стандартного 7-импульсного кода [10], 8-импульсной последовательности katscan [7], 13-импульсной последовательности tauscan [8], оптимальной 10-импульсной последовательности [9] и новой последовательности 8+8. В табл. 3 приведена как полная длина последовательности, так и положение первой плохой задержки в корреляционной функции.

Из табл. 3 видно, что построенная нами последовательность превосходит по плотности задержек в корреляционной функции  $\xi_0$  13-импульсную и 8-импульсную последовательности, хотя и уступает им по эффективной дальности зондирования. Из всех последовательностей она уступает 10-импульсной по параметру  $L_{FM}$  (это означает, что «чистое» спектральное разрешение у неё ниже) и традиционной 7-импульсной по плотности заполнения ( $\xi, \xi_0$ ), но существенно лучше них по параметру  $L$ , определяющему максимально возможное спектральное разрешение. Таким образом, в задачах, требующих повышения спектрального разрешения, разработанная симметричная последовательность 8+8 выглядит более эффективной, чем остальные последовательности, применяемые на радарх SuperDARN и аналогичных им.

Таблица 3. Сравнительные характеристики зондирующих последовательностей: стандартного 7-импульсного кода [10], 8-импульсной последовательности katscan [7], 13-импульсной последовательности tauscan [8], оптимальной 10-импульсной последовательности [9] и новой симметричной последовательности 8+8

$N$	Позиции импульсов	$M$	$L$	$L_{FM}$	$\xi_0$	$\xi$	$N_p$	$N_{CF}$	$D_{CF}$ , км
7	0 9 12 20 22 26 27	21	27	16	0,78	0,59	0	9	3240
8	0 14 22 24 27 31 42 43	28	43	6	0,65	0,14	0	14	5040
10	0 1 6 10 23 26 34 41 53 55	45	55	36	0,82	0,65	34	7	2520
13	0 15 16 23 27 29 30 45 48 50 54 61 62	15	62	10	0,24	0,16	0	15	4680
8+8	0 6 7 10 15 26 28 40 57 69 71 82 87 90 91 97	64	97	23	0,66	0,24	40; 57	12	4320

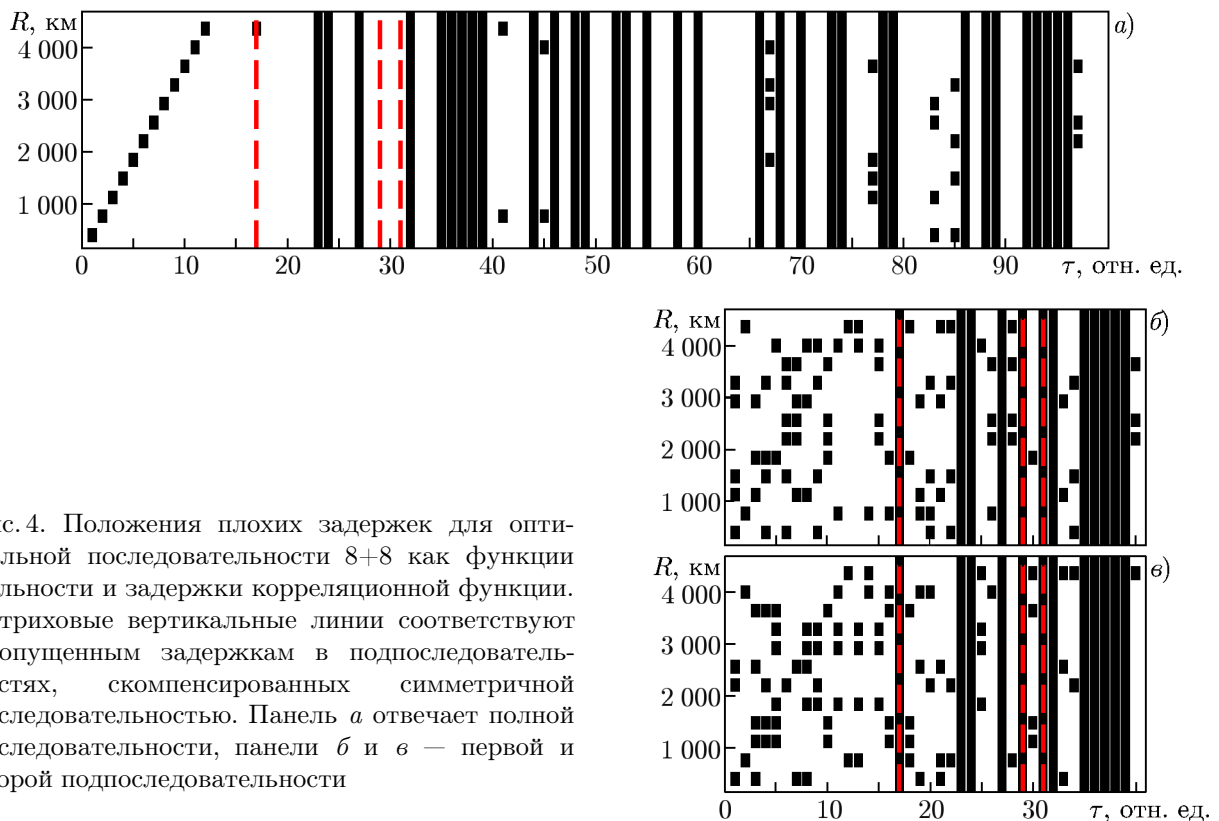


Рис. 4. Положения плохих задержек для оптимальной последовательности 8+8 как функции дальности и задержки корреляционной функции. Штриховые вертикальные линии соответствуют пропущенным задержкам в подпоследовательностях, скомпенсированных симметричной последовательностью. Панель *a* отвечает полной последовательности, панели *b* и *в* — первой и второй подпоследовательности

На рис. 4 приведено распределение положения плохих задержек для оптимальной последовательности 8+8 как функции дальности и задержки корреляционной функции (в единицах элементарного дискрета  $\tau = 2400$  мкс). Из сравнения рис. 4*б* и *в* видно, что плохие задержки в обеих одиночных подпоследовательностях в большинстве случаев не совпадают. Это позволяет при анализе каждой дальности получить минимум одну хорошую задержку (по которой может быть вычислена корреляционная функция) при построении корреляционной функции на задержках меньшей длительности одиночной подпоследовательности.

Из сравнения рис. 4*а*, *б* и *в* также видно, что часть пропущенных задержек — задержки 17, 29, 31, выделенные пунктирной линией, — может быть скомпенсирована. Первая задержка компенсируется расстоянием  $R_0$  между зондирующими последовательностями (между импульсами с положениями 40 и 57), вторая и третья — парами импульсов (40, 69 или 20, 57) и (40, 71 или 26,

57) соответственно. Кроме того, из рис. 4а видно, что учёт всех перекрёстных задержек позволяет получить большое количество значащих задержек корреляционной функции на всей длине последовательности. Это даёт возможность проводить измерение параметров корреляционной функции рассеивающих неоднородностей на временах жизни, больших длительности одиночной подпоследовательности.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Для проверки возможностей радара при использовании новых импульсных последовательностей нами была проведена модернизация программного обеспечения радара ЕКВ [2] и первые пробные эксперименты. На рис. 5 приведены корреляционные функции различных типов принятых радаром сигналов при зондировании с использованием полученной в работе симметричной последовательностью 8+8.

На рис. 5а, б красные точки соответствуют АКФ, рассчитанной по первой 8-импульсной подпоследовательности, зелёные — АКФ, вычисленной по второй 8-импульсной подпоследовательности, а синие — перекрёстным задержкам между импульсами первой и второй подпоследовательностей. На рис. 5а, в, д, жс представлен модуль АКФ, а на рис. 5б, г, е, з — фаза АКФ.

На рис. 5а, б приведён пример АКФ сигналов, рассеянных от земной поверхности, на рис. 5в, г — пример АКФ сигналов ионосферного рассеяния. Рисунки 5д, е соответствуют сигналу неопознанного нами типа. На рис. 5жс, з приведён пример АКФ сигнала метеорного эха; отличия в модуле корреляционной функции, измеренной разными подпоследовательностями, могут быть связаны с малым временем жизни метеорного следа, сравнимым с длиной последовательности. Из рис. 5 видно, что с помощью этой последовательности АКФ действительно может быть эффективно измерена до задержек порядка  $220 \div 230$  мс. При этом и модуль, и фаза сигнала ведут себя достаточно устойчиво для оценки спектральной ширины доплеровского смещения ионосферного отражения. В случаях, когда время жизни неоднородностей достаточно велико, фаза и амплитуда на больших задержках сохраняют необходимую преемственность с значениями на малых задержках. Следует заметить, что наиболее информативной для вычислений формы спектра рассеянного сигнала является та часть АКФ, для которой существенны значения модуля корреляционной функции.

Вертикальными линиями на рис. 5 обозначены максимальные задержки, которые способны определять другие последовательности — 7-элементная и 13-элементная. Из рис. 5а, б и д-з видно, что при зондировании стандартным 7-импульсным кодом [10] или 13-элементной последовательностью *tauscap* [8], область анализа которых составляет около 50 мс, по результатам зондирования невозможно оценить форму корреляционной функции в случае анализа сигналов с большим временем жизни (традиционно это в основном сигналы, рассеянные земной поверхностью [13], долгоживущими неоднородностями *E*-слоя, связанные с неустойчивостями Фарлея—Бунемана или метеорным эхом). Вероятно, что в таком случае процедура *FitACF*, определяющая спектральную ширину, даст спектральную ширину, сравнимую с точностью процедуры. Однако при использовании новой зондирующей последовательности и полной области анализа 200 мс видно, что рассеянный сигнал узкополосен и имеет характерное (хотя и действительно большое) время жизни, которое можно рассчитать.

На рис. 5д, е видно влияние плохих задержек на АКФ. На рис. 5д такие точки проявляются, как области, где мощность резко приближается к нулю. Эти точки появляются в результате закрытия приёмника во время излучения. Если посмотреть на значимые точки АКФ, то видно, что она остаётся достаточно плавно меняющейся в областях появления плохих задержек, что позволяет использовать значения корреляционной функции для анализа и подгонки практически

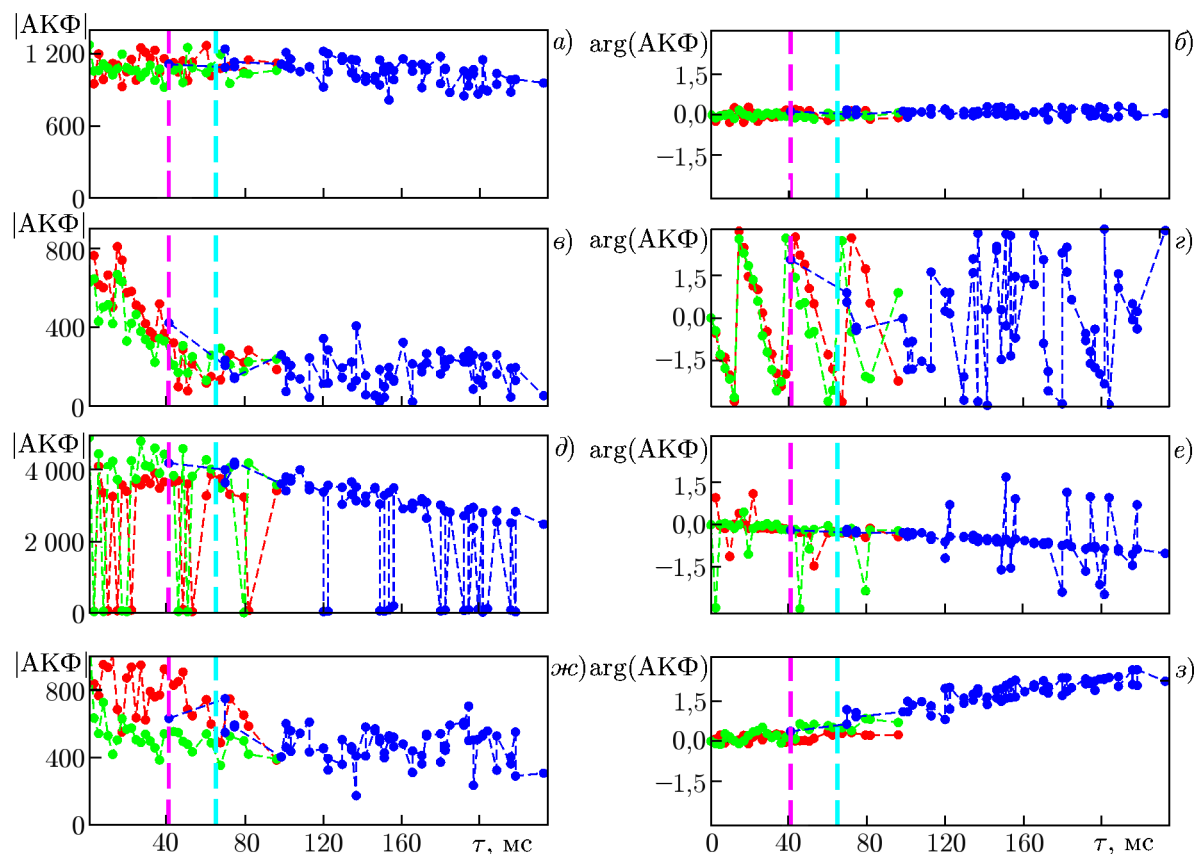


Рис. 5. Примеры корреляционных функций, измеренных на радаре ЕКВ при зондировании симметричной последовательностью. Панели *а, б*: сигналы, рассеянные от земной поверхности; *в, г*: сигналы ионосферного рассеяния; *д, е*: сигналы неопознанного типа; *ж, з*: сигналы рассеяния на метеорных следах. Красные точки соответствуют АКФ, рассчитанной по 1-й подпоследовательности, зелёные — АКФ, рассчитанной по 2-й подпоследовательности, а синие — АКФ, рассчитанной на перекрёстных задержках. Вертикальными линиями обозначены максимальные задержки, которые способны определять различные последовательности: 7-импульсная (розовая штриховая линия) и 13-импульсная (голубая штриховая линия). Межимпульсный дискрет составляет 2,4 мс

на всех задержках, включая перекрёстные, за исключением плохих и пропущенных задержек.

На рис. 5*в, г* приведён пример корреляционной функции в случае часто наблюдаемого ионосферного рассеяния — широкополосного сигнала с высоким доплеровским смещением. Ширина спектра такого сигнала значительно больше ширины спектра сигналов, рассеянных от земной поверхности, и модуль АКФ спадает значительно быстрее. Особенно это заметно по фазе сигнала, которая после 70 мс становится хаотичной из-за недостаточно высокого значения модуля корреляционной функции. Исследование таких неоднородностей стандартными зондирующими последовательностями даст близкий результат, что и обосновывает высокую информативность существующей сети радаров SuperDARN и аналогичных им радаров на высоких широтах, где именно этот тип рассеянных сигналов встречается чаще всего.

На рис. 6 чёрной линией показаны два спектра, полученные при зондировании рассматриваемой последовательностью. Красными линиями приведены спектры сигналов стандартной 7-импульсной последовательности, полученные на той же дальности в близкое время. На спектрах хорошо просматриваются двухмодовые структуры [16], которые возникают при одновременном отражении от двух областей неоднородностей, расположенных на близком расстоянии. Из рис. 6*а*,

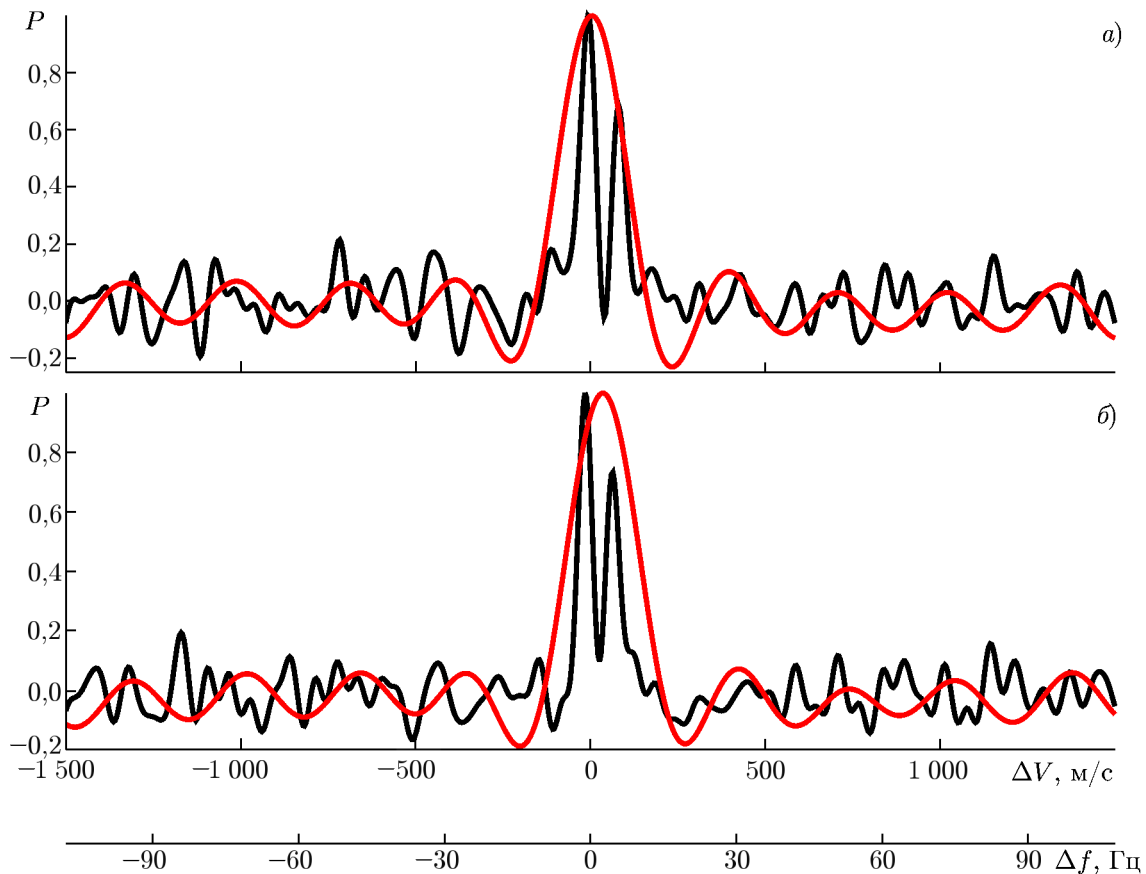


Рис. 6. Примеры двухмодовых спектров  $P$  рассеянного сигнала, измеренных последовательно 8+8 (чёрные линии). Красными линиями показаны спектры, измеренные стандартной 7-импульсной последовательностью, полученные на той же дальности в близкое время ( $\Delta V$  — спектральное смещение в единицах скорости,  $\Delta f$  — спектральное смещение в единицах частоты)

б) видно, что спектральное разрешение обычных последовательностей SuperDARN не позволяет детально различить подобные типы сигналов и поэтому требует использования более сложных методик спектрального анализа [10], не всегда обоснованных физически.

Таким образом, использование разработанных нами последовательностей позволяет обрабатывать широкий класс сигналов, учитывая особенности каждого из них. Дополнительным достоинством симметричных последовательностей является возможность их эффективного накопления — из  $N^2$  возможных задержек только  $N$  задержек уникальны, а остальные являются парными, что позволяет усреднять значения корреляционной функции и почти в 2 раза сократить необходимое для оценки ионосферных параметров число накопленных сеансов зондирования.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках расширения и обобщения методики, описанной в работе [8], предложены зондирующие последовательности, описываемые парной комбинацией взаимно-симметричных линеек Голомба с длительностью от 12 до 18 импульсов. Последовательности представляют собой пару идентичных взаимно-симметричных во времени подпоследовательностей, разнесённых по задержке. Проведённый анализ показал, что дополнительный импульс, используемый ранее в работе [8] для измерения профиля мощности рассеянного сигнала, не является необходимым. В по-

строенных нами последовательностях его функции выполняет один из импульсов симметричной последовательности. Это позволяет сократить длительность зондирующей последовательности без ухудшения её спектрального разрешения.

Поиск оптимальной подпоследовательности и расстояния между подпоследовательностями проводится методом полного перебора в классе оптимальных и почти оптимальных линеек Голломба. Критерием выбора является условие оптимизации набора критериев для обеспечения максимальной информативности полученного сигнала в смысле высокого «чистого» спектрального разрешения при минимальном времени накопления, а также требование эффективности измерения профиля мощности рассеянного сигнала.

Показано, что полученные последовательности позволяют уменьшить количество плохих задержек в корреляционной функции, вызванных запирающим приёмником на время работы передатчика, а также пропущенных задержек, связанных с несовершенностью используемых линеек Голломба. Эти последовательности дают возможность повышения спектрального разрешения оценки ионосферных параметров без существенных потерь во временном разрешении. Таким образом, описанные зондирующие последовательности позволяют использовать все принципиальные преимущества методики, описанной в работе [8], но с дополнительным улучшением спектрального разрешения.

На базе российского когерентного радара декаметрового диапазона ЕКВ проведены первые эксперименты по зондированию ионосферы такими последовательностями и продемонстрирована их работоспособность для изучения разнообразных рассеянных сигналов. Из полученных нами результатов видно, что время жизни неоднородностей при этом может достигать 200 мс, что и требует использования предложенных длинных зондирующих последовательностей для корректной обработки экспериментальных данных.

Работа подготовлена при частичной финансовой поддержке программы Президиума РАН No 56 «Фундаментальные основы прорывных технологий в интересах национальной безопасности». Функционирование радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН осуществляется при поддержке программы фундаментальных исследований государственных академий наук П.12.2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chisham G., Lester M., Milan S. E., et al. // *Surveys Geophys.* 2007. V. 28, No. 1. P. 33.
2. Бернгардт О. И., Кутелев К. А., Куркин В. И. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2015. Т. 58, № 6. С. 433.
3. Farley D. T. // *Radio Sci.* 1972. V. 7, No. 6. P. 661.
4. Sulzer M. P. // *Radio Sci.* 1986. V. 21, No. 6. P. 1033.
5. Lehtinen M. S., Haggstrom I. // *Radio Sci.* 1987. V. 22, No. 4. P. 625.
6. Uppala S. V., Sah J. D. // *Radio Sci.* 1994. V. 29, No. 3. P. 611.
7. Ribeiro A. J., Ruohoniemi J. M., Ponomarenko P. V., et al. // *Radio Sci.* 2013. V. 48, No. 3. P. 274.
8. Greenwald R. A., Oksavik K., Barnes R., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, No. 3. Art. no. L03111.
9. Berngardt O. I., Voronov A. L., Grkovich K. V. // *Radio Sci.* 2015. V. 50, No. 6. P. 486.
10. Barthes L., André R., Cerisier J.-C., et al. // *Radio Sci.* 1998. V. 33. P. 1005.
11. Blanchard G. T., Sundeen S., Baker K. B. // *Radio Sci.* 2009. V. 44, No. 5. Art. no. RS5012.
12. Ribeiro A. J., Ruohoniemi J. M., Baker J. B. H., et al. // *Radio Sci.* 2011. V. 46. Art. no. RS4011.
13. Lavygin I. A., Berngardt O. I., Lebedev V. P., et al. // *IET Radar, Sonar & Navigation.* 2020. V. 14, No. 1. P. 167.

14. Spaleta J., Bristow W., Parris R. T., et al. // Proc. SuperDARN 2008 Annual Meeting, Newcastle, Australia, 01–06 June, 2008.  
<http://www.tiger.latrobe.edu.au/superdarn2008/procCD/presentations/1070.pdf>
15. <http://www.feiri.de/ogr/nearopt.html>
16. Schiffler A. SuperDARN measurements of double-peaked velocity spectra: Diss. ... Ph. D. Saskatoon: University of Saskatchewan, 1996. 157 p.

Поступила в редакцию 31 октября 2019 г.; принята в печать 29 ноября 2019 г.

## SYNTHESIS OF SYMMETRIC SOUNDING SEQUENCES FOR EKATERINBURG COHERENT DECAMETER RADAR

*O. I. Berngardt, K. V. Grkovich, and R. R. Fedorov*

Optimal sounding sequences described by a pair of mutually symmetric Golomb rulers lasting from 12 to 18 pulses were synthesized within the generalization of the previously developed 13-pulse sounding sequence of SuperDARN radars. These sequences are pairs of identical sequences that are mutually symmetric in time, are separated by a lag, and do not contain an additional pulse used earlier to measure the power profile of the scattered signal. The optimal subsequences are sought by exhaustive search over the class of optimal and nearly optimal Golomb rulers. The optimality criterion is provision of the maximum information content of the received signal in the sense of a high spectral resolution with minimum accumulation time, as well as the requirement of its efficiency for measuring the power profile of the scattered signal. The work demonstrated the potential efficiency of one of the constructed signals (16-element one) for spectral measurements using the Ekaterinburg coherent decameter radar.