

УДК 621.03.01

**Спектральный метод подавления боковых лепестков  
автокорреляционной функции длинных псевдослучайных бинарных  
последовательностей**

**Лялин К.С.\*, Хасанов М.С.\*\*, Мелёшин Ю.М.\*\*\*, Кузьмин И.А.\*\*\*\***

*Национальный исследовательский университет*

*«Московский институт электронной техники», площадь Шокина, 1, Москва,*

*Зеленоград, 124498, Россия*

*\*e-mail: [ksl@miee.ru](mailto:ksl@miee.ru).*

*\*\*e-mail: [khaes@yandex.ru](mailto:khaes@yandex.ru)*

*\*\*\*e-mail: [kykymberr@gmail.com](mailto:kykymberr@gmail.com)*

*\*\*\*\*e-mail: [kuzmin.ilya.al@gmail.com](mailto:kuzmin.ilya.al@gmail.com)*

### **Аннотация**

Для получения радиолокационных изображений (РЛИ) высокого качества в авиационной и космической радиосъемке земной поверхности используются сигналы с внутриимпульсной модуляцией. Такой подход позволяет достичь высокого разрешения РЛИ при высоком отношении энергии сигнала к энергии шума. Основным недостатком этого метода является появление боковых лепестков, проявляющееся на РЛИ, как яркие полосы, расходящиеся по дальностной координате от яркой точечной или групповой цели. Этот эффект существенно снижает качество визуального восприятия РЛИ и возможность его автоматической обработки. Типичный динамический диапазон яркостей целей на РЛИ — 90 дБ, при

этом уровень боковых лепестков для сигналов с фазовой манипуляцией с базой 1000-8000 и при использовании согласованной фильтрации лежит в диапазоне -30-40 дБ.

Одним из способов подавления боковых лепестков является несогласованная или квазиоптимальная фильтрация, предполагающая изменение исходных коэффициентов согласованного фильтра для достижения требуемых оптимальных характеристик с некоторой потерей энергии полезного сигнала. В данной работе предлагается метод расчета коэффициентов импульсной характеристики квазиоптимального несогласованного фильтра, позволяющего полностью подавить боковые лепестки в полосе съемки, «вытолкнув» их за границы видимой области РЛИ по дальности. Приведены результаты теоретического анализа, моделирования и проверки на реальных РЛИ.

**Ключевые слова:** фазовая манипуляция, автокорреляционная функция, боковые лепестки, квазиоптимальный фильтр, подавление боковых лепестков, быстрое преобразование Фурье, радиолокационное изображение, радиолокатор с синтезированной апертурой, авиационная и космическая радиосъемка.

## **Введение**

Одним из распространенных способов модуляции зондирующего сигнала в радиолокации является применение фазоманипулированных (ФМ) сигналов, использующих псевдослучайные последовательности. Поскольку

автокорреляционная функция ФМ сигнала обладает высоким для реализуемых задач уровнем боковых лепестков (УБЛ), актуальной проблемой остается выделение полезного сигнала [1] на фоне боковых лепестков и соответственно поиск методов их подавления. В большинстве работ, посвященных подавлению уровня боковых лепестков [2-4] представлены методы подавления боковых лепестков АКФ коротких последовательностей, таких как коды Баркера, максимальная длина которых составляет 13, или M-последовательностей и кодов Голда [5] с малым порядком, задающего полинома. В [6] показан подобный метод для составных кодов Баркера, которые могут иметь практически произвольную длину, однако все представленные методы предлагают использование сложных схем фильтрации, непригодных для алгоритма быстрой свертки. Подобным недостатком также обладает метод, предложенный в [7], который предполагает двухэтапный метод обработки: первым этапом является согласованная фильтрация последовательности, а на втором этапе результат проходит через сложную схему коррекции АКФ. В [8] описан метод подавления боковых лепестков автокорреляционной функции, позволяющий использовать для оптимальной обработки сигнала фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ) с порядком равным длине последовательности. Этот способ хорошо подходит для обработки в реальном времени, т.к. позволяет сэкономить вычислительные мощности. Однако подавление боковых лепестков, обеспечиваемое подобными фильтрами (порядка 3 дБ), не подходит для значительного динамического диапазона яркостей радиолокационного изображения (диапазон которых может превышать 90 дБ [9, 10]). В [11, 12] показаны методы синтеза КИХ-

фильтров для последовательностей произвольной длины, более того метод, используемый в [12], позволяет задавать оконное взвешивание для функции ошибки, тем самым позволяя создавать в выходной последовательности области с нулевыми боковыми лепестками. Основным недостатком этого метода является, как указано в самой работе, ограниченный размер данной области. Актуальным новым направлением является использование ансамбля последовательностей для последующего сложения их АКФ. Одним из возможных решений может быть использование комплементарных последовательностей [13, 14], которые образуют пару взаимовычитаемых в области боковых лепестков АКФ. Другой вариант – использование большего ансамбля последовательностей: например, в [15] доказано, что сумма АКФ всех циклических сдвигов для последовательности, циклическая АКФ, которой равна -1 имеет строго заданную форму и при этом обладает существенно меньшим УБЛ, чем исходная АКФ. В [16,17] показана возможность применения неполных ансамблей циклических сдвигов, а [18,19] применение ортогональных кодов в качестве ансамбля. Не смотря на хорошее подавление УБЛ, обеспечиваемое перечисленными методами, оно зависит от длины используемой последовательности, а также от условий полета (стабильность траектории, эффект Доплера). В настоящей работе описывается новый метод определения ядра квазиоптимального КИХ-фильтра, позволяющего свести к нулю амплитуду боковых лепестков в произвольно задаваемой области РЛИ по дальности. Порядок фильтра при этом существенно превышает размер видимой области (в отчетах по

дальности), предъявляя повышенные требования к производительности вычислительного устройства.

### Описание метода

Если известен входной сигнал  $s_{in}(t)$  с соответствующим Фурье-образом  $F_{in}(f)$  и выходной сигнал  $s_{out}(t)$  с образом  $F_{out}(f)$ , то частотная характеристика фильтра определяется соотношением 1:

$$H(f) = \frac{F_{out}(f)}{F_{in}(f)} \quad (1)$$

Импульсная характеристика фильтра находится путем обратного преобразования Фурье частотной характеристики фильтра.

Пусть  $N$  – порядок фильтра, а  $M$  – длина последовательности на входе фильтра, тогда длина выходной последовательности согласно правилам дискретной свертки  $K = N+M-1$ . Частотная характеристика фильтра, полученная в результате дискретного преобразования Фурье (ДПФ) также будет иметь  $K$  точек, и, значит, порядок полученного фильтра окажется равным  $K$ , а не  $N$ . Дополнительные  $M-1$  точек являются нулями и не оказывают влияния, однако в случае произвольного задания выходной последовательности все коэффициенты фильтра являются значимыми. Полученный результат легко интерпретировать, если учесть, что ДПФ предполагает периодичность преобразуемой функции. На рис.1 схематично изображены два полных периода выходного  $s_{out}(n)$  и входного  $s_{in}(n)$  сигналов, а также импульсная характеристика фильтра  $h(n)$ .

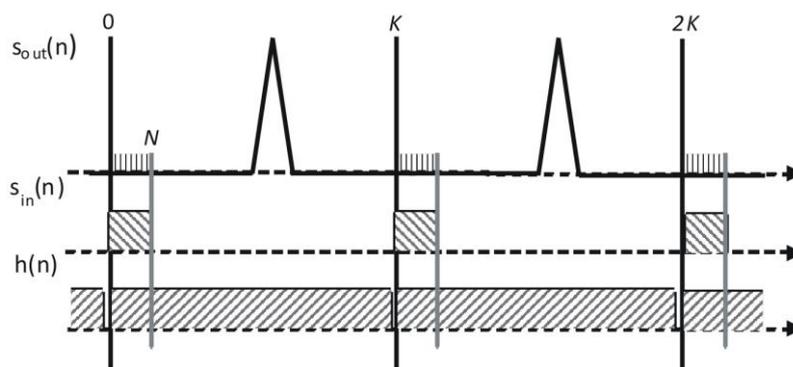


Рис.1. Схематичное изображение периодических сигналов на входе и выходе фильтра

При сдвигах импульсной характеристики от 0 до  $N-1$  она имеет пересечение с ненулевыми элементами входного сигнала в двух его периодах, при сдвигах от  $N$  до  $K$  пересечение возникает только с элементами одного периода. Т. е. при прямой свертке с одним периодом входного сигнала искажены будут первые и последние  $N$  отсчетов выходного, остальные же отсчеты останутся равными заданным.

### Алгоритм

Входом предлагаемого алгоритма синтеза фильтра являются известная входная бинарная последовательность и требуемый отклик фильтра длиной  $R + N$ , где  $N$  – длина входной последовательности, а  $R$  – размер (в отсчетах) снимаемой полосы. Выход фильтра (отклик) представляет собой массив отсчетов, заполненный

нулями, кроме отсчета с номером  $\frac{R+2N}{2}$ , который принимается равным единице.

1. Выполняются  $(R+N)$ -точечные ДПФ от массивов входной последовательности и отклика.

2. Находится поточечное отношение ДПФ выходной и входной последовательностей. В случае деления на ноль, результат принимается равным нулю.

3. Находится обратное ДПФ от полученного в п.2 результата. Мнимая часть полученного массива (вызванная ошибками округления) обнуляется.

### **Проверка алгоритма**

Проверка производилась для последовательностей Лежандра [20] длиной 2027 с уровнем боковых лепестков (УБЛ) -35 дБ и длиной 2029 с УБЛ -34 дБ. На рис.2 и рис.3 продемонстрирован результат работы алгоритма при ширине полосы по дальности 8192 отсчета. Видно, что результаты для обеих последовательностей похожи, однако, из-за вертикального масштаба остается незамеченным уровень потерь относительно согласованной фильтрации, равный -1,9 дБ для последовательности длиной 2027 (последовательность вида  $4k-1$ ) и -3 дБ для последовательности длиной 2029 (последовательность вида  $4k+1$ ). По результатам моделирования для различных последовательностей можно заключить, что потери в фильтре зависят от интегрального уровня боковых лепестков исходной АКФ последовательности: чем больше интегральный уровень, тем больше могут быть потери. Также уровень потерь зависит от длины фильтра: увеличение длины позволяет улучшить отношение длин совпадающей и несовпадающей частей отклика, тем самым более точно приблизиться к идеальному отклику. Но в этом случае также могут быть усилены помехи, присутствующие во входном сигнале (из-за неравномерности частотной характеристики), поэтому каждый конкретный

случай требует индивидуального подбора оптимальной последовательности и порядка фильтра. Уровень боковых лепестков в пределах полосы по дальности при применении полученного фильтра подавляется практически до нуля, отличия вызываются погрешностями вычислений.

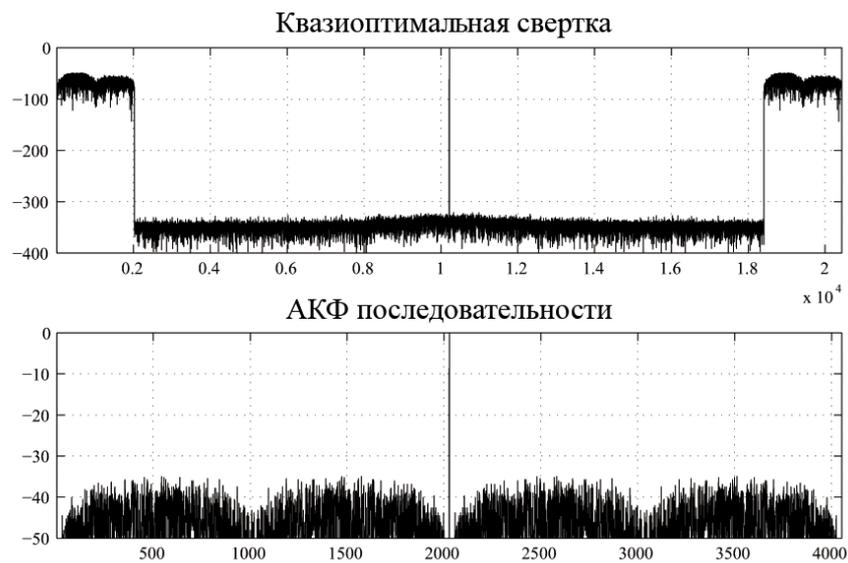


Рис.2. Подавление боковых лепестков (дБ) для последовательности длиной 2027

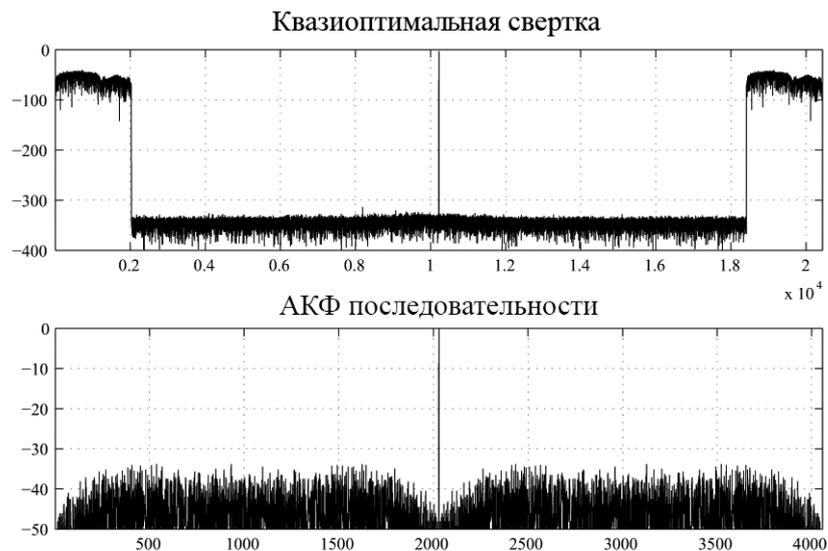


Рис.3. Подавление боковых лепестков (дБ) для последовательности длиной

## Проверка на РЛИ

Работоспособность алгоритма проверялась также на модели точечной радиолокационной цели и на реальном радиолокационном изображении (РЛИ). На рис.4. представлены два изображения функции рассеяния точки в логарифмическом масштабе: с использованием согласованной фильтрации (верхняя часть) и с использованием разработанного квазиоптимального фильтра (нижняя часть), уровень черного цвета на обоих рисунках соответствует -100 дБ. За исключением центральной области, нижний рисунок является абсолютно черным, что соответствует уровню боковых лепестков ниже 100 дБ. Полученное значение удовлетворяет озвученному ранее требованию для диапазона яркостей в 90 дБ.

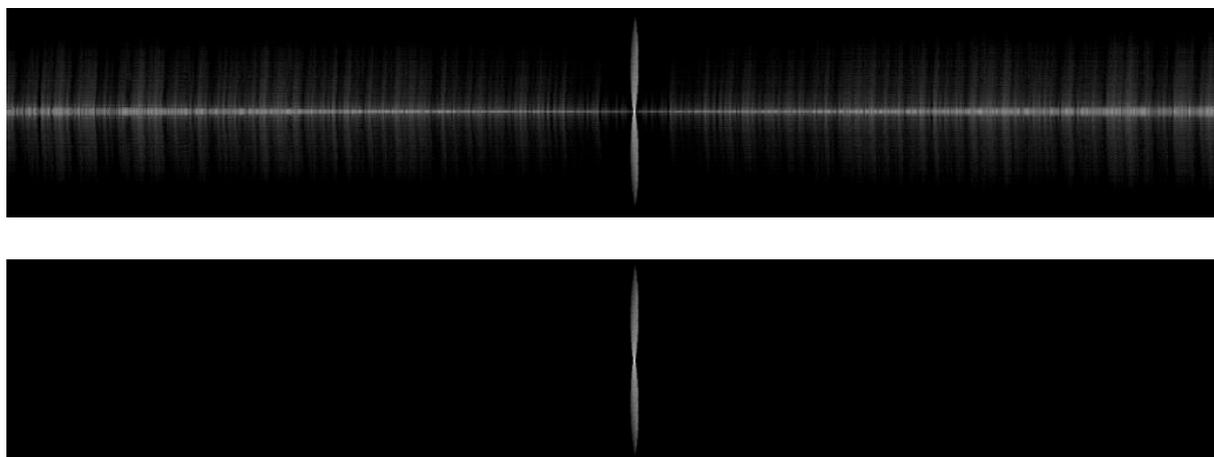


Рис.4. РЛИ точечной цели с применением согласованной фильтрации (верхнее) и с применением квазиоптимальной обработки (нижнее), дальности соответствует горизонтальная координата

На рис.5 изображены два варианта фрагмента РЛИ, полученного реальным радиолокатором с синтезированной апертурой, с применением согласованной фильтрации (левый) и с применением квазиоптимальной обработки (правый). В центре каждого изображения находится группа ярких целей. На левом рисунке она порождает вертикальные полосы, соответствующие боковым лепесткам АКФ. На правом рисунке уровень боковых лепестков существенно подавлен, а остаток полосы вызван искажениями входной последовательности из-за неидеальности аналогового тракта приемного устройства.

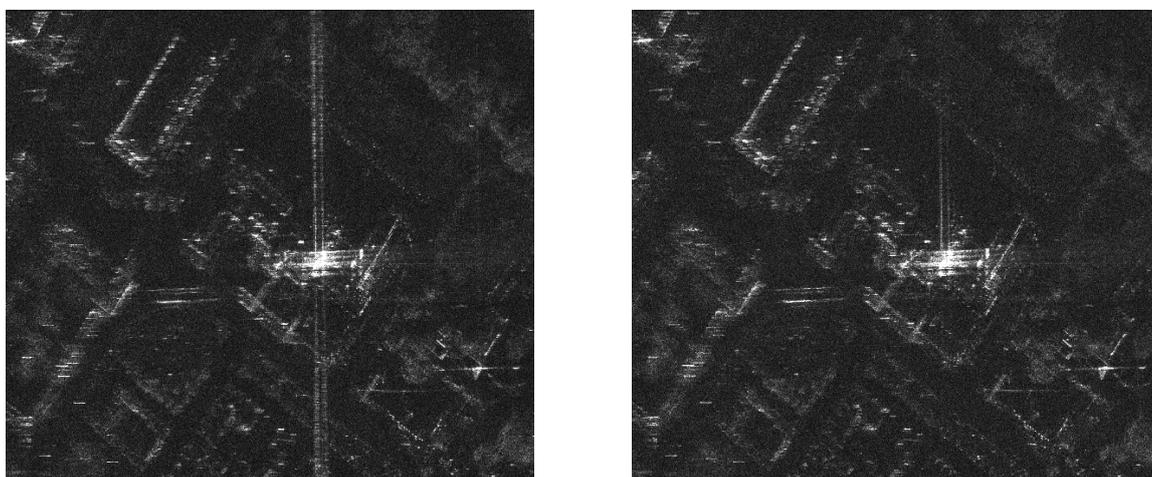


Рис.5. Результат работы алгоритма для реального РЛИ, дальности соответствует вертикальная координата

### **Вывод**

В работе предложен метод нахождения коэффициентов квазиоптимального КИХ-фильтра сжатия по дальности при синтезе радиолокационных изображений. Предложенный фильтр обеспечивает существенное (не менее 100 дБ) подавление боковых лепестков в пределах заданной области для псевдослучайных бинарных последовательностей, при этом уровень потерь относительно согласованной

фильтрации оказывается относительно небольшим (~2 дБ для рассмотренных последовательностей). Эффективность применения фильтра была подтверждена на одиночной бинарной последовательности, в том числе путем визуализации модели точечной радиолокационной цели, и на РЛИ реального высокодетального РСА.

### ***Поддержка***

*Данная работа проводится при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации в рамках Соглашения №14.578.21.0248 о предоставлении субсидии, идентификационный номер соглашения RFMEFI57817X0248.*

### **Библиографический список**

1. Ананенков А.Е., Марин Д.В., Нуждин В.М., Расторгуев В.В., Соколов П.В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75662>
2. Ackroyd M.H., Ghani F. Optimum Mismatched Filters for Sidelobe Suppression // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, vol. AES-9, no. 2, pp. 214 – 218.
3. Rihaczek A.W., Golden R.M. Range Sidelobe Suppression for Barker Codes // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971, vol. AES-7, no. 6, pp. 1087 – 1092.

4. Zoraster S. Minimum Peak Range Sidelobe Filters for Binary Phase-Coded Waveforms // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980, vol. AES-16, no. 1, pp. 112 - 115.
5. Кузнецов В.С., Шевченко И.В., Волков А.С., Солодков А.В. Генерация ансамблей кодов Голда для систем прямого расширения спектра // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=85813>
6. Сьянов В.А. Подавление боковых лепестков составных фазокодомодулированных сигналов на основе кодов Баркера // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 53 – 56.
7. Akbaripour A., Bastani M.H. Range Sidelobe Reduction Filter Design for Binary Coded Pulse Compression System // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012, vol. 48, no. 1, pp. 348 - 359.
8. Хасанов М., Курганов В.В. Методы определения коэффициентов квазиоптимального несогласованного КИХ-фильтра свертки псевдослучайной бинарной последовательности // Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем – 2014». Сборник трудов (с 2005 по 2007). - М.: ИППМ РАН, 2014, Часть IV. С. 133 - 136.
9. Груздов В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: Изд-во Техносфера, 2018. – 482 с.
10. Merrill I. Skolnik. Radar Handbook. Third Edition, Editor in Chief, McGraw-Hill Companies, 2008, 1351 p.

11. Nuthalapati R. Mismatched filters for long binary codes. Patent US8380770 B1, 2013, available at:  
[https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=ru\\_RU&FT=D&date=20130219&CC=US&NR=8380770B1&KC=B1#](https://ru.espacenet.com/publicationDetails/biblio?II=0&ND=3&adjacent=true&locale=ru_RU&FT=D&date=20130219&CC=US&NR=8380770B1&KC=B1#)
12. Baden J.M., Cohen M.N. Optimal sidelobe suppression for biphasic codes // Telesystems Conference, NTC '91, National, Atlanta, GA, 1991, vol. 1, pp. 127 - 131.
13. Вдовин Д.В. Метод двухтактной спектральной обработки дополнительных сигналов // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57046>
14. Kadlimatti R., Fam A.T. Good code sets from complementary pairs via symmetrical/antisymmetrical chips // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 1327 - 1339, doi: 10.1109/TAES.2016.150428
15. Козлов В.А., Чистюхин В.В. Аналитическое решение для подавления уровня интегральных боковых лепестков АКФ псевдослучайных последовательностей в РСА // Известия вузов. Электроника. 2017. Т. 22. № 5. С. 487 - 490.
16. Кудря А.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Расширение возможностей использования М-последовательности в РСА // II Всероссийские Армандовские чтения «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром - 2012. Материалы конференции (Муром, 26-28 июня 2012). - Муром: ИПЦ МИ ВлГУ, 2012. С. 518 - 531.
17. Tarasenko A.M. Choosing the way to create the ensembles of m-sequences for modulation of a sounding signal of space-borne sar in order to reduce a maximum sidelobe level of a point target response function // 24th International Crimean Conference

Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol, 7-13 Sept. 2014, pp. 1235 - 1236, doi: [10.1109/CRMICO.2014.6959845](https://doi.org/10.1109/CRMICO.2014.6959845)

18. Hongwei Liu, Huikai Zang, Shenghua Zhou, Yunhe Cao. Monostatic radar range–Doppler sidelobe suppression using nearly orthogonal waveforms // Radar Sonar & Navigation IET, 2016, vol. 10, no. 9, pp. 1650 - 1659.

19. H. Zang, S. Zhou, H. Liu and X. Wang. Radar sidelobe suppression using nearly-orthogonal waveforms // IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing, China, Xi'an, 2014, pp. 171 - 174.

20. Borwein P., Choi K.-K. S., Jedwab J. Binary sequences with merit factor greater than 6.34 // IEEE Transaction on Information Theory, 2004, vol. 50, no. 12, pp. 323 – 324.