

УДК 621.396.967; 621.396.962

Д.В.Чеботарев, А.Д.Чеботарев**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА ИТЕРАЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ
ОБНАРУЖЕНИЯ-РАЗРЕШЕНИЯ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ***Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого*

The algorithm of the pseudo-random quasi-continuous signal detection and resolution was modified. This algorithm also takes into consideration nonlinear transformations of signals in radar receiver. The efficiency of sea and terrain clutter compensation with different type of receiver amplitude response was investigated. Three types of the nonlinear amplitude response creating intermodulation are considered. Simulation results demonstrate advantage of the logarithmic amplitude curve. But because it could not be realized in wide dynamic range, the sigmoid function, which includes limiter and logarithmic function features, is offered.

Введение

Хорошо известные преимущества сложных сигналов с большой базой перед простыми импульсными сигналами при решении радиолокационных задач стимулируют поиск новых видов сигналов и совершенствование методов их обработки [1], [2]. В [3] изложен принцип построения итерационного алгоритма обнаружения-разрешения сложных квазипрерывных сигналов с большой базой, который позволяет существенно снизить влияние мешающих отражений от подстилающей поверхности на обнаружение слабых сигналов. В сущности, он представляет собой циклическое выполнение операций согласованной обработки, порогового обнаружения, измерения параметров обнаруженных сигналов (задержка, доплеровский сдвиг частоты, комплексная амплитуда) и когерентной компенсации обнаруженных сигналов во входной смеси мешающих отражений, по-

лезных сигналов и шума приемника. В этом алгоритме последовательно, начиная с наиболее мощных и заканчивая наиболее слабыми, производится обнаружение сигналов, измерение их параметров и когерентная компенсация, что устраняет маскирование слабых сигналов более сильными.

Важным условием работоспособности рассматриваемого алгоритма, при котором достигается высокая эффективность подавления мешающих отражений, является линейность приемного тракта, устройства согласованной обработки и устройства формирования компенсационного сигнала. Процедура оценки комплексных амплитуд, основанная на вычислении обратной корреляционной матрицы модулирующих последовательностей, параметры которых соответствуют задержкам и сдвигам частоты обнаруженных сигналов, также предполагает выполнение свойства линейности обработки. К сожалению, на практике обеспечение большого динамического диа-

пазона приемных устройств с малыми нелинейными искажениями представляет собой сложную задачу, часто связанную с большими аппаратными и экономическими издержками.

В связи с этим возникает вопрос об устойчивости рассматриваемого алгоритма к нелинейным искажениям. В первую очередь это относится к нелинейности типа «ограничение амплитуды» или близких к ней, которые возникают в приемном тракте. Целью настоящей работы является модификация алгоритма обнаружения-разрешения сложных квазипрерывных сигналов, учитывающая нелинейные преобразования сигналов, и исследование эффективности этого алгоритма.

Описание исследуемого алгоритма

Блок-схема исследуемого алгоритма приведена на рис.1. На этой схеме выделены операции нелинейного преобразования, отличающие данный алгоритм от его строго линейного варианта. Как следует из приведенной схемы, кроме нелинейного преобразования, соответствующего искажениям исходного сигнала, в алгоритм введено нелинейное преобразование компенсационного сигнала, которое должно возможно более точно повторять искажения исходного.

В этом случае уточнение истинных оценок параметров отраженных сигналов будет приводить к уменьшению ошибки компенсации, несмотря на не-

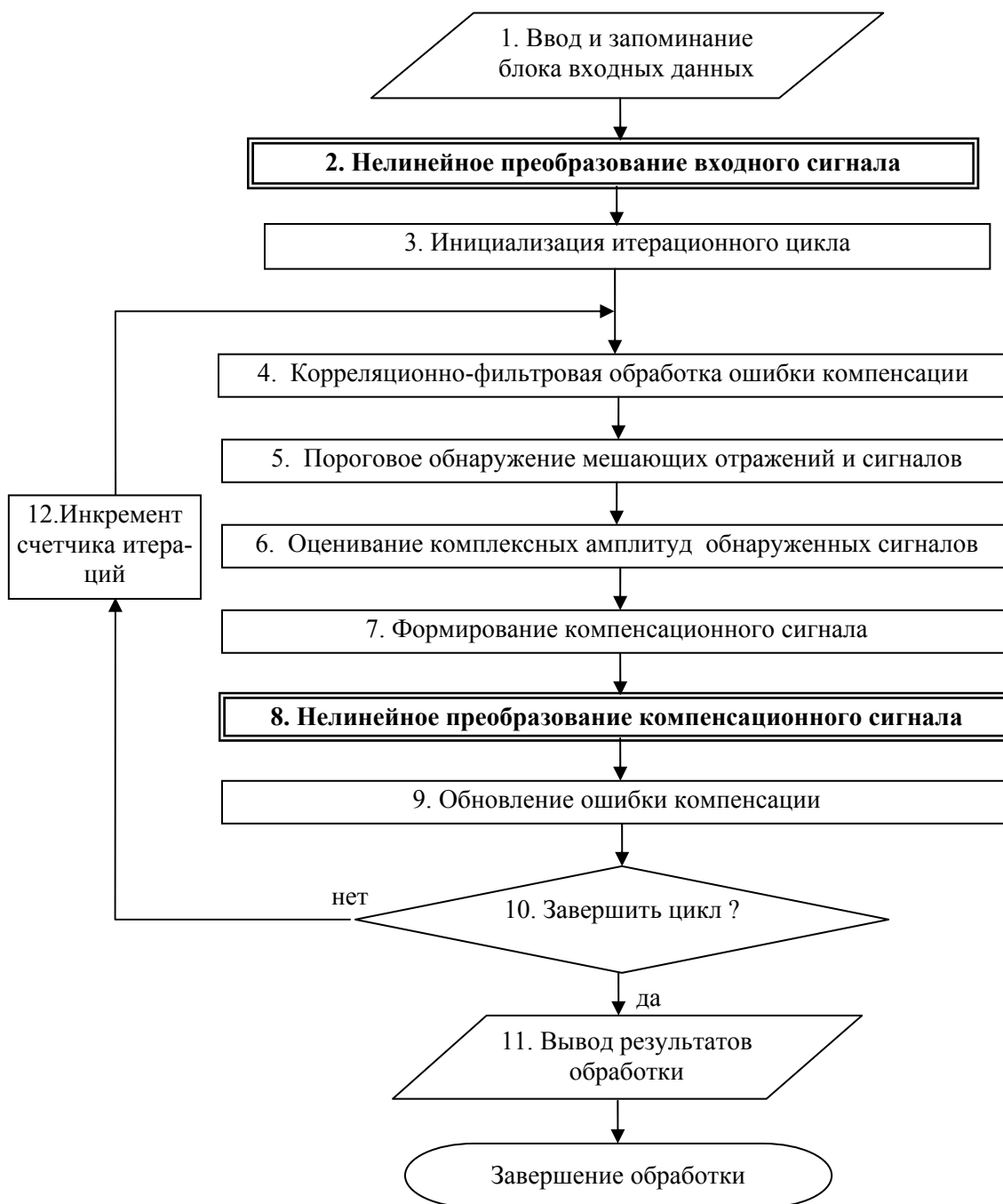


Рис.1. Блок-схема итерационного алгоритма компенсационной обработки сигналов с нелинейными искажениями

линейные искажения. Благодаря псевдослучайному характеру модулирующих последовательностей мгновенные значения сигналов с различными задержками и сдвигами частоты могут как складываться, так и вычитаться. При вычитании амплитуда входной смеси может оказаться ниже порога ограничения амплитудной характеристики приемника, что позволит произвести частичное уточнение оценок комплексных амплитуд отдельных сигналов, входящих в состав смеси. Если ограничение не настолько глубокое, что мгновенные значения входной смеси ниже уровня ограничения полностью отсутствуют, то существуют предпосылки сохранения работоспособности итерационного алгоритма с некоторым ухудшением характеристик по сравнению с линейным вариантом.

Исследование итерационного алгоритма с нелинейностями производилось на имитационной статистической модели, реализованной в вычислительной среде MatLab. В качестве нелинейности, описывающей амплитудную характеристику приемника, рассматривались три функции:

— идеальный ограничитель

$$f_1(x) = \begin{cases} x, & \text{если } x < 1, \\ 1, & \text{если } x \geq 1; \end{cases} \quad (1)$$

— смещенный логарифм

$$f_2(x) = \ln(x+1); \quad (2)$$

— сигмоидная функция, сочетающая свойства первых двух характеристик — фиксированный уровень ограничения и плавный переход к нему от линейного участка,

$$f_3(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1. \quad (3)$$

Для количественной характеристики влияния нелинейного преобразования на случайный сигнал введем определение степени компрессии:

$$K = 20 \lg \frac{\sigma_{вх}}{\sigma_{вых}}, \text{ дБ},$$

где $\sigma_{вх}$ и $\sigma_{вых}$ — среднеквадратическое значение сигнала на входе и выходе нелинейного преобразователя.

В качестве показателя эффективности подавления мешающих отражений использовалась относительная среднеквадратическая ошибка компенсации

$$\eta_k = 20 \lg \frac{\sigma_{исх}}{\sigma_{ош}}, \text{ дБ},$$

где $\sigma_{исх}$ — среднеквадратическое значение исходной смеси помех, сигналов и шума, прошедших нелинейное преобразование; $\sigma_{ош}$ — среднеквадратическое значение ошибки компенсации.

Результаты моделирования

Результаты моделирования были получены для нефлюктуирующих отражений, мощность которых убывает пропорционально кубу расстояния. Моделировался квазинепрерывный режим излучения и приема со средней скважностью 5. База квазинепрерывно-

го фазоманипулированного сигнала $N = 1024$, количество анализируемых элементов разрешения по дистанции $ND_{\max} = 128$, по скорости $KF_{\max} = 64$. Мощность шума приемника на 80 дБ ниже суммарной мощности отраженных сигналов.

На рис 2-7 представлены результаты моделирования.

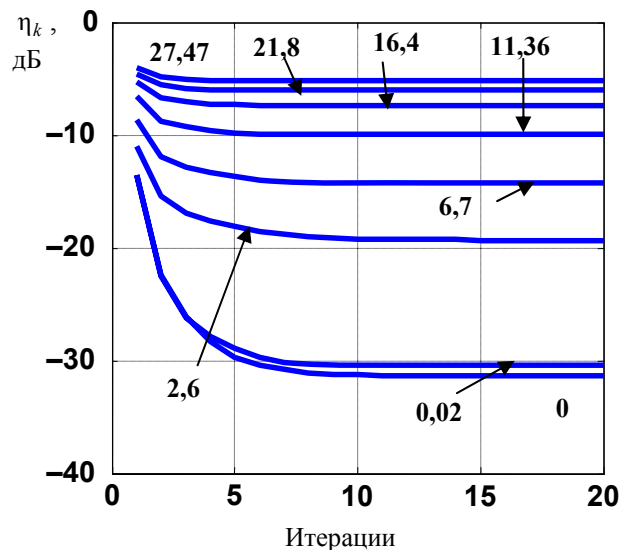


Рис.2. Идеальный ограничитель (1)

Семейства кривых на рис.2, 4, 6 отражают зависимость ошибки компенсации η_k от количества итераций при различных значениях степени компрессии K для типов нелинейности (1)-(3).

Как видно из рис.2, количество итераций, требуемое для сходимости алгоритма, не превышает 9. Влияние амплитудного ограничителя сводится к постепенному возрастанию ошибки компенсации при увеличении степени компрессии без замедления итерационного процесса. Это объясняется подавлением слабых сигналов более сильными в области ограничения. Таким образом, алгоритм не теряет работоспособности даже при высокой степени компрессии, но эффективность компенсации помех при этом снижается.

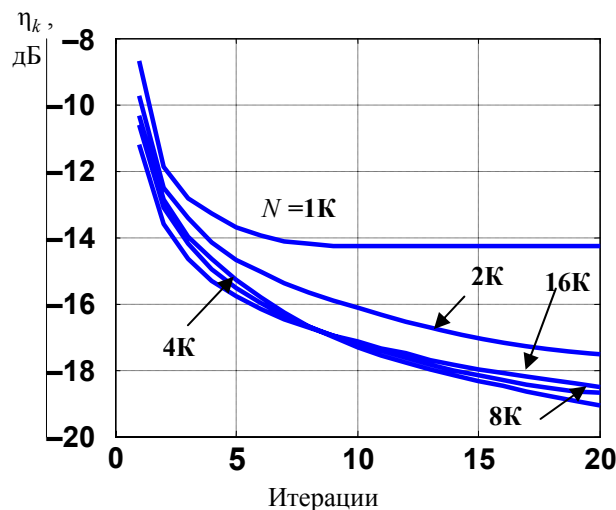


Рис.3. $K = 6,7$ дБ

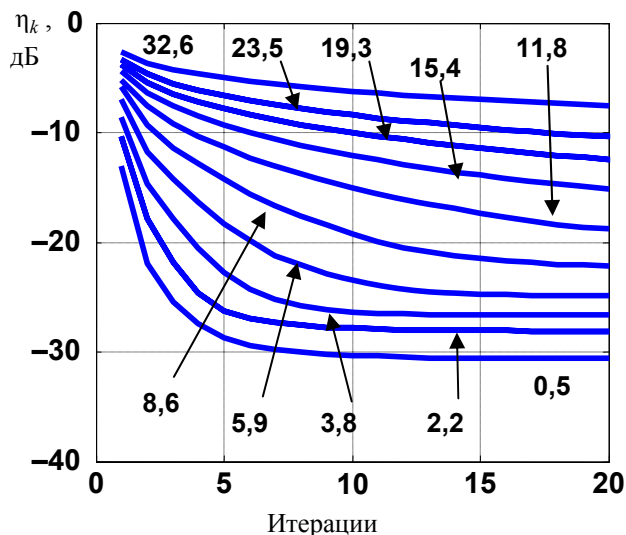


Рис.4. Смещенный логарифм (2)

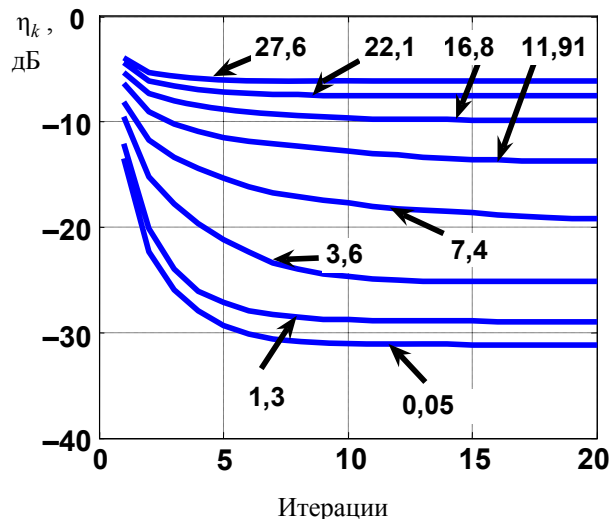
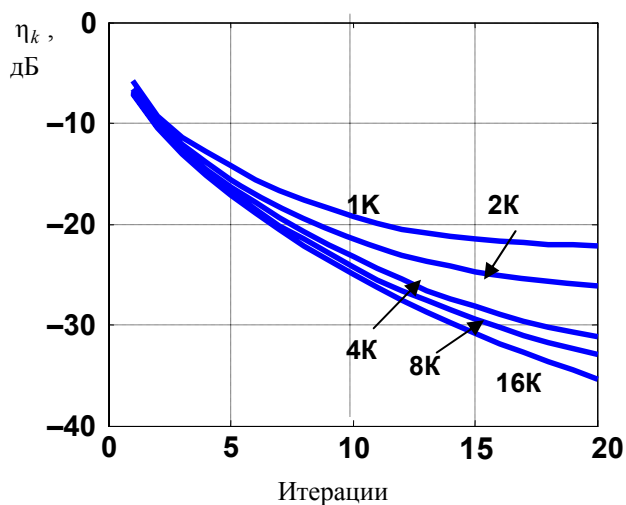


Рис.6. Сигмоидная функция (3)

Влияние базы сложного сигнала на ошибку компенсации иллюстрируется графиками, приведенными на рис.3, 5, 7. На них изображены семейства кривых, отражающих зависимость ошибки компенсации η_k от количества итераций для разных баз сигнала N при фиксированных значениях степени компрессии K .

На рис.3 явно выражено возрастание эффективности компенсации при увеличении базы сигнала, сопровождаемое увеличением количества итераций. Однако начиная с некоторого значения (в данном случае с $N = 4K$) влияние базы снижается. Скорость спадания кривых на рис.3 во многом зависит от весовой функции, накладываемой на сигнал, и формы функции рассеяния мешающих отражений. С увеличением базы сигнала возрастает количество отдельно разрешаемых элементов функции рассеяния, что приводит к уменьшению скорости спадания ошибки компенсации. Такая ситуация показана на рис.3, где пересекаются кривые с базами $8K$, $16K$ и $4K$. Если использовать априорную информацию о распределении целей и мешающих отражений, то можно повысить скорость сходимости алгоритма, сузив диапазон доплеровских сдвигов частоты.

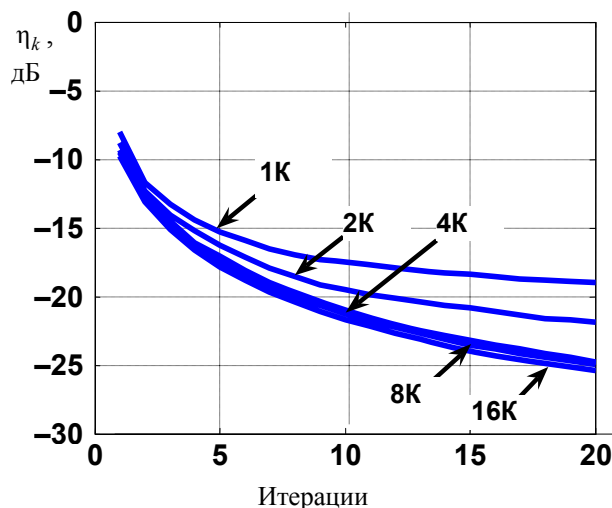
Рис.5. $K = 8,6$ дБ

Как видно из рис.4, в этом случае требуется большее количество итераций для достижения установившихся значений ошибки компенсации η_k , причем количество итераций растет с увеличением степени компрессии K . В пределе, даже при самых высоких значениях степени компрессии кривая будет иметь отрицательный уклон, и при увеличении итераций ошибка компенсации будет уменьшаться. Это закономерно, так как является следствием использования характеристики смещенного логарифма, которая в принципе не имеет ограничений.

На рис.5 мы видим, что количество итераций, требуемое для сходимости алгоритма, возрастает по сравнению с кривыми на рис.3 — это обусловлено отсутствием ограничения в характеристике нелинейности.

Для нелинейности типа (3), сочетающей в себе характерные черты двух первых характеристик, также были исследованы зависимости ошибки компенсации η_k от количества итераций.

Как следует из графиков, приведенных на рис.6, скорость спадания кривых для средних степеней компрессии ($K \approx 7$) меньше, чем при нелинейности типа смещенный логарифм (рис.4), но больше,

Рис.7. $K = 7,4$ дБ

чем при идеальном ограничении (рис.2). Аналогичная закономерность наблюдается и при сравнении кривых ошибки компенсации η_k при различных базах сложного сигнала (ср. рис.7 с рис.3 и 5).

Выводы

1. В результате проведенных исследований модифицирован итерационный алгоритм обнаружения-разрешения сложных квазинепрерывных сигналов для учета нелинейных преобразований, происходящих в приемном тракте.

2. Исследована эффективность подавления мешающих отражений при наличии нелинейных искажений сигнала для трех типов амплитудной характеристики в зависимости от степени компрессии и базы сигнала.

3. Выяснено, что наилучшая сходимость при любой степени компрессии обеспечивается логарифмической характеристикой компрессора, однако это сопровождается увеличением количества итераций. Сигмоидная функция, более близкая к реализуемой

амплитудной характеристике приемника, обеспечивает наилучшие показатели при средних и малых степенях компрессии. Для степени компрессии от 1 до 27 дБ она имеет выигрыш по сравнению с ограничителем до 10 дБ и уступает логарифмической характеристике лишь при степени компрессии выше 15 дБ (количество итераций ограничено 20-ю).

4. Подтверждено, что при увеличении базы сигнала увеличивается скорость сходимости алгоритма и уменьшается ошибка компенсации для всех рассмотренных типов амплитудных характеристик.

-
1. Levanon N., Mozeson E. Radar signals – Hoboken NJ.: John Wiley & Sons Inc., 2004. 411 p.
 2. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника, 2005. 400 с.
 3. Чеботарев Д.В. Итерационный алгоритм обнаружения-разрешения сложных сигналов // Тр. НТОРЭС им. А.С.Попова. Сер.: Цифровая обработка сигналов и ее применение. Вып. 8-1. Докл. Междунар. конф. DSPA-2006. М., 2006. С.284-287.