ОДЕССКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

на правах рукописи

ЗАХАРОВ ВИКТОР ВАСИЛЬЕВИЧ

УДК 621.396.96: 621.391.26

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕКУРРЕНТНЫХ АЛГОРИТМОВ И ПРОЦЕССОРОВ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

05.12.13 - Устройства радиотехники и средств связи

05.12.04 - Радиолокация и радионавигация

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Одесса - 1992

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00820004 (E)

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем Одесского политехнического института.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Свердлик Мешулим Бениаминович.

Официальные оппоненты:
доктор технических наук, профессор Кисель Виталий Андреевич,
кандидат технических наук, зав. отделом СПКБ Мелешкевич Александр Николаевич.

Ведущая организация - научно-производственное объединение " Квант" (г. Киев).

Защита состоится 21 января 1993 г. в 15^{00} на заседании специализированного совета Д 068.19.01 по присуждению ученой степени кандидата технических наук в Одесском ордена Трудового Красного знамени политехническом институте по адресу: 270044, г. Одесса, пр. Шевченко, 1, конференцзал ДК ОПИ.

Автореферат разослан 7 декабря 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
Д 068.19.01 Ямпольский Ю. С.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АНУРСР

Ав-26.614

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время для эффективного подавления помех в радиолокации широкое распространение получили адаптивные антенные решетки (ААР).

Эффективность работы ААР во многом определяется возможностями реализации весьма сложных алгоритмов пространственной обработки сигналов. Основными показателями эффективности алгоритмов адаптации является быстродействие процесса адаптации и его вычислительная сложность.

В последнее время в связи с бурным развитием цифровой техники предпочтение отдается, как правило, прямым алгоритмам пространственной обработки, позволяющим, в отличии от градиентных алгоритмов, определить оптимальный весовой вектор за конечное число арифметических операций, что позволяет существенно ускорить сходимость и преодолеть зависимость ее от распределения собственных значений корреляционной матрицы (КМ).

В условиях априорной неопределенности при весьма ограниченном объеме обучающей выборки наибольшее распространение получили регуляризованные рекуррентные алгоритмы, имеющие достаточно высокую скорость сходимости, равную $2p-1$, где p - число источников помех воздействующих на ААР. В зависимости от организации вычислительной процедуры они имеют различную вычислительную сложность: $O(N^2K)$ для алгоритмов, использующих операции над матрицами и $O(NK^2)$ для алгоритмов, использующих операции над векторами, где N - размер решетки, K - число независимых обучающих векторов.

Однако, наряду с такими достоинствами, как высокая скорость сходимости и сравнительно небольшая вычислительная сложность, рекуррентные алгоритмы имеют высокую чувствительность к ошибкам вычислений и при числе обучающих векторов большем числа действующих помех и конечной разрядности арифметических операций (АО) динамические характеристики (зависимость отношения сигнал/ помеха+шум от числа обучающих векторов) имеют спадающий характер.

Одним из путей снижения чувствительности алгоритмов к ошибкам вычислений является модификация известного векторного рекуррентного алгоритма, использующего тождество Вудбери, основанная на применении более устойчивых математических процедур при обращении регуляризованной оценки КМ, что позволяет снизить требования к разрядности АО.

Очевидно, что известный алгоритм и его модификации будут иметь различные вычислительные сложности и различные разрядности арифметических операций, в связи с этим сравнительный анализ алгоритмов только по вычислительной сложности или только по требуемой разрядности арифметических операций не позволяет однозначно ответить на вопрос, какой из алгоритмов является предпочтительней. Такое сравнение может быть проведено только по некоторой комплексной мере сложности, учитывающей как вычислительную сложность алгоритмов, так и требуемую разрядность выполнения арифметических операций.

Таким образом, актуальность темы обусловлена необходимостью разработки и исследования рекуррентных адаптивных алгоритмов более устойчивых к ошибкам вычислений, позволяющим получить выигрыш по требуемой разрядности АО и комплексной мере сложности по сравнению с известным алгоритмом.

Целью работы является синтез устойчивых к ошибкам вычислений модификаций известного рекуррентного алгоритма, сравнительный анализ известного и модифицированных алгоритмов по вычислительной сложности, требуемой разрядности выполнения арифметических операций и комплексной мере сложности, а также проработка вопросов аппаратурной реализации модифицированных алгоритмов.

Методы проведения исследований. При решении поставленных в диссертации задач использовались аналитические и вычислительные методы современного математического аппарата, а именно:

а) аппарат теории вероятностей и математической статистики;

б) аппарат линейной алгебры и матричный анализ;

в) современные численные методы и методы программирования;

г) методы моделирования на ЭВМ радиофизических стохастических процессов и алгоритмов их обработки.

Научная новизна. На защиту выносятся следующие результаты, впервые полученные или впервые достаточно подробно развитые в настоящей работе.

1. Методика оценки разрядности цифровых устройств (ЦУ) - вектора весовых коэффициентов (ВВК), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), арифметических операций (АО), при конечном

числе обучающих векторов и выполнении арифметических операций с плавающей запятой для алгоритмов с непосредственным обращением оценки корреляционной матрицы и рекуррентных.

2. Сравнительный анализ адаптивных прямых алгоритмов по требуемой разрядности ЦУ при выполнении арифметических операций с плавающей запятой.

3. Оценки разрядности АО при использовании арифметики с фиксированной запятой в рекуррентных алгоритмах, методика анализа ошибок масштабирования и их минимизация.

4. Синтез модификаций векторного рекуррентного регуляризованного алгоритма, использующих по сравнению с известным алгоритмом более устойчивые к ошибкам вычислений математические процедуры.

5. Сравнительный анализ известного и модифицированных алгоритмов по вычислительной сложности, требуемой разрядности АО и комплексной мере сложности, учитывающей как их вычислительную сложность так и требуемую разрядность АО.

Практическая ценность результатов работы состоит в том, что синтезированы модификации рекуррентного регуляризованного алгоритма, позволяющие снизить аппаратурную сложность процессоров по сравнению с процессором, реализующим известный алгоритм и предложены способы аппаратурной реализации модифицированных алгоритмов. Результаты работы могут найти практическое применение при проектировании систем связи, радиолокации, радионавигации.

Внедрение научных результатов. Полученные в диссертации результаты внедрены в научно-исследовательском институте радиофизики им. ак. Расплетина (г.Москва), что подтверждается соответствующим актом.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Республиканских конференциях молодых исследователей, ОПИ, Одесса, 1988 - 1992 г.г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы работы [1...8].

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из шести разделов, приложения и списка литературы, включающего в себя 85 наименований. Объем диссертации составляет 180 страниц, включая 154 страниц основного текста, 13 страниц рисунков, 6 страниц таблиц и 9 страниц списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе диссертации проведен анализ литературных источников, из которых следует:

- известные методики определения требуемой разрядности ЦУ не являются достаточно общими, так как не могут быть использованы при конечном объеме обучающих векторов и не могут быть применены для регуляризованных алгоритмов пространственной обработки (как рекуррентных так и нерекуррентных).

- известные рекуррентные алгоритмы обладают повышенной чувствительностью к ошибкам квантования, что требует их модификации.

Сформулированы цели и задачи диссертационой работы:

- разработка единной методики определения требуемой разрядности ЦУ процессоров адаптивной пространственной обработки сигналов,

- синтез (модификация) рекуррентных адаптивных алгоритмов пространственной обработки,

- сравнительный анализ известного и модифицированных алгоритмов по вычислительной сложности, требуемой разрядности выполнения арифметических операций и комплексной мере сложности, учитывающей аппаратурные затраты.

Второй раздел диссертации посвящен разработке единной методики определения требуемой разрядности ЦУ в прямых адаптивных алгоритмах пространственной обработки сигналов, использующих максимально правдоподобную и регуляризованную оценки корреляционной матрицы: с непосредственным обращением максимально правдоподобной оценки КМ (НОМ МП), с непосредственным обращением регуляризованной оценки КМ (НОМ РО), рекуррентным обращением регуляризованной оценки КМ (РОМ РО).

На основании предложенной методики получены оценки требуемой разрядности ВВК - $b_{ввк}$, АЦП - $b_{ацп}$, АО при использовании арифметики с плавающей запятой - $b_{ао}^{fl}$. Полученные оценки справедливы, как для конечного объема обучающих векторов, так и для установившегося режима.

При этом оценки для алгоритмов НОМ МП при конечном объеме обучающих векторов, а также для регуляризованных алгоритмов (как рекуррентных так и нерекурентных) получены впервые.

Анализ полученных выражений показывает, что основными параметрами, определяющими требования к разрядности ЦУ являются: размер решетки - N , отношение помеха/шум на входе АР - α , допустимые средние потери в отношении сигнал/помеха+шум (ОСПШ) за счет конечной разрядности ВВК, АЦП, АО - $\gamma_{ввк}$, $\gamma_{ацп}$, $\gamma_{АО}$, число обучающих векторов - K и величина относительного параметра регуляризации - $\mu = \tilde{\sigma}^2_{рег} / \tilde{\sigma}^2_{ш}$, где $\tilde{\sigma}^2_{рег}$ - параметр регуляризации, $\tilde{\sigma}^2_{ш}$ - мощность шума.

В алгоритмах НОМ МП, НОМ РО разрядность ЦУ слабо зависит от числа обучающих векторов, в алгоритмах РОМ РО разрядность ЦУ увеличивается пропорционально K и для достижения потерь, аналогичных полученным в алгоритмах НОМ РО требуется повышение разрядности ЦУ, на величину $(1/2)\log_2 K$.

Экспериментально уточнены верхняя и нижняя границы изменения величины относительного параметра регуляризации при воздействии на АР слабых точечных помех на фоне мощных.

Показано, что выбор верхней ($\mu_В$) и нижней ($\mu_Н$) границ величины μ в соответствии с выражением

$$\mu_Н \geq \max\left\{N^2 \alpha 2^{-2b_{АО}^{\mu}},\ \sqrt{(N-p)Np}\left[1-\exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda_{min}(R_p)}{(N-p)Np}}\right)\right]\right\},$$

$$\mu_В \leq 10,$$

где $\lambda_{min}(R_p)$ - минимальное собственное значение регуляризованной оценки КМ из числа превышающих чисто шумовые, величина которого приближенно равна мощности наименее интенсивного источника помехи, гарантирует возможность получения оценок весового вектора в произвольной помеховой ситуации при уменьшении скорости сходимости не превышающей 1-2 обучающих вектора по сравнению с предельно достижимой сходимостью.

С учетом уточненных границ величины параметра регуляризации проведен сравнительный анализ перечисленных алгоритмов по требуемой разрядности цифровых устройств (ВВК, АЦП, АО), который показал, что при заданных потерях в эффективности 3dБ лучшим с точки зрения точности вычислений являются алгоритмы с непосредственным обращением регуляризованной оценки корреляционной матрицы, худшим - с рекуррентным обращением регуляризованной оценки корреляционной матрицы. Промежуточное значение по требуемой разрядности занимают алгоритмы с непосредственным обращением максимально правдоподобной оценки корреляционной матрицы.

В третьем разделе получены оценки требуемой разрядности АО в рекуррентных алгоритмах при вычислениях с фиксированной запятой (b_{AO}^{fi}). Требуемая разрядность b_{AO}^{fi} определена как сумма b_{AO}^{fl}- разрядности, полученной при вычислениях с плавающей запятой и дополнительной разрядности - $b_{доп}$, которая зависит от применяемого метода масштабирования цифровых операндов при выполнении АО с фиксированной запятой.

На основании статистического метода анализа ошибок квантования и представления базовой операции рекуррентного алгоритма - скалярного произведения двух векторов X и Y при выполнении АО с фиксированной запятой в виде

$$f_i\{Z\} = Z + \Delta Z = P_n[D_n P_{n-1}[\cdots[D_i P_{i-1}\cdots[D_2 P_1[D_1(X \odot Y) + \Delta_1] + \Delta_2] + \cdots + \Delta_i] + \cdots + \Delta_{n-1}] + \Delta_n],$$

где ΔZ - результирующая ошибка за счет введения масштабирующих множителей,

Δ_i - вектор ошибки масштабирования на i-м этапе,

P_i - матрица перестановок, состоящая из 0 и 1, определяющая последовательность выполнения операций сложения на i-м этапе вычислительного процесса,

D_i - масштабирующая диагональная матрица с элементами равными $1/2^{r}$.

r - число разрядов на которое сдвигаются операнды перед выполнением АО (r = 0,1,2 ... и т.д.),

$\odot$ - знак поэлементного умножения,

предложена методика, позволяющая оценить дисперсию выходной ошибки за счет сдвигов ($\sigma^2_{\Delta Z}$) при выполнении АО с фиксированной запятой и использовании различных методов масштабирования.

Получены оценки дисперсии ошибок за счет сдвигов для вычислительной процедуры, заданной общей масштабирующей матрицей $D = diag\{d\} = \prod_{i=1}^{n} D_i$ и матрицами перестановок P_i и проведен синтез вычислительной процедуры (определены матрицы P_i и коэффициенты d_i), имеющей минимальное значение $\sigma^2_{\Delta Z}$.

Показано, что при условии использования m-входовых сумматоров минимальное значение $\sigma^2_{\Delta Z}$ будет иметь вычислительная процедура, матрицы P_i которой в каждой строке имеют m единиц.

Предложены методы масштабирования, использующие априорную информацию о нормальном распределении входных векторов. Показано, что в этом случае величина масштабирующего множителя выбирается равным $d = 1/\sqrt{N}$, в то же время для методов масштабирования, не использующих этой информации $d = 1/N$.

Предложена методика минимизации дисперсии результирующей ошибки за счет сдвигов для заданной матрицами P_i и множителем d вычислительной процедуры при поэтапном масштабировании. Предложенная методика позволяет при заданных матрицах P_i определить множители d_i так, чтобы исключить возможность переполнения и в то же время минимизировать величину $\tilde{\sigma}^2_{\Delta z}$.

Получены выражения, позволяющие оценить требуемую разрядность АО в рекуррентных алгоритмах при вычислениях с фиксированной запятой для различных методов масштабирования.

Проведен сравнительный анализ требуемой разрядности АО в рекуррентных алгоритмах при вычислениях с фиксированной запятой и использовании следующих методов масштабирования:

- масштабирование по входу множителем $d = 1/N$;
- поэтапное масштабирование множителями $d_i = 1/2$, на каждом этапе, $i = \overline{1, \log_2 N}$, $d = 1/N$;
- масштабирование по входу множителем $d = 1/\sqrt{N}$;
- поэтапное масштабирование множителями $d_i = 1/2$ $i = \overline{1, (1/2)\log_2 N}$. $d = 1/\sqrt{N}$;

Показано, что требуемая разрядность лучшего из предложенных методов масштабирования (поэтапный метод при $d=1/\sqrt{N}$) практически совпадает с требуемой разрядностью АО при использовании блочноплавающей запятой.

Максимальная разрядность АО требуется при масштабировании по входу множителем $d=1/N$. Промежуточные значения занимают методы масштабирования по входу множителем $d=1/\sqrt{N}$ и поэтапный - множителем $d=1/N$. При этом разрядность АО при лучшем методе масштабирования отличается от разрядности АО при худшем методе масштабирования на величину $\log_2 N-\frac{1}{2}\log_2(2\log_2 N)$.

Четвертый раздел посвящен синтезу модифицированных рекуррентных регуляризованных алгоритмов, позволяющих снизить требования к разрядности АО по сравнению с известным векторным алгоритмом. Показано, что наиболее эффективным способом снижения разрядности АО в регуляризованных алгоритмах является факторизация РО КМ из матрицы более простой структуры.

На основании тождества Морисона-Вудбери для обращения матриц

$$R_p^{-1}=I_N\,\sigma_{per}^{2}\left(I_N-X_K A_K^{-1}\tilde{X}_K\right),$$

где $X_K=|x_1\vdots x_2\vdots\ldots\vdots x_i\vdots\ldots\vdots x_K|$ - прямоугольная матрица обучающих векторов размера $N\times K$.

$A_K=\sigma_{per}^{2}+\tilde{X}_K X_K$ - матрица размера $K\times K$.

I_N - единичная матрица размера N.

синтезированы модификации известного векторного рекуррентного алгоритма, использующие наиболее устойчивые к ошибкам округлений вычислительные процедуры, такие как LL - преобразование Холецкого, QR - преобразование Хаусхолдера, ортогональное преобразование Грама-Шмидта.

Получены оценки вычислительной сложности и требуемой разрядности арифметических операций в модифицированных алгоритмах. При этом под вычислительной сложностью понимается число комплексных операций умножений-сложений, а под требуемой разрядностью АО минимальное число разрядов при котором достигается потери в эффективности не превышающие 3db при $K=2p-1$. Проведено сравнение полученных оценок с оценками известного алгоритма. Показано, что отношения вычислительных сложностей модифицированных алгоритмов Холецкого, Хаусхолдера, Грама-Шмидта и известного алгоритма - $G^{х}$, $G^{н}$, $G^{гш}$ зависит от отношения - K/N, причем для алгоритма Хаусхолдера эта зависимость очень слабая и в широком диапазоне указанного отношения составляет приближенно 1.5 раза.

Для алгоритмов Холецкого и Грама-Шмидта при увеличении отношения K/N вычислительная сложность увеличивается по сравнению с известным алгоритмом, так например, при $K/N \ll 1$ $G^{х} \approx G^{гш} \approx 1$, а при $K/N = 1$ - $G^{х} = 1.33$, $G^{гш} = 2.00$.

Наряду с некоторым повышением вычислительной сложности в модифицированных алгоритмах имеет место снижение требуемой разрядности АО, что является следствием применения более устойчивых вычислительных процедур. Установлено, что величина $\Delta b_{мод}$, показывающая снижение разрядности арифметических операций в модифицированных алгоритмах по сравнению с известным при $K=2p-1$, приближенно равна $(1/4)\log_2 N\alpha/\mu$. Так при изменении величины $N\alpha/\mu$ в пределах 10...60 db, величина $\Delta b_{мод}$ изменяется от 1 до 6 разрядов. С другой стороны, при $K=2p-1$ и одинаковых разрядностях АО модифицированные алгоритмы позволяют эффективно давить помехи интенсивностью на 6...14 db больше чем известный алгоритм.

Проведено сравнение модифицированных и известного алгоритмов по комплексной мере сложности, включающей в себя как вычислительную сложность так и требуемую разрядность АО. При этом под комплексной мерой сложности алгоритма понимается произведение его вычислительной сложности на число элементарных одноразрядных двоичных сумматоров, содержащихся в одном устройстве умножения и суммирования. Физический смысл комплексной меры сложности заключается в том, что она характеризует площадь кристалла интегральной схемы, на которой может быть аппаратурно реализован тот или иной цифровой алгоритм.

Сравнительный анализ известного и модифицированных алгоритмов по комплексной мере сложности показал:

- для алгоритмов Холецкого и Грама-Шмидта выигрыш зависит от отношений K/N и α/μ, причем при увеличении отношения K/N выигрыш уменьшается, а при увеличении отношения α/μ - увеличивается. Так при $K/N \ll 1$ и изменении α/μ в диапазоне 10...60 db выигрыш составляет для алгоритма Холецкого 1.00 ... 1.49, Грама- Шмидта 1.18 ... 1.63 раза, при $K/N \sim 1$ для алгоритма Холецкого выигрыш составляет

0.71 ... 1.06, для алгоритма Грама-Шмидта 0.59 ... 0.82.

- в алгоритме Хаусхолдера выигрыш не зависит от отношения K/N и составляет для указанного диапазона изменений отношения α/μ величину 0.79 ... 1.10.

Соотношения между алгоритмами по комплексной мере сложности в зависимости от отношений K/N и α/μ приведены в таблице, в которой приняты следующие обозначения: ГШ - алгоритм Грама-Шмидта, Х - алгоритм Холецкого, Н - алгоритм Хаусхолдера, изв - известный алгоритм.

K/N	α/μ (db)					
	10	20	30	40	50	60
K/N<<1	ГШ Х,изв Н	ГШ Х изв Н	ГШ Х изв Н	ГШ Х Н,изв	ГШ Х Н изв	ГШ Х Н изв
K/N=0.5	изв Х ГШ,Н	изв Х ГШ,Н	изв,Х ГШ,Н	Х изв,Н,ГШ	Х Н,ГШ изв	Х Н,ГШ изв
K/N=1	изв Н Х ГШ	изв Н Х ГШ	изв Н Х ГШ	изв,Н Х ГШ	Н Х изв ГШ	Н Х изв ГШ

В представленной таблице верхний алгоритм в каждом из приведенных случаев является лучшим в смысле минимума комплексной меры сложности, так при $K/N \ll 1$ лучшим является алгоритм Грама-Шмидта; при $K/N = 0.5$ и отношении $\alpha/\mu < 30$db - известный алгоритм, а при $\alpha/\mu > 30$db алгоритм Холецкого; при $K/N = 1$ и отношении $\alpha/\mu < 40$db - известный алгоритм, а при $\alpha/\mu > 40$db алгоритм Хаусхолдера.

В пятом разделе исследованы вопросы аппаратурной реализации модифицированных алгоритмов.

Проведен синтез структурных схем процессоров адаптивной пространственной обработки, использующих модифицированные рекуррентные регуляризованные алгоритмы Холецкого и Хаусхолдера, разработаны функциональные схемы основных узлов.

Проведен выбор элементной базы ИМС и требуемой разрядности арифметических устройств для известного процессора ($b_{изв}$) и синтезированного, использующего алгоритм Хаусхолдера ($b_{мод}$).

Проведен сравнительный анализ аппаратурных затрат на реализацию указанных процессоров.

Показано, что при использовании элементной базы ИМС серии 1802 в случае, когда $b_{изв}, b_{мод} < 16$ бит и не требуется распараллеливания устройств умножения, как для известного процессора, так и синтезированного, нет принципиальных различий между аппаратурной сложностью известного и синтезированного процессора.

Для ситуаций, когда $b_{мод} < 16$ бит, а $b_{изв} > 16$ бит, выигрыш в аппаратурной сложности процессора, использующего модифицированный алгоритм Хаусхолдера, по сравнению с известным может достигать несколько раз, так как известный процессор на заданной элементной базе может быть реализован только с использованием распараллеливания.

Как показали результаты хоздоговорной НИР, выполняемой НИЛ "Радиоэлектроника" в интересах НИИРФ им. академика Расплетина, применение синтезированного процессора, использующего

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН УРСР

рекуррентный адаптивный алгоритм Хаусхолдера в реальной цифровой адаптивной системе позволит обеспечить возможность эффективного подавления помех при аппаратурных затратах в несколько раз ниже чем в существующих системах ; научная новизна технической разработки подтверждена решением патентной экспертизы ВНИИГПЭ о выдаче автору патента по заявке N 5003166/09/060951/.

В шестом разделе подведены итоги работы и основные результаты, которые сводятся к следующему.

Проведен цикл исследований, направленных на синтез модифицированных адаптивных алгоритмов пространственной обработки сигналов устойчивых к ошибкам вычислений, сравнительный анализ известного и модифицированных алгоритмов по вычислительной сложности, требуемой разрядности выполнения арифметических операций и комплексной мере сложности, а также проработку вопросов аппаратурной реализации модифицированных алгоритмов.

1. Разработана единная методика оценки разрядности цифровых устройств (ЦУ) - вектора весовых коэффициентов (ВВК), аналого-цифрового преобразователя (АЦП), арифметических операций (АО) в прямых алгоритмах адаптивной пространственной обработки, позволяющая получить расчетные соотношения при вычислениях с плавающей и фиксированной запятой , которые справедливы, как при конечном объеме обучающих векторов, так и в установившемся режиме, и провести с единных позиций сравнительный анализ прямых алгоритмов по требуемой разрядности ЦУ.

2. Предложены модификации известного рекуррентного регуляризованного векторного алгоритма, использующие более устойчи-

вые к ошибкам вычислений математические процедуры, такие как метод квадратных корней Холецкого, QR разложение Хаусхолдера, ортогонализация Грама-Шмидта и проведено исследование их эффективности. Получены оценки вычислительной сложности и требуемой разрядности АО в модифицированных алгоритмах. Проведено сравнение полученных оценок с оценками известного алгоритма. Проведен сравнительный анализ модифицированных и известного алгоритмов по комплексной мере сложности.

3. Исследованы вопросы аппаратурной реализации синтезированного адаптивного алгоритма, использующего преобразование Хаусхолдера. Проведены схемотехническая проработка функциональных узлов и сравнительный анализ аппаратурных затрат на реализацию процессоров, использующих известный и синтезированный алгоритмы Хаусхолдера, для выбранной элементной базы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Полученные аналитические оценки требуемой разрядности цифровых устройств (ЦУ) показали, что при заданных потерях в эффективности 3db лучшим с точки зрения точности вычислений являются алгоритмы с непосредственным обращением регуляризованной оценки корреляционной матрицы (НОМ РО), худшим - с рекуррентным обращением регуляризованной оценки корреляционной матрицы (РОМ РО), разрядность которых для достижения потерь в эффективности аналогичных полученным в алгоритмах НОМ РО следует повысить на величину $(1/2)\log_2 K$, где K - число обучающих векторов. Промежуточное значение по требуемой разрядности занимают алгоритмы с непосредственным обращением макси-

мально правдоподобной оценки корреляционной матрицы (НСМ МП).

2. Требуемая разрядность АО в рекуррентных алгоритмах при вычислениях с фиксированной запятой зависит от применяемого метода масштабирования. Минимальная разрядность АО требуется при поэтапном методе масштабирования и величине масштабирующего множителя $d = 1/\sqrt{N}$, где N - размер решетки; требуемая разрядность АО в этом случае приближается к разрядности АО при вычислениях с блочноплавающей запятой. Максимальная разрядность АО требуется при масштабировании по входу и величине масштабирующего множителя $d=1/N$. При этом разрядность АО при лучшем методе масштабирования отличается от разрядности АО при худшем методе масштабирования на величину $\log_2 N - \frac{1}{2}\log_2(2\log_2 N)$. Промежуточное значение по разрядности АО занимают методы масштабирования по входу при величине масштабирующего множителя $d=1/\sqrt{N}$ и поэтапный при величине масштабирующего множителя $d=1/N$.

3. Сравнительный анализ модифицированных и известного алгоритмов по вычислительной сложности, требуемой разрядности и комплексной мере сложности показал:

3.1. Отношение вычислительных сложностей модифицированных алгоритмов Холецкого, Хаусхолдера, Грама - Шмидта и известного алгоритма зависит от отношения K/N, причем для алгоритма Хаусхолдера эта зависимость очень слабая и составляет приближенно 1.5 раза. Для алгоритмов Холецкого и Грама - Шмидта при $K/N \ll 1$ указанное отношение приближенно равно единице для обоих алгоритмов, при $K/N = 1$ соответственно 1.33 и 2.00.

3.2. Наряду с некоторым повышением вычислительной сложности, в модифицированных алгоритмах имеэт место снижение требуемой разрядности АО по сраьнению с известным алгоритмом, что является следствием применения более устойчивых вычислительных процедур. Установлено, что величина на которую может быть снижена разрядность АО слабо зависит от помеховой ситуации и приближенно равна $(1/4)\log_2 N\alpha/\mu$, где α - отношение помеха/шум на входе АР, μ - величина относительного параметра регуляризации. С другой стороны при одинаковых разрядностях АО и $K=2p-1$, где p - число помех, модифицированные алгоритмы позволяют эффективно давить помехи интенсивностью на 6...14 db больше чем известный алгоритм.

3.3. Выигрыш по комплексной мере сложности для алгоритмов Холецкого и Грама-Шмидта зависит от отношений K/N и α/μ. При изменении K/N в пределах от 1/N до 1, а величины α/μ в диапазоне 10...60 db выигрыш составляет для алгоритма Холецкого 0.71 ... 1.49, Грама- Шмидта 0.59...1.63 раза. В алгоритме Хаусхолдера выигрыш не зависит от отношения K/N и составляет для указанного диапазона изменений α/μ величину 0.79 ... 1.10.

4. Сравнительный анализ аппаратурных затрат на реализацию процессоров, использующих известный и синтезированный алгоритм Хаусхолдера, показал:

4.1. При использовании элементной базы ИМС серии 1802 в случае, когда не требуется применения методов распараллеливания устройств умножения, как для известного процессора, так и синтезированного, нет принципиальных различий между аппаратурной сложностью известного и синтезированного процессора.

4.2. Для ситуаций, когда известный процессор на заданной элементной базе может быть реализован только с использованием распараллеливания выигрыш в аппаратурной сложности синтезированного процессора по сравнению с известным может достигать нескольких раз, что стало возможным благодаря снижению требований к разрядности АУ в процессоре, использующем модифицированный алгоритм Хаусхолдера.

Процессор, использующий преобразование Хаусхолдера, принят к внедрению в современный радиолокационный комплекс, а оригинальность технической разработки подтверждена решением патентной экспертизы ВНИИГПЭ о выдаче автору патента по заявке N 5003166/09/060951/.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Свердлик М.Б., Захаров В.В. Модифицированные рекуррентные алгоритмы пространственной обработки с повышенной устойчивостью к ошибкам вычислений. Радиоэлектроника.-1991. - N4. - С.62 - 66.(Изв. высш. учеб. заведений).
2. Захаров В.В. Сравнительный анализ методов масштабирования в процессорах пространственной обработки сигналов использующих операции с фиксированной запятой //Радиоэлектроника. - 1990. - N9. - С.7 - 12.(Изв. высш. учеб. заведений).
3. Захаров В.В. Методы масштабирования, использующие априорную информацию о нормальном распределении входных векторов //Радиоэлектроника.- 1991. - N11. - С.46 - 50. (Изв. высш. учеб. заведений).

4. Захаров В.В. Оценки разрядности цифровых устройств в процессорах адаптивной пространственной обработки //Радиоэлектроника.- 1992. - N4 . - С.4 - 12 .(Изв. высш. учеб. заведений).
5. Захаров В.В. Методы снижения требований к разрядности в цифровых алгоритмах пространственной обработки, использующих операции с фиксированной запятой //Сборник рефератов депонированных рукописей, 1990, вып. 1, ВИМИ.
6. Захаров В.В. Эффективный алгоритм пространственной обработки сигналов //Сборник рефератов депонированных рукописей, 1990, вып. 1, ВИМИ.
7. Захаров В.В. Модифицированный алгоритм пространственной обработки, использующий преобразование Хаусхолдера. //Сборник рефератов депонированных рукописей, 1990, вып. 6, ВИМИ.
8. Заявка N 5003166/09/060951, МКИ^5 HOIQ 23/00. Адаптивная антенная система. Захаров В.В. - Полож. реш. ВНИИГПЭ от 26.06.92 .

Соискатель [подпись] В.В. Захаров

Зак. 493-100 11.12.92

469427

Ав 26.614
Ав 26.614