

# РЕГУЛЯРИЗУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СИГНАЛА M-QAM В СИСТЕМЕ С MIMO, ОСНОВАННЫЕ НА ФИЛЬТРАЦИИ КАЛМАНА

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-12-4-10

Manuscript received 10 October 2022;  
Accepted 15 November 2022

Поборчая Наталья Евгеньевна,  
Московский технический университет связи  
и информатики, Москва, Россия,  
[n.poborchaya@mail.ru](mailto:n.poborchaya@mail.ru)

**Ключевые слова:** квадратная амплитудная модуляция, система с MIMO, приемник прямого преобразования, фильтр Калмана, параметр регуляризации, процедура детектирования, канал с релеевскими замираниями и доплеровским расширением спектра

Целью работы является повышение помехоустойчивости приема информации при удовлетворительной вычислительной сложности алгоритмов обработки сигналов. В статье рассматриваются два регуляризирующих рекуррентных алгоритма детектирования M-позиционного сигнала квадратурной амплитудной модуляции (M-QAM) в системе с несколькими передающими и приемными антеннами (MIMO) и приемником прямого преобразования, основанными на фильтре Калмана. При детектировании сигнала алгоритм Калмана, с помощью которого находятся мягкие решения, работает в фиксированный момент времени и производит оценку информационных символов за L итераций. Предложенные процедуры детектирования содержат регуляризирующий параметр. У одного алгоритма параметр регуляризации подбирается эмпирически, у другого – находится по замкнутому выражению, в которое входят оценки информационных символов, полученные на прошлом шаге итерационной процедуры. Жесткие решения определяются по критерию минимального расстояния между полученными мягкими решениями и возможными значениями информационных символов для каждой передающей антенны отдельно. Проведено сравнение предложенных детекторов по помехоустойчивости (в системе без кодирования) с методом Zero Forsing и алгоритмом, работающим по критерию минимума средней квадратической ошибки (СКО) в условиях точно известного канала связи и при его оценивании методом наименьших квадратов с использованием полиномиальной аппроксимации первого порядка. Регуляризирующие процедуры детектирования позволяют повысить помехоустойчивость приема сигнала относительно алгоритмов Zero Forsing и минимума СКО. Проведен анализ вычислительной сложности предложенных рекуррентных алгоритмов. Введение параметра регуляризации позволяет сократить количество итераций в процедурах детектирования для получения требуемой вероятности ошибки приема информационного символа. Это может уменьшить количество арифметических операций, что приведет к сокращению вычислительной сложности алгоритмов обработки сигналов. Предложенные алгоритмы детектирования сложнее процедуры Zero Forsing и алгоритма, работающего по критерию минимума СКО, но существенно проще детектора, синтезированного по правилу максимального правдоподобия.

#### Для цитирования:

Поборчая Н.Е. Регуляризирующие алгоритмы детектирования сигнала M-QAM в системе с MIMO, основанные на фильтрации Калмана // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №12. С. 4-10.

#### For citation:

Poborchaya N.E. (2022) Regularizing algorithms based on kalman filtering for M-QAM signal detection in MIMO. T-Comm, vol. 16, no.12, pp. 4-10. (in Russian)

**Введение**

Наиболее простой в реализации способ приема сигнала – это использовать приемник прямого преобразования. Но такой подход приводит к появлению искажений сигнала, которые влекут за собой усложнение алгоритмов его обработки, особенно для систем с ММО. Качество компенсации искажений в приемнике прямого преобразования влияет на помехоустойчивость приема сигнала. Также значительное влияние на прием сигнала вносит процедура детектирования. Самый простой детектор в системе с ММО – алгоритм Zero Forcing, но он обеспечивает низкую помехоустойчивость [1].

Наименьшую вероятность ошибки приема информационного символа обеспечивает процедура детектирования, работающая по критерию максимального правдоподобия, но она обладает высокой вычислительной сложностью. Последнее особенно проявляется при увеличении размерности  $M$  сигнального созвездия и количества  $N$  передающих и приемных антенн. Обеспечить разумный компромисс между помехоустойчивостью и сложностью алгоритмов приема возможно при использовании рекуррентных процедур детектирования [2-8]. К такому классу алгоритмов относится линейная фильтрация Калмана. Детектирование сигнала в данной работе производится как при известных параметрах канала связи, так и при их оценке методом наименьших квадратов с использованием полиномиальной аппроксимации множителей канала [9-11]. В настоящей статье фильтр Калмана – регуляризирующий рекуррентный алгоритм [12, 13], работающий в фиксированный момент времени.

Такой подход объясняется тем, что длительность информационного символа мала и калмановская фильтрация во времени может за такой промежуток не обеспечить сходимости алгоритма детектирования. Представленная работа является продолжением исследования, опубликованного в [14, 15].

**Постановка задачи**

Рассмотрим модель сигнала в системе с ММО с  $N$  передающими и приемными антеннами и приемником прямого преобразования в следующем виде [14, 15]:

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{H}_i \Theta_i + \mathbf{B}_i + \boldsymbol{\mu}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (1)$$

где  $\mathbf{Y}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{ci} \\ \mathbf{Y}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 1}$  – вектор наблюдаемых квадратур сигнала М-

QAM,  $\mathbf{H}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{ci} \\ \mathbf{H}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 2N}$  – матрица канала,  $\mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{ci} \\ \mathbf{B}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 1}$  – век-

тор постоянных составляющих квадратур сигнала,  $\boldsymbol{\mu}_i = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\mu}_{ci} \\ \boldsymbol{\mu}_{si} \end{pmatrix}_{2N \times 1}$  – шум с  $E(\boldsymbol{\mu}_i) = \mathbf{0}_{2N \times 1}$  и  $E(\boldsymbol{\mu}_i \boldsymbol{\mu}_i^T) = \mathbf{Q} = \sigma_{\mu}^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N}$ ,

$\mathbf{I}_{2N \times 2N}$  – единичная матрица размером  $2N \times 2N$ ,  $\mathbf{0}_{2N \times 1}$  – нулевой вектор размером  $2N \times 1$ ,  $E(\cdot)$  – оператор математического ожидания, «Т» – операция транспонирования,  $\Theta_i$  – вектор информационных символов М-QAM сигнала с элементами  $\Theta_{cki}, \Theta_{ski}$ ,  $k = 1, \dots, N$  – номер передающей антенны,  $i$  – дискретное время.  $\mathbf{H}_{ci} = (\mathbf{H}_{1c}(i) \dots \mathbf{H}_{Nc}(i))_{N \times 2N}$ ,

$\mathbf{H}_{si} = (\mathbf{H}_{2s}(i) \dots \mathbf{H}_{2s}(i))_{N \times 2N}$  – квадратурные каналные матрицы с элементами  $H_{1c,qk}(i), H_{1s,qk}(i), H_{2c,qk}(i), H_{2s,qk}(i)$ :

$$\begin{aligned} H_{1c,qk}(i) &= h_{c,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}) - h_{s,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}), \\ H_{1s,qk}(i) &= h_{c,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}) + h_{s,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi}), \\ H_{2c,qk}(i) &= \gamma_q (h_{c,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q) - \\ &- h_{s,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q)), \\ H_{2s,qk}(i) &= \gamma_q (h_{c,qk}(i) \sin(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q) + \\ &+ h_{s,qk}(i) \cos(2\pi\Delta f T i + \varphi_{qi} + \Delta\varphi_q)), \end{aligned}$$

где  $\gamma_q, \Delta\varphi_q$  – амплитудный и фазовый дисбаланс соответственно,  $\varphi_{qi}$  – фаза, определяемая как  $\varphi_{qi} = \varphi_{q0} + \zeta_{qi}$ ,  $\varphi_{q0}$  – начальная случайная фаза сигнала,  $\zeta_{qi}$  – фазовый шум, который формируется моделью скользящего среднего 2-го порядка,  $\Delta f$  – сдвиг частоты, оставшийся после процедуры демодуляции,  $h_{c,qk}(i), h_{s,qk}(i)$  – множители канала связи, которые описываются моделью Джейкса [2], представляющей собой сумму квазигармоник, учитывающих частоту Доплера  $F_D$ ,  $q$  – номер приемной антенны,  $q = 1, 2, \dots, N$ .

Требуется синтезировать и исследовать регуляризирующий рекуррентный алгоритм получения мягких решений  $\hat{\Theta}_i$  в условиях априорной неопределенности относительно законов распределения шумов.

**Решение задачи**

В фиксированный момент времени  $i$  неизвестный вектор информационных символов представим в виде авторегрессии первого порядка:

$$\Theta_i(s) = \Theta_i(s-1) + \zeta(s). \quad (2)$$

Здесь  $S$  – номер итерации,  $\zeta(s)$  – шум динамической системы с  $E(\zeta(s)) = \mathbf{0}_{2N \times 1}$ ,  $E(\zeta(s)\zeta^T(s)) = \sigma_{\zeta}^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N}$ , причем  $\sigma_{\zeta}^2 \rightarrow 0$ . Далее, используя (1) и (2) запишем модифицированный функционал Тихонова [12, 13]:

$$\Phi(\Theta_i(s)) = \|\Theta_i(s) - \hat{\Theta}_i(s-1)\|_{\mathbf{P}_s^{-1}}^2 + \lambda(s) \|\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \Theta_i(s)\|_{\mathbf{Q}^{-1}}^2, \quad (3)$$

где  $\|\cdot\|$  – норма с весовыми матрицами  $\mathbf{Q}^{-1}, \mathbf{P}_s^{-1}$ :  $\|\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \Theta_i(s)\|_{\mathbf{Q}^{-1}}^2 = (\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \Theta_i(s); \mathbf{Q}^{-1}(\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \Theta_i(s)))$ ,  $\|\Theta_i(s) - \hat{\Theta}_i(s-1)\|_{\mathbf{P}_s^{-1}}^2 = (\Theta_i(s) - \hat{\Theta}_i(s-1); \mathbf{P}_s^{-1}(\Theta_i(s) - \hat{\Theta}_i(s-1)))$ ,  $(\cdot; \cdot)$  – скалярное произведение,  $\lambda(s)$  – множитель Лагранжа, который является параметром регуляризации.

Оценку  $\hat{\Theta}_i(s)$  будем искать по следующему критерию:

$$\hat{\Theta}_i(s) = \arg \min_{\Theta_i(s)} \Phi(\Theta_i(s))$$

в условиях ограничения  $\frac{\|Y_i - B_i - H_i \hat{\Theta}_i(s)\|^2}{2N} = \sigma_\mu^2$ .

В результате получим выражения для оценки:

$$\hat{\Theta}_i(s) = \hat{\Theta}_i(s-1) + K(s)(Y_i - B_i - H_i \hat{\Theta}_i(s-1)),$$

$$s = 1, 2, \dots, L \quad (4)$$

$$K(s) = \lambda(s) P_s H_i^T (H_i P_s H_i^T \lambda(s) + Q)^{-1},$$

$$P_s = G_{s-1} + \sigma_\zeta^2 I_{2N \times 2N}, \quad G_s \cong P_s - K(s) H_i P_s$$

с начальными условиями:  $G_0 = \sigma_\mu^2 I_{2N \times 2N}$ ,  $\hat{\Theta}_i(0) = \mathbf{0}_{2N \times 1}$ .

Параметр регуляризации определяется по приближенной формуле

$$\lambda(s) \approx \frac{\sqrt{2N} \sigma_\mu \left( \frac{\|Y_i - B_i - H_i \hat{\Theta}_i(s)\|}{\sqrt{2N}} - a \sigma_\mu \right)}{\|\text{diag}(H_i P_s H_i^T)\|}, \quad (5)$$

где  $0 < a \leq 1$ .

Если в (3) множитель Лагранжа  $\lambda(s) = 1$ , то получим алгоритм фильтра Калмана, рассмотренный в работах [14, 15], где параметром регуляризации выступает элемент  $\sigma_\zeta^2$  ковариационной матрицы шумов динамической системы (2).

### Моделирование

Проведен вычислительный эксперимент на ЭВМ при следующих данных для алгоритма (4), (5):  $M=4$  (сигнал 4-QAM), количество передающих и приемных антенн  $N=8$ , СКО фазового шума – один градус, канал связи с релеевскими замираниями и доплеровским расширением спектра, у которого  $(F_D + \Delta f)T \approx 10^{-3}$ , элементы векторов постоянных составляющих  $B_{ci}$ ,  $B_{si}$ , амплитудный дисбаланс  $\gamma_q$ , фазовый дисбаланс  $\Delta \varphi_q$  и начальная случайная фаза  $\varphi_{q0}$  формировались как равномерно распределенные случайные величины на интервале  $[0; 2]$ ,  $[0.5; 1]$ ,  $[-\frac{\pi}{18}; \frac{\pi}{18}]$  и  $[-\pi; \pi]$  соответственно, параметр  $a$  в (5) взят  $a = \frac{1}{\sqrt{2}}$ , длина информационной последовательности  $n = 5600$  символов, аддитивные шумы гауссовские, количество реализаций алгоритма -100.

На рисунках 1 и 3 показаны кривые помехоустойчивости приема сигнала 4-QAM в системе с ММО  $8 \times 8$ , полученные с помощью алгоритма Калмана (процедура (4) с  $\lambda(s) = 1$ ) при

разном значении параметра регуляризации  $\sigma_\zeta^2$  и разным количестве итераций  $L$ : в условиях точно известного канала связи, кроме фазового шума (рис. 1), после оценивания канала алгоритмом из [9-11] (рис. 3).

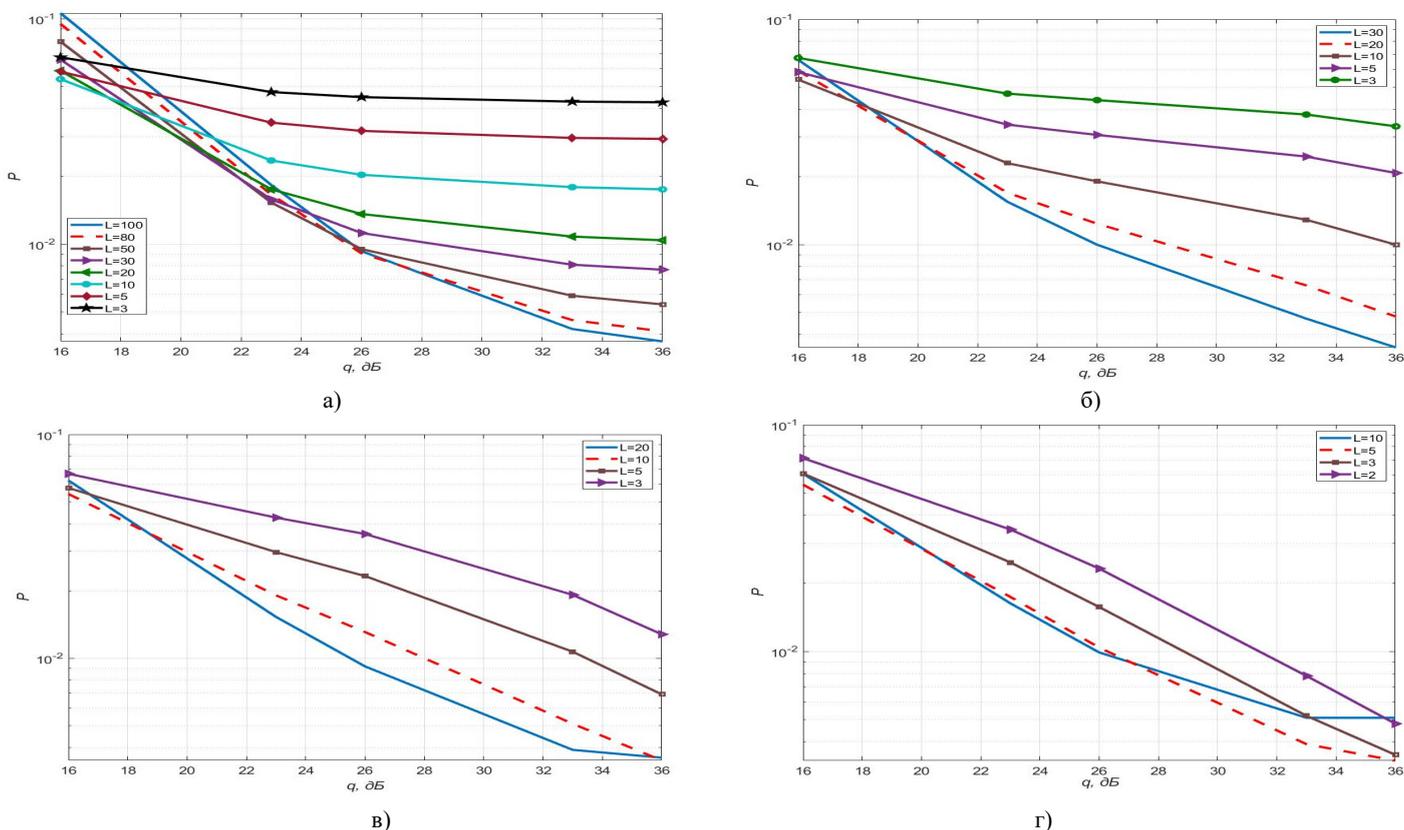
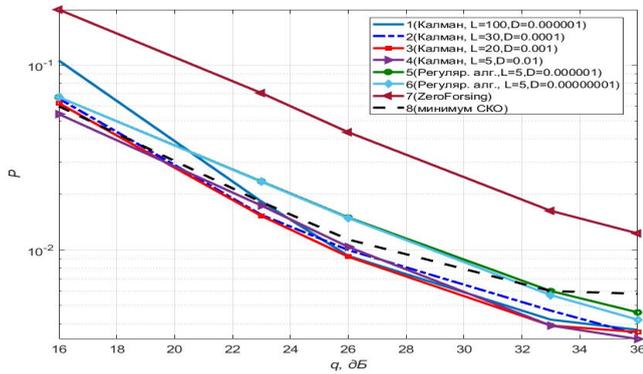
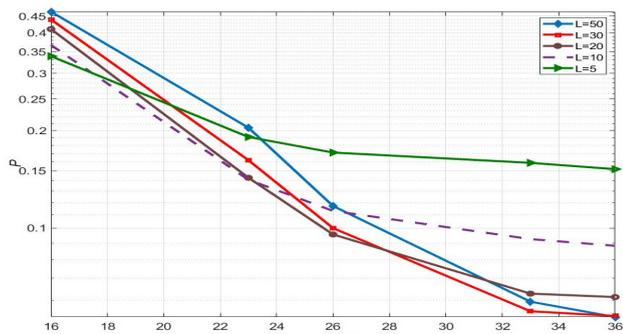


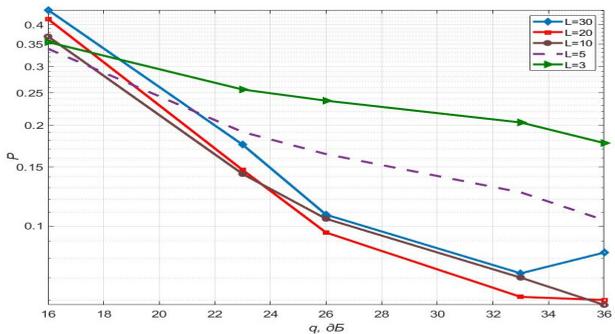
Рис. 1. Экспериментальные зависимости экспериментальной вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит для системы с ММО при  $N=8$ , полученные с помощью алгоритма Калмана для точно известного канала кроме фазового шума:  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-6}$  - а;  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-4}$  - б;  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-3}$  - в;  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-2}$  - г



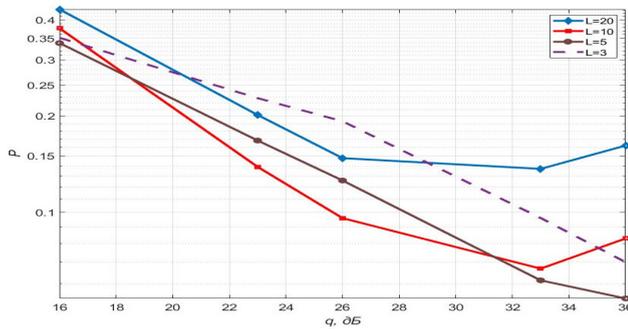
**Рис. 2.** Экспериментальные зависимости экспериментальной вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит, полученные с помощью разных алгоритмов детектирования для системы с MIMO при  $N=8$  для точно известного канала кроме фазового шума ( $D=\sigma_\zeta^2$ )



а)



б)

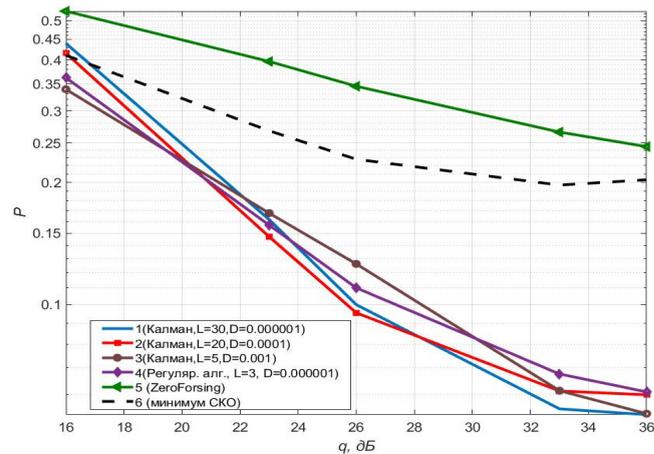


в)

**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит для системы с MIMO при  $N=8$ , полученные с помощью алгоритма Калмана для канала, оцененного алгоритмом из [10, 11]: длина тестовой последовательности - 100 символов, длина интервала экстраполяции - 10 символов, количество сеансов передачи тестового сигнала - 10:  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-6}$  - а;  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-4}$  - б;  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-3}$  - в

Эксперимент показал, что скорость переходного процесса (количество итераций) рекуррентного алгоритма (4) зависит от параметра регуляризации  $\sigma_\zeta^2$ . Например, практически одинаковую помехоустойчивость можно получить при  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-6}$ ,  $L = 100$  (рис. 1а) и  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-2}$ ,  $L = 5$  (рис. 1г).

Рисунки 2 и 4 иллюстрируют помехоустойчивость приема сигнала 4-QAM при  $N=8$ , полученную с помощью разных методов детектирования: Zero Forsing, минимум СКО, алгоритм Калмана (4) при  $\lambda(s) = 1$ , регуляризующий алгоритм (4), (5): в условиях точно известного канала связи, кроме фазового шума (рис. 2), после оценивания канала алгоритмом из [9-11] (рис. 4).



**Рис. 4.** Экспериментальные зависимости вероятности ошибки на символ приема сигнала 4-QAM от отношения сигнал/шум на бит для системы с MIMO при  $N=8$ , полученные с помощью разных алгоритмов детектирования для канала, оцененного алгоритмом из [10, 11] ( $D = \sigma_\zeta^2$ )

Для процедуры (4) для каждого параметра регуляризации  $\sigma_\zeta^2$  выбраны кривые помехоустойчивости, которые показывают минимальную экспериментальную вероятность ошибки приема информационного символа. Из рисунков видно, что в условиях точно известного канала алгоритм Калмана (4) с правильно подобранным значением параметра  $\sigma_\zeta^2$  выигрывает 6-11 дБ относительно процедуры Zero Forsing и 0.5 – 3 дБ относительно алгоритма минимума СКО; регуляризующий алгоритм (4), (5) дает энергетический выигрыш 8 дБ перед Zero Forsing и проигрывает 0.5-2 дБ относительно метода минимума СКО (рис. 2). Если канал оценивается с ошибкой [9-11], то алгоритм Калмана и регуляризующая процедура (4), (5) дают близкую помехоустойчивость и выигрывают относительно процедуры, работающей по критерию минимума СКО до 9 дБ (рис. 4).

#### Анализ вычислительной сложности

Проведена оценка количества операций сложения и умножения для разных алгоритмов детектирования. Процедуры нахождения мягких решений, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Алгоритмы нахождения мягких решений

Метод	Алгоритм
Zero Forsing	$\hat{\Theta}_i = \mathbf{H}_i^{-1}(\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i)$
минимума СКО	$\hat{\Theta}_i = (\mathbf{H}_i^T \mathbf{H}_i + \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N})^{-1} \mathbf{H}_i^T (\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i)$
Калмана	$\hat{\Theta}_i(s) = \hat{\Theta}_i(s-1) + \mathbf{K}(s)(\mathbf{Y}_i - \mathbf{B}_i - \mathbf{H}_i \hat{\Theta}_i(s-1))$ $\mathbf{K}(s) = \mathbf{P}_s \mathbf{H}_i^T (\mathbf{H}_i \mathbf{P}_s \mathbf{H}_i^T + \mathbf{Q})^{-1},$ $\mathbf{P}_s = \mathbf{G}_{s-1} + \sigma_\zeta^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N}, \mathbf{G}_s = \mathbf{P}_s - \mathbf{K}(s) \mathbf{H}_i \mathbf{P}_s,$ $\mathbf{G}_0 = \sigma_\mu^2 \mathbf{I}_{2N \times 2N}, \hat{\Theta}_i(0) = \mathbf{0}_{2N \times 1}$ (Алгоритм (4) при $\lambda(s) = 1$ )
Регуляризующий	Алгоритм (4), (5)

Жесткие решения по полученным  $\hat{\Theta}_i = (\hat{\Theta}_{cli} \dots \hat{\Theta}_{cNi} \hat{\Theta}_{ski} \dots \hat{\Theta}_{sMi})^T$  находились по критерию минимального расстояния между оценками  $\hat{\Theta}_{cki}, \hat{\Theta}_{ski}, k=1,2,\dots,N$  и возможными символами  $I_{0r}, J_{0p}, r, p=1,2,\dots,\sqrt{M}$ :  $(\hat{\Theta}_{cki} - I_{0r})^2 + (\hat{\Theta}_{ski} - J_{0p})^2 = \min_{I_{0r}, J_{0p}}$ .

Вычислительная сложность для разных алгоритмов детектирования показана в таблице 2. Количество арифметических операций  $N_{оп}$  для методов максимального правдоподобия, Zero Forsing, минимума СКО и Калмана даны также в [14, 15].

Таблица 2

Вычислительная сложность алгоритмов детектирования сигнала M-QAM

Метод	Количество операций $N_{оп}$
максимального правдоподобия (МП)	$N_{оп} \cong (8N^2 + 4N - 1)M^N$
Zero Forsing	$N_{оп} \cong 8N^3 + 8N^2 + 5MN$
минимума СКО	$N_{оп} \cong 16N^3 + 18N^2 - N + 5MN$
алгоритм Калмана (4)	$N_{оп} \cong (64N^3 + 10N^2 + 5N)L + 5MN$
Регуляризующий алгоритм (4), (5)	$N_{оп} \cong (64N^3 + 12N^2 + 13N + 4)L + 5MN$

Из таблицы 2 видно, что самой высокой сложностью обладает детектор, работающий по критерию максимального правдоподобия, самыми простыми являются процедуры Zero Forsing и минимума СКО. Для них требуемое количество арифметических операций зависит от числа позиций сигнала  $M$  и количества передающих и приемных антенн  $N$ . Сложность алгоритма Калмана и регуляризирующей процедуры (4), (5) зависит не только от  $M$  и  $N$ , но и от числа итераций  $L$ . Например, при  $M=4, N=8$  вычислительная сложность регуляризирующего алгоритма (4), (5) с  $L=3$  составляет 101092 операций. Практически такую же помехоустойчивость позволяет получить алгоритм Калмана (4) при  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-2}, L=5$  (рис. 4), при этом его сложность равна 167400 операций. Тогда использование процедуры (4), (5) сокращает количество арифметических операций на 39.6 %. Также из рисунка 4 видно, что детектор Калмана (4) при  $\sigma_\zeta^2 = 10^{-4}, L=20$  дает выигрыш до 2 дБ относительно (4), (5) при отношениях сигнал/шум

23-32 дБ. Но его вычислительная сложность, исходя из таблицы 2, равна 669120 операций, что в 6,6 раз превышает сложность регуляризирующей процедуры.

Заключение

1) Анализ алгоритма Калмана (4) показал, что для достижения заданной вероятности ошибки приема возможно подобрать значение параметра регуляризации  $\sigma_\zeta^2$  таким, при котором количество итераций алгоритма было бы минимальным. Недостатком такого подхода является отсутствие выражения для определения  $\sigma_\zeta^2$ , что приводит к его нахождению опытным путем, а это влечет за собой повышение сложности реализации алгоритма.

2) Регуляризующий алгоритм (4), (5) позволяет понизить сложность процедуры детектирования относительно метода Калмана за счет меньшего количества итераций. Кроме того, параметр регуляризации вычисляется по формуле (5) и не требует эмпирического подбора.

3) Помехоустойчивость приема сигнала 4-QAM в системе с ММО с 8-ю передающими и приемными антеннами, полученная с помощью регуляризирующей процедуры (4), (5) либо такая же как у алгоритма Калмана, либо уступает до 2 дБ при оценке канала методом из [9-11]. При этом вычислительная сложность понижается либо на 39.6 %, либо в 6.6. раза относительно метода Калмана (4).

4) Повысить помехоустойчивость приема сигнала при использовании (4), (5) в условиях точно известного канала можно подобрав параметр  $a$  в формуле (5) для расчета множителя Лагранжа.

5) Алгоритм Калмана (4) и регуляризирующая процедура (4), (5) обладают более высокой помехоустойчивостью, чем алгоритмы Zero Forsing, и минимума СКО при условиях оценки канала связи с ошибками. Например, энергетический выигрыш перед алгоритмом, синтезированным по критерию минимума СКО доходит до 9 дБ. При точно известном канале алгоритм Калмана может выиграть до 11 дБ в помехоустойчивости относительно Zero Forsing и до 3 дБ относительно процедуры, реализующей минимум СКО при приеме сигнала 4-QAM в системе с ММО  $8 \times 8$  без кодирования.

Литература

1. Бакулин М.Г., Варукина Л.А., Крейнделин В.Б. Технология ММО: принципы и алгоритмы. М.: Горячая линия-Телеком, 2014. 244 с.
2. Крейнделин В.Б. Новые методы обработки сигналов в системах беспроводной связи. СПб: Линк, 2009. 276 с.
3. Leibo Liu, Guiqiang Peng, Shaojun Wei. Massive MIMO Detection Algorithm and VLSI Architecture, Jointly published with Science Press, Beijing, China <https://doi.org/10.1007/978-981-13-6362-7>, 2019 348p.
4. Wang X. et al. Pilot-Assisted Channel Estimation and Signal Detection in Uplink Multi-User MIMO Systems With Deep Learning // IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 44936-44946.
5. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Итерационный метод демодуляции massive MIMO при негауссовской аппроксимации // Информационные процессы. 2021. Т. 21. № 3. С. 137-148.
6. Bakulin M., Kreyndelin V., Rog A., Petrov D., Melnik S. A new algorithm of iterative mimo detection and decoding using linear detector

and enhanced turbo procedure in iterative loop // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. 2019. № 24. С. 40-46.

7. Панкратов Д.Ю., Степанова А.Г. Вычислительная сложность алгоритмов демодуляции систем ММО с большим числом антенн // DSPA: вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2021. №1. С. 11-20.

8. Teng Joon Lim, Lars K. Rasmussen and Hiroki Sugimoto. An asynchronous multiuser CDMA detector, based on the Kalman filter // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 1998. Vol. 16. № 9, pp. 1711-1722.

9. Poborchaya N.E. DC-offset and IQ-imbalance estimation in the MIMO system // IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2017, 3-4 July, Russia, Kazan.

10. Maksimov S. Yu., Poborchaya N.E. Estimation of a channel factors and signal distortions in the MIMO system with a direct transform receiver under the conditions of rayleigh fading and doppler frequency dispersion // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 1-3 July 2020, Svetlogorsk, Russia. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166116.

11. Poborchaya N.E., Pestryakov A.V., Lobova E.O. Application of Approximation Constructions with a Small Number of Parameters for the Estimation of a Rayleigh Fading Multipath Channel with Doppler Spectrum Spreading // Sensors, 2022, 22, 3488. <https://doi.org/10.3390/s22093488>

12. Тихонов А.Н., Леонов А.С., Ягола А.Г. Нелинейные некорректные задачи. М.: Наука Физматлит, 1995. 312 с.

13. Poborchaya, N.E. Synthesis of an Algorithm for Estimating Signal Distortions in a Direct Conversion Receiver Based on Combining a Regularizing Procedure and a Nonlinear Filtering Method // J. Commun. Technol. Electron, no. 66, pp. 964-970, 2021. <https://doi.org/10.1134/S1064226921080064>

14. Поборчая Н.Е., Лобова Е.О. Анализ использования фильтра Калмана в процедуре детектирования сигнала в системе с ММО и приемником прямого преобразования // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2022. №3. С. 34-39.

15. Poborchaya N.E., Lobova E.O. Analysis of the Use of the Kalman Filter for Signal Detection in a Direct Conversion Receiver in MIMO // 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840963.

## REGULARIZING ALGORITHMS BASED ON KALMAN FILTERING FOR M-QAM SIGNAL DETECTION IN MIMO

Natalya E. Poborchaya, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, [n.poborchaya@mail.ru](mailto:n.poborchaya@mail.ru)

### Abstract

The aim of the article is to increase the noise immunity of signal reception with a satisfactory computational complexity of signal processing algorithms. The article discusses two regularizing recurrent algorithms for detecting quadrature amplitude modulation (M-QAM) signal in a multiple-input and multiple-output (MIMO) method and a direct transform receiver based on the Kalman filter. Kalman filtering using for soft decision detection operates at a fixed point in time and estimates symbols in iterations. The proposed detection algorithms contain a regularizing parameter. For one algorithm, the regularization parameter is selected empirically, for the other, it is found by a closed expression, which includes estimations of symbols obtained at the last step of the iterative algorithm. Hard decisions are determined by the criterion of the minimum distance between the received soft decisions and the possible values of symbols for each transmitting antenna separately. The proposed detectors are compared in terms of noise immunity (in a system without coding) with the Zero Forcing method and an algorithm that works according to the root-mean-square error (RMS) criterion. The channel is supposed to be known or it is estimated by the least squares (LS) method using first-order polynomial approximation. The article claims that regularizing detection algorithms make it possible to increase the noise immunity of signal reception relative to the Zero Forcing algorithms and RMS. In addition, this article contains an analysis of the computational complexity of the proposed recurrent algorithms. The use of the regularization parameter makes it possible to reduce the number of iterations in the detection algorithm needed to obtain the required error probability per symbol. This can reduce the number of arithmetic operations, resulting in a reduction in the computational complexity of signal processing algorithms. The proposed detection algorithms are more complicated than the Zero Forcing and RMS, but it is much simpler than the detector synthesized according to the maximum likelihood (ML) algorithm.

**Keywords:** QAM, MIMO, direct transform receiver, Kalman filtering, regularization parameter, detection, Rayleigh channel with Doppler spread spectrum.

## References

1. Bakulin M.G., Varukina L.A., Kreyndelin V.B. (2014), *Tekhnologiya MIMO: printsipy i algoritmy [MIMO technology: principles and algorithms]*, Moscow: Goruachaya Linia – Telecom.
2. Kreyndelin V.B. (2009), *New methods of signal processing in wireless communication systems*, Link, Saint Petersburg, Russia.
3. Leibo L., Guiqiang P., Shaojun W. (2019), "Massive MIMO Detection Algorithm and VLSI Architecture", Jointly published with Science Press, Beijing, China.
4. Wang X. (2020), "Pilot-Assisted Channel Estimation and Signal Detection in Uplink Multi-User MIMO Systems With Deep Learning", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 44936-44946.
5. Bakulin M.G., Kreyndelin, V.B. Pankratov, D. Yu. And Stepanova A.G. (2021), "Massive MIMO Iterative Demodulation Method with Non-Gaussian Approximation", *Information processes*, vol. 21, no. 3, pp. 137-148.
6. Bakulin M., Kreyndelin V., Rog A., Petrov D. and Metelkun S. (2019), "A new algorithm of iterative MIMO detection and decoding using linear detector and enhanced turbo procedure in iterative loop", *Conference of Open Innovations Association, FRUCT*, Moscow, no. 24, pp. 40-46.
7. Pankratov D. Yu. and Stepanova A.G. (2021), "Computational complexity of demodulation algorithms for MIMO systems with a large number of antennas", *DSPA*, no.1, pp. 11-20.
8. Teng J. L. and Lars K. (1998), "Rasmussen and Hiroki Sugimoto. An asynchronous multiuser CDMA detector, based on the Kalman filter", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 16, no. 9, pp. 1711-1722.
9. Poborchaya N.E. (2017), "DC-offset and IQ-imbalance estimation in the MIMO system", *IEEE Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO, 2017*, 3-4 July, Russia, Kazan.
10. Maksimov S. Yu. and Poborchaya N.E. (2020), "Estimation of a channel factors and signal distortions in the MIMO system with a direct transform receiver under the conditions of rayleigh fading and doppler frequency dispersion", *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 1-3 July 2020, Svetlogorsk, Russia.
11. Poborchaya N.E., Pestryakov A.V. and Lobo E.O. (2022), "Application of Approximation Constructions with a Small Number of Parameters for the Estimation of a Rayleigh Fading Multipath Channel with Doppler Spectrum Spreading", *Sensors*, vol. 22, no. 9, pp. 3488.
12. Tikhonov A.N., Leonov A.S., Yagola A.G. (1995), *Nonlinear ill-posed problems*, Moscow: Nauka Fizmatlit.
13. Poborchaya N.E. (2021), "Synthesis of an Algorithm for Estimating Signal Distortions in a Direct Conversion Receiver Based on Combining a Regularizing Procedure and a Nonlinear Filtering Method", *J. Commun. Technol. Electron*, vol. 66, pp. 964-970.
14. Poborchaya N.E. and Lobo E.O. (2022), "Analysis of the Use of the Kalman Filter for Signal Detection in a Direct Conversion Receiver in MIMO," *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications*, no. 3, pp. 34-39.
15. Poborchaya N.E. and Lobo E.O. (2022), "Analysis of the Use of the Kalman Filter for Signal Detection in a Direct Conversion Receiver in MIMO", *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1-5.