

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

На правах рукописи

Латыпова Софья Сергеевна

Метод оптимизации сигнальных конструкций КАМ

Направление подготовки 11.06.01 - Электроника, радиотехника и системы связи

Направленность 11.06.01_01 - Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: Латыпова Софья Сергеевна

Научный руководитель: профессор, д.т.н.,

Макаров Сергей Борисович

Актуальность. Применение сигнальных конструкций квадратурной амплитудной манипуляции (СК КАМ) позволяет эффективно использовать частотно-временной и энергетический ресурс. Эти конструкции просты в формировании и реализации и имеют сравнительно высокую удельную скорость передачи информации. Кроме того, групповые сигналы, образованные аддитивной смесью сигнальных конструкций КАМ на ортогональных между собой поднесущих частотах (OFDM – ортогональное частотное мультиплексирование), в настоящее время широко используются в современных системах спутниковой, радио и радиорелейной связи.

Использование КАМ стандартизировано в беспроводных системах связи (LTE, IEEE 802.11, -802.15.3a, -802.16, -802.16e, -802.20, Flash-OFDM и HIPERLAN/2), наземных системах цифрового телевидения (DVB-S, DVB-S2, DVB-S2X, DVB-T, DVB-T2 и ISDB-T), системах цифрового радиовещания DRM.

Способам построения КАМ посвящены научные работы [1-3], существует ряд изобретений. Известны иерархические КАМ (ИКАМ), которые позволяют в большинстве случаев обеспечить значительное преимущество битов первого потока по потенциальной помехоустойчивости в сравнении с битами второго потока. Данные СК используются в DVB-T, ISDB-T, а также в DVB-S2 по рекомендациям МСЭ-R ВО.1784 для совместимости с предыдущими версиями.

В системах передачи информации могут действовать различные шумы и помехи, в том числе и преднамеренные. Однако известные способы построения СК КАМ не учитывают особенности канала и помех в нём. В работе предлагается метод оптимизации СК КАМ, который позволяет строить сигнальные конструкции в зависимости от канала передачи информации, если его можно описать аналитически. То есть форма сигнальной конструкции будет зависеть от типа канала и помех в нём. Это позволит увеличить помехоустойчивость системы без увеличения отношения сигнал/шум, что особенно актуально для систем OFDM, в которых на несущих используется КАМ.

Исходя из вышесказанного:

Цель диссертационной работы – повышение частотно-энергетической эффективности применения сигналов квадратурной амплитудной модуляции (КАМ) путём параметрической оптимизации сигнальных конструкций КАМ по коэффициентам расположения сигнальных точек.

Объект исследования – системы передачи информации, использующие сигнальные конструкции КАМ.

Предмет исследования – способы формирования сигнальных конструкций КАМ.

Научная задача – разработка метода оптимизации сигнальных конструкций КАМ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод оптимизации сигнальных конструкций КАМ.
2. Методика разработки алгоритмов когерентного приема сигнальных конструкций КАМ, оптимизированных на основе предлагаемого метода, в канале с постоянными параметрами.

Раздел 1 Суть метода оптимизации СК КАМ

Для повышения энергетической эффективности СК КАМ предлагается её оптимизировать, то есть изменить конструкцию СК КАМ для снижения вероятности ошибочного приёма без увеличения отношения сигнал/шум.

Для построения СК КАМ в предлагаемом методе применяется набор параметров, описывающих положения сигнальных точек, которые определяются манипуляцией векторов $u_{ki}=k_i u_{ucx}$, где u_{ki} –манипулированный вектор, k_i – коэффициент расположения сигнальной точки, $i=1,2,..$. Количество коэффициентов k_i зависит от количества сигнальных точек. Для поиска оптимальных коэффициентов k_i необходимо решить оптимизационную задачу, в основе которой лежит критерий минимизации вероятности ошибки:

$$\underset{\mathbf{k}}{\operatorname{argmin}} \{P_{ou}(\mathbf{k}, h^2)\}, \quad (1)$$

где h^2 – отношение сигнал/шум, $\mathbf{k}=(k_1, k_2, \dots, k_n)$ – вектор коэффициентов расположения сигнальных точек.

При решении оптимизационной задачи минимизируется вероятность ошибки на символ. Однако для иерархических СК КАМ, в которых обеспечивается преимущества битов первого потока за счёт битов второго потока по помехоустойчивости, критерием выбирается вероятность ошибки на бит первого потока. Для вероятности ошибки на бит второго потока задаются ограничения.

Иерархические СК представляют собой такие сигнальные конструкции, в которых каждая сигнальная точка содержит биты или группу бит принадлежащих различным пользователям либо передающих информацию разной степени важности. В этом случае важно знать какую помехоустойчивость может обеспечить каждый бит сигнальной точки. На основании этого можно “закрепить” за отдельными битами или группами бит, обладающих разной помехоустойчивостью, передачу информации различной степени важности. Другими словами, это называется разбиением общего транспортного потока на подпотоки по приоритетам или иерархическая передача информации.

Иерархические СК КАМ используются в стандарте DVB-T. При неблагоприятных условиях эфирного приема применение иерархического метода модуляции позволяет повысить живучесть системы цифрового телевидения. Для этого передаваемый цифровой поток разбивается на два потока. Скорость первого потока выбирается равной $1/2$ при 16-КАМ и $1/3$ при 64-КАМ от скорости основного потока. (При этом скорость 2-го потока составит, соответственно, $1/2$ или $2/3$ от скорости основного потока.) [8]. Первый поток кодируется с более высокой помехоустойчивостью, и в нем передается наиболее значимая часть информации, например, старшие разряды видео- и звукоданных. Второй поток кодируется с меньшей помехоустойчивостью и используется для передачи менее значимой части информации. При этом разница в отношении сигнал/шум для пороговых точек демодуляции первого и второго потока выбирается в пределах 10...15 дБ [9]. Если не удастся демодулировать второй цифровой поток из-за неблагоприятных условий, ТВ-изображение на экране телевизора сохраняется, хотя и воспроизводится с ухудшенным качеством (повышенным уровнем шумов и

пониженной четкостью). С улучшением условий приема качества изображения полностью восстанавливается.

В результате решения оптимизационной задачи находится вектор оптимальных коэффициентов:

$$\mathbf{k}_{opt}(h^2 mp) = \underset{\mathbf{k}}{\operatorname{argmin}} P_{out}(\mathbf{k}, h^2), \quad (2)$$

где \mathbf{k} – вектор оптимальных коэффициентов расположения сигнальных точек, имеющий вид $\mathbf{k} = \{k_i, i = 1 \dots m\}$, $h^2 mp$ – требуемое отношение сигнал/шум, $P_{out}(\mathbf{k}, h^2)$ – вероятность ошибки, которая зависит от коэффициентов расположения СТ и от ОСШ.

Для практических случаев важно, чтобы вероятность ошибки была не хуже заданной. В этом случае критерием является минимум отношения сигнал/шум при заданной вероятности ошибки. Тогда \mathbf{k} можно найти, исходя из (3)

$$\mathbf{k}_{opt}(P_{out} mp) = \underset{\mathbf{k}}{\operatorname{argmin}} \{P_{out}(\mathbf{k}, h^2) = P_{out} mp\} \quad (3)$$

То есть при заданной требуемой вероятности ошибки происходит поиск таких коэффициентов расположения сигнальных точек, при которых ОСШ будет минимальным. Соотношения (2) и (3) являются равнозначными.

Допущения (ограничения):

Априорные вероятности символов равны или неизвестны;

Модель канала должна быть задана аналитически и учтена в формулах вероятности ошибки.

В данном случае мы имеем дело с параметрической оптимизацией. Для того, чтобы найти коэффициенты расположения СТ, задаётся требуемая вероятность ошибки и происходит поиск таких коэффициентов, при которых ОСШ будет минимальным. Оптимизация выполняется для всех ОСШ не ниже того, при котором вероятность ошибки будет требуемой.

Метод оптимизации СК КАМ проиллюстрирован на рисунке 1.

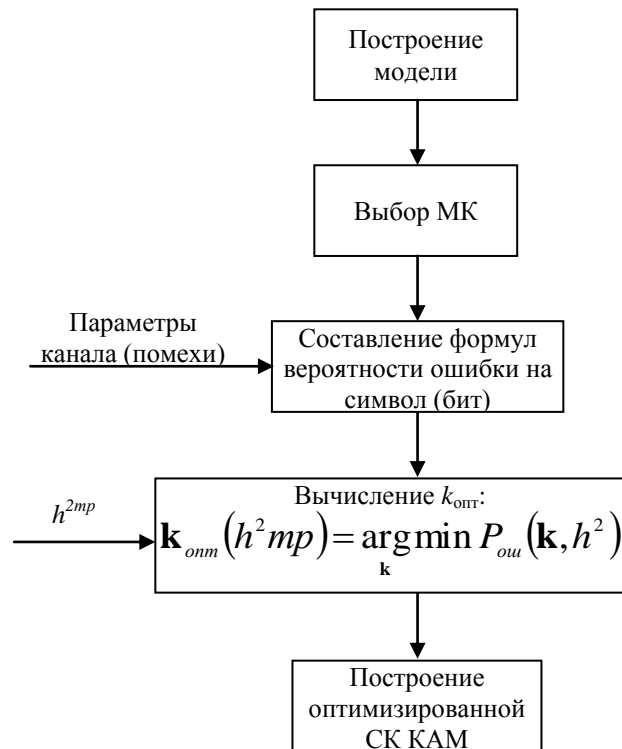


Рисунок 1

На первом этапе производится построение модели СК КАМ. Предлагается располагать сигнальные точки (СТ) на окружностях. Число окружностей выбирается исходя из позиционности КАМ. Для КАМ-16 используется две окружности, для КАМ-32 используется три окружности, для КАМ-64 –четыре и т.д. На внутренней окружности располагается четыре СТ, на следующей 12, далее 16, 32, 64 и т.д.

Для построения СК КАМ в предлагаемом методе применяется набор параметров, описывающих положения сигнальных точек, которые определяются манипуляцией векторов $u_{ki} = k_i u_{ucx}$, где u_{ki} –манипулированный вектор, k_i – коэффициент расположения сигнальной точки, $i=1,2,..$. Количество коэффициентов k_i зависит от количества сигнальных точек. Исходя из симметрии сигнальных конструкций, возможно нахождение коэффициентов расположения СТ только в одном квадранте.

Получить коэффициенты расположения сигнальных точек для изначальной модели СК КАМ можно исходя из максимизации минимального евклидова расстояния (ЕР) d_e при сохранении принципов формирования СК на основе квадратурных составляющих.. СК КАМ должна обладать конечной энергией,

поэтому радиус внешней окружности принимается за исходный. СТ располагаются равномерно на окружностях. При этом минимальное расстояние между сигнальными точками двух соседних окружностей должно быть равно минимальному расстоянию между СТ меньшей окружности, $d_1=d_2$ (см. рис.2). После оптимизации сигнальной конструкции принцип максимизации минимального евклидова расстояния не соблюдается, а расположение сигнальных точек зависит от отношения сигнал/шум

На рисунке 2 в качестве примера показана модель СК КАМ-16 в манипуляционном коде Грея. Здесь коэффициенты k_i обозначены как a , b и c .

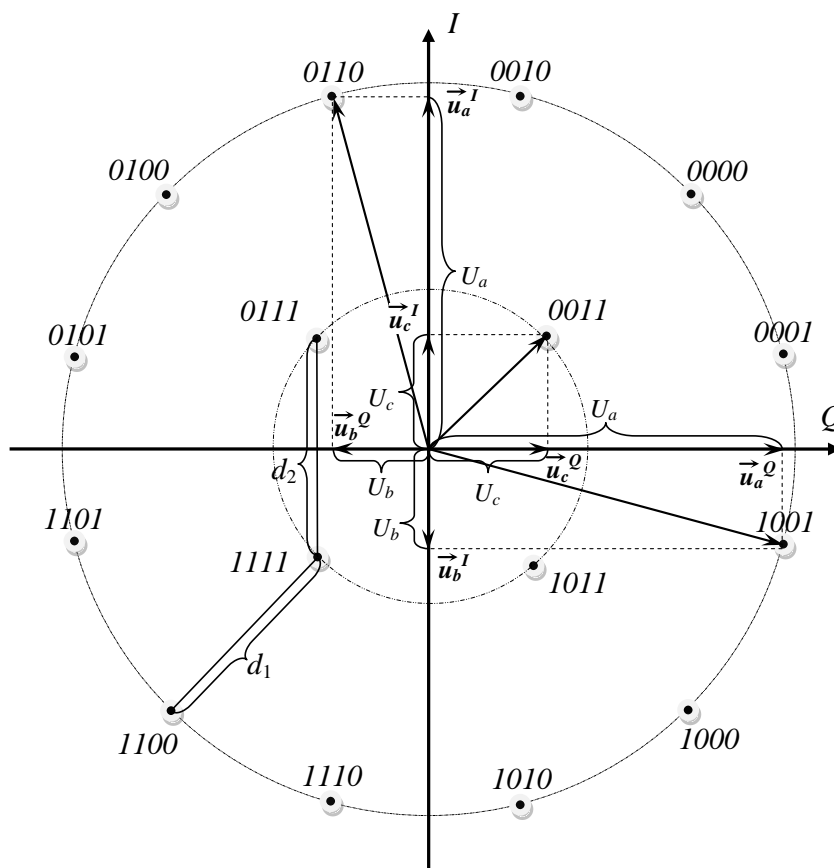


Рисунок 2

Положения сигнальных точек определяется манипуляцией векторов $u_a=au_{исх}$, $u_b=bu_{исх}$, $u_c=cu_{исх}$. На рисунке 2 если данные вектора откладываются на синфазной оси, то они обозначаются \vec{u}_a^I , \vec{u}_b^I и \vec{u}_c^I . Если на квадратурной оси – то \vec{u}_a^Q , \vec{u}_b^Q и \vec{u}_c^Q . I и Q – синфазная и квадратурная составляющие соответственно, d_1 , d_2 – минимальное ЕР между соседними точками. Коэффициенты a , b и c определяют

положение сигнальных точек (для точек 0000, 0100, 1000 и 1100 этот коэффициент равен единице). По сути, коэффициенты являются координатами сигнальных точек.

На основе предлагаемого способа построения сигнальных конструкций с помощью коэффициентов расположения СТ реализованы устройства формирования сигналов КАМ-16 [4] и КАМ-32 [5].

Следующий этап - выбор манипуляционного кода.

Выбор соответствия между кодовыми комбинациями и точками сигнального созвездия называют выбором манипуляционного кода. При выборе манипуляционного кода необходимо исходить из двух основных требований: обеспечения максимальной помехоустойчивости и простоты технической реализации операций кодирования-декодирования.

Лучшую помехоустойчивость дают манипуляционные коды, при которых соседние кодовые комбинации отличаются друг от друга только в одном бите. В случае АБГШ целесообразно применять код Грея, при котором сигнальным точкам, находящиеся на минимальном евклидовом расстоянии, ставятся в соответствие кодовые комбинации, отличающиеся только одним элементом.

Выбранный манипуляционный код влияет на границы областей принятия решения, а следовательно на помехоустойчивость сигнальной конструкции. На рисунке 2 сигнальная конструкция построена с использованием кода Грея, так как это позволяет повысить её потенциальную помехоустойчивость.

Эффективность использования СК КАМ связана с помехоустойчивостью, поэтому критерием выбирается вероятность ошибки.

Точные формулы вероятности ошибки на бит рассчитываются исходя из компенсационного подхода. Эта задача решается в [27, 28]. Априорные вероятности символов должны быть равны или неизвестны

Исходя из компенсационных алгоритмов, правило оценивания двоичных символов записывается в виде:

$$\mathbf{r}^* = \text{rect} \{ \mathbf{y} - \mathbf{g} \}, \quad (4)$$

где $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ – функция принятия решения,

$\mathbf{r}^* \triangleq (r_1, r_2, \dots, r_K)^T$ – вектор информационных параметров сигналов;

$\mathbf{g} \triangleq (g_1, g_2, \dots, g_K)^T$, $g_i \triangleq g_i(\mathbf{y}) = g_i[(y_1, y_2, \dots, y_K)]$ – вектор оптимальных границ областей принятия решений (ГОПР);

где $y_i \triangleq (y, \hat{s}_i)$; $\hat{s}_i = (\sqrt{E_i})^{-1} s_i$, $i=1..K$ – нормированный i -ый двоичный цифровой сигнал.

Как следует из формального представления в компенсационном виде алгоритма, основной задачей для получения формул вероятности ошибки является построение границ областей принятия решения. Границы строятся для каждого бита на одинаковом расстоянии от сигнальных точек, соответствующих разным значениям двоичного символа в пространстве сигналов.

На рисунке 3 представлены границы областей принятия решения третьего и четвертого битов СК КАМ-16 при МК Грея. (Пунктирные линии - для третьего бита, сплошные линии – для четвертого бита). Очевидно, что границы, разделяющие области принятия решения по первому и второму битам, лежат на осях, соответствующих синфазной $\vec{u}_{\text{исх}}^1$ и квадратурной $\vec{u}_{\text{исх}}^2$ составляющим. Границы, разделяющие области принятия решения по третьему и четвертому битам, как видно из рисунка 3, представляют собой линейно-ломанные линии.

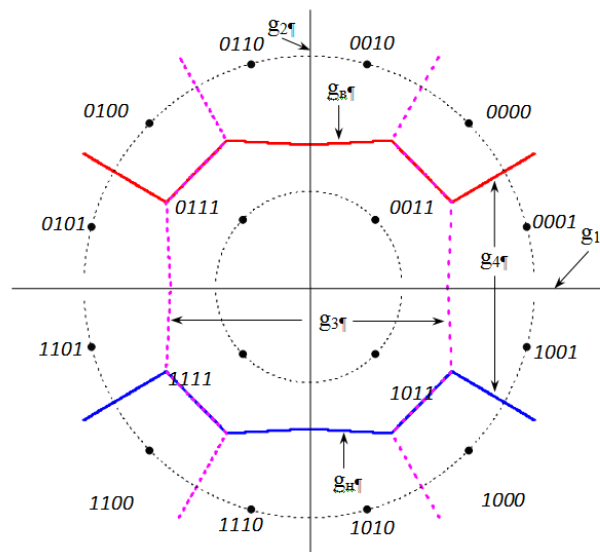


Рисунок 3

В случае равных либо неизвестных априорных вероятностей вероятность ошибки определяется:

$$P[osh] = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k P_i[osh] \quad (5)$$

где $P_i[osh]$ – вероятность ошибки i -го бита СК КАМ, которая определяется:

$$P_i[osh] = p_i(0)P_i[osh/r_i = 0] + p_i(1)P_i[osh/r_i = 1]; \quad (6)$$

$$P_i[osh/r_i = 0] = \sum_{r_1=0}^1 \sum_{r_2=0}^1 \dots \sum_{r_k=0}^1 P(r_1)P(r_2)\dots P(r_k)P_i[osh/r_1, r_2, \dots, r_k, r_i = 0]; \quad (7)$$

$$P_i[osh/r_1, r_2, \dots, r_k, r_i = 0] = \int_{-\infty}^{g_1(y_1)} \int_{g_2(y_1)}^{\infty} f(r, y_1, y_2) dy_1 dy_2, \quad (8)$$

где $g_1(y)$, $g_2(y)$ – границы интегрирования, которые являются границами областей принятия решения;

$$f(r, y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{(y_1 - m_1(r))^2}{\sigma^2} + \frac{(y_2 - m_2(r))^2}{\sigma^2}\right)\right\} \quad (9)$$

Областей принятия решений может быть несколько, а значит и областей интегрирования может быть больше одной. Всё зависит от конкретного случая КАМ и используемого манипуляционного кода. Рассчитывать подобным образом вероятность ошибки на бит можно как оптимизированных КАМ, так и традиционных. Как уже говорилось выше, главное – правильное построение ГОПР. Анализ показал, что работ, в которых подобным образом представлялась бы вероятность ошибки, нет.

Представленные выше формулы используются при АБГШ. Если в канале присутствует помеха, то это также должно быть учтено в формулах вероятности ошибки с помощью соответствующих коэффициентов.

Наилучшей помехоустойчивости можно добиться, если оптимизировать сигнальную конструкцию таким образом, чтобы она изменяла свои параметры в зависимости от отношения сигнал/шум.

Для построения оптимизированных СК КАМ необходимо решить оптимизационную задачу по поиску коэффициентов расположения СТ (3).

Как видно из (3), задаётся требуемая вероятность ошибки и вычисляются коэффициенты расположения СТ \mathbf{k}_{opt} , при которых отношение сигнал/шум будет минимальным. Если необходимо оптимизировать иерархическую КАМ, то накладываются ограничения на вероятности ошибки для каждого бита или группы бит.

Путем использования численных методов оптимизации MathCad или MatLab, можно получить $\mathbf{k}_{\text{opt}}=(k_i, i=1..m)$, где k_i – величины квадратур сигнальных точек, то есть коэффициенты расположения СТ. С помощью данных коэффициентов строится новая сигнальная конструкция, позволяющая при требуемой вероятности ошибки уменьшить ОСШ.

Применение этого метода возможно как при АБГШ, так и при различных помехах, которые учитываются в формулах вероятности ошибки. Использование СК КАМ, в которых СТ расположены предлагаемым при построении модели способом на окружностях, имеют энергетический выигрыш по сравнению с традиционными СК КАМ, в которых СТ расположены в узлах решётки. Однако оптимизация даёт дополнительный выигрыш.

Параметрами оптимизации СК КАМ в предлагаемом методе являются величины квадратур (координаты СТ в евклидовом пространстве сигналов). Такой подход позволяет оптимизировать положение СТ в зависимости от помеховой обстановки и вне зависимости от расположения других СТ, что делает сигнальное созвездие лучше адаптированным к каналу. Оптимизация производится для произвольных моделей канала, если их можно представить аналитически. Для каждого случая определяются наилучшее расположение СТ в сигнальной конструкции.

На рисунке 4 изображена оптимизированная СК КАМ при наличии двоичной помехи (требуемая $P_{\text{ош}}=10^{-1}$). Пунктиром показаны окружности, на которых располагались СТ до оптимизации.

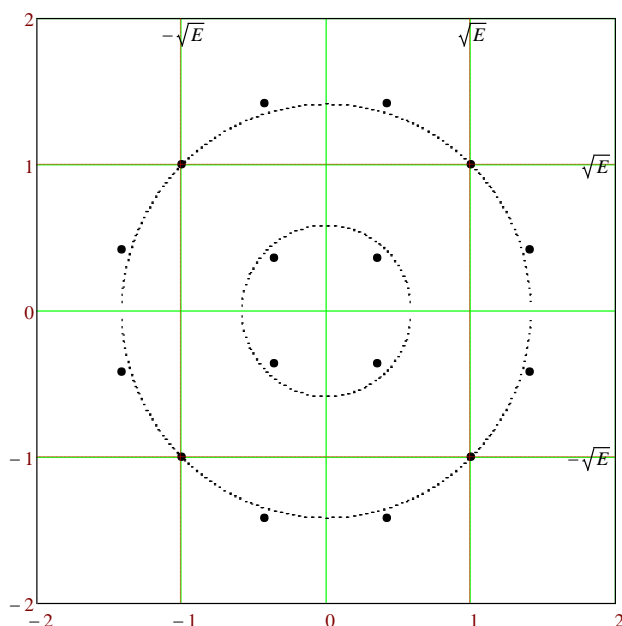


Рисунок 4

На рисунке 5 представлена СК КАМ-16, оптимизированная при наличии мешающей КАМ, которая может быть, например, сигналом другой системы, влияющим на полезный сигнал ввиду недостатков электромагнитной совместимости оборудования. Требуемая вероятность ошибки символа $P_{\text{ош}}=10^{-3}$.

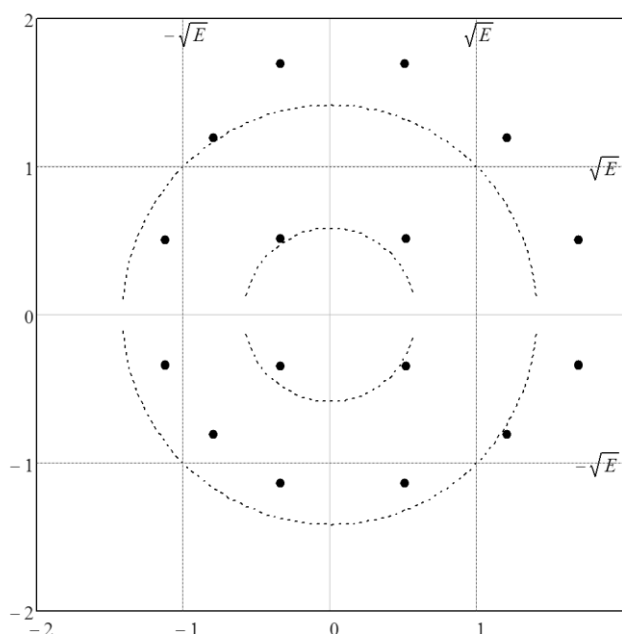


Рисунок 5

Как видно из рисунка 5, оптимизация СК КАМ при наличии мешающей КАМ изменяет расположение СТ, которые без мешающей КАМ располагались равномерно на окружностях.

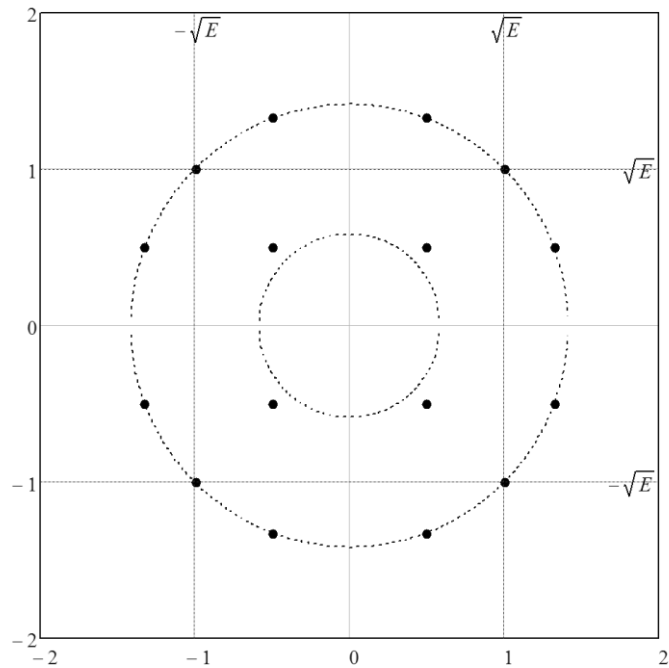


Рисунок 6

На рисунке 6 представлена оптимизированная иерархическая СК КАМ-16. Она оптимизирована предложенным в работе методом при условии, что требуемая вероятность ошибки третьего и четвертого бита равны 10^{-3} .

Научная новизна предлагаемого метода состоит в том, что оптимизация происходит за счёт изменения расположения СТ в зависимости от канала и помех в нём, так как параметрами оптимизации являются коэффициенты расположения СТ. При этом применение компенсационного подхода при построении правила принятия решения позволяет оптимизировать СК КАМ как по минимуму вероятности ошибки на групповой символ, так и по минимуму вероятности ошибки символа i -го пользователя.

График средней вероятности ошибки на бит СК традиционной («квадратной») и оптимизированной КАМ-16 в зависимости от максимального отношения сигнал/шум h_0^2 при натуральном МК и МК Грея представлены на рисунке 7.

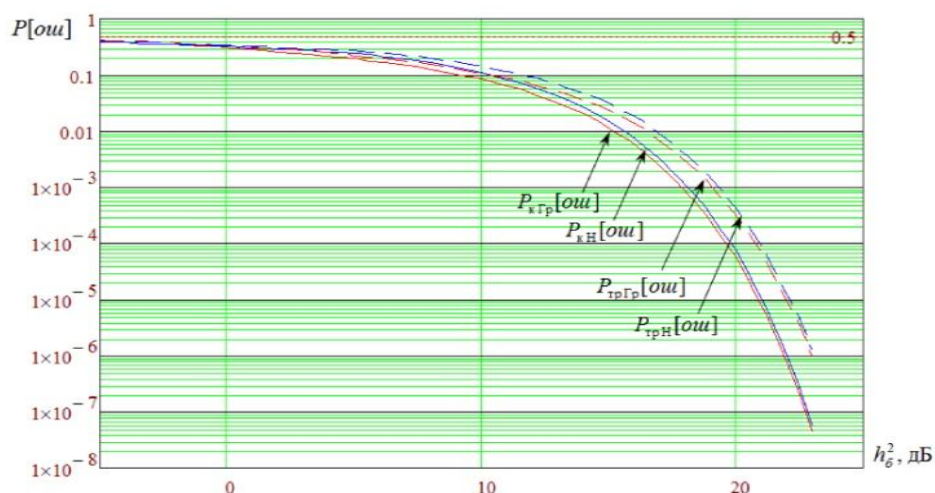


Рисунок 7

На графике, изображенном на рисунке 7, $P_{кГр}$ – вероятность ошибки оптимизированной СК КАМ в МК Грея, $P_{кН}$ – вероятность ошибки оптимизированной СК КАМ в натуральном МК, $P_{трГр}$ – вероятность ошибки традиционной СК КАМ в МК Грея, $P_{трН}$ – вероятность ошибки традиционной СК КАМ в натуральном МК.

Как видно из рисунка 7, оптимизированные СК КАМ имеют преимущество по уровню помехоустойчивости по сравнению с традиционными СК квадратной формы. Кроме того, из графиков видно, что манипуляционный код так же влияет на помехоустойчивость сигнальной конструкции.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ запаса мощности при использовании традиционной СК КАМ-16, в которой СТ расположены в узлах решётки, и оптимизированной СК КАМ-16, в которой СТ расположены на окружностях, при натуральном МК и МК Грея

Таблица 1

	$P_{тр}[ош]$											
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
$\Delta h_{Гр}^2$ (дБ)	1,21	1,23	1,21	1,16	1,1	1,06	1,03	1	0,99	0,97	0,96	0,94
$\Delta h_{Н}^2$ (дБ)	1,24	1,24	1,2	1,15	1,1	1,06	1,03	1	0,98	0,96	0,95	0,93
$\Delta h_{тр}^2$ (дБ)	1,23	0,42	0,25	0,17	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
$\Delta h_{к}^2$ (дБ)	1,2	0,41	0,25	0,18	0,13	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06
$\Delta h_{опт}^2$ (дБ)	0,214	0,009	0,003	0,0009	0,0001	0,0001	0,0001	0,0002	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003

В данной таблице использованы следующие обозначения: $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ – требуемая вероятность ошибки; $\Delta h^2_{\text{гр}}$ – запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ при сравнении СК традиционной и оптимизированной КАМ-16 в МК Грея; $\Delta h^2_{\text{н}}$ – запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ при сравнении СК традиционной и оптимизированной КАМ-16 в натуральном МК; $\Delta h^2_{\text{тр}}$ – запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ при сравнении СК традиционной КАМ-16 в натуральном МК и МК Грея; $\Delta h^2_{\text{к}}$ – запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ при сравнении СК оптимизированной КАМ-16 в натуральном МК и МК Грея, $\Delta h^2_{\text{опт}}$ – запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ при сравнении СК оптимизированной КАМ-16 в МК Грея до оптимизации по коэффициентам расположения СТ и после оптимизации, то есть дополнительный запас мощности, получаемый в результате оптимизации СК КАМ-16, в которой СТ были расположены на окружностях. После оптимизации по коэффициентам дополнительный энергетический выигрыш небольшой, однако при использовании СК КАМ на несущих в системах OFDM общий выигрыш получается значительней.

На рисунке 8 представлен график средней вероятности ошибки на бит СК традиционной и оптимизированной КАМ-32 в зависимости от максимального отношения сигнал/шум h_0^2 , где $P_{\text{к}}$ – вероятность ошибки оптимизированной СК КАМ, $P_{\text{тр}}$ – вероятность ошибки традиционной СК КАМ.

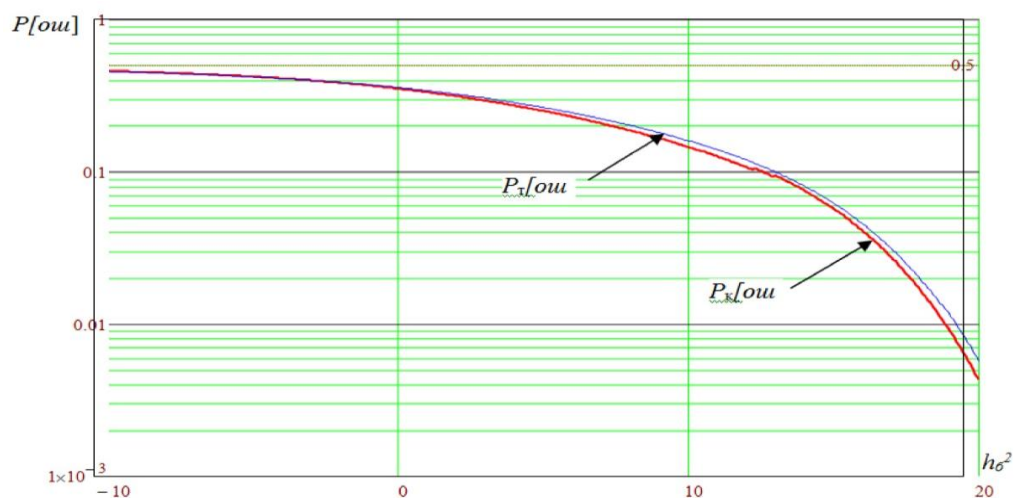


Рисунок 8

Таблица 2

	$P_{тр}[ош]$									
	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8	10-9	10-10
Δh_2 (дБ)	0.59	0.47	0.384	0.34	0.31	0.295	0.287	0.285	0.283	0.28

В таблице 2 использованы следующие обозначения: $P_{тр}[ош]$ – требуемая вероятность ошибки; Δh_2 – запас мощности, необходимый для достижения $P_{тр}[ош]$ при сравнении СК традиционной КАМ-32 с оптимизированной.

Оптимизированные СК КАМ по сравнению с традиционными СК КАМ имеют выигрыш в ОСШ до 1,25 дБ для КАМ-16 и до 0,6 дБ для КАМ-32.

На рисунке 9 изображен график вероятности ошибки традиционной $P_{оштр}$ и оптимизированной $P_{ош}$ КАМ-16 при наличии помехи (двоичный сигнал).

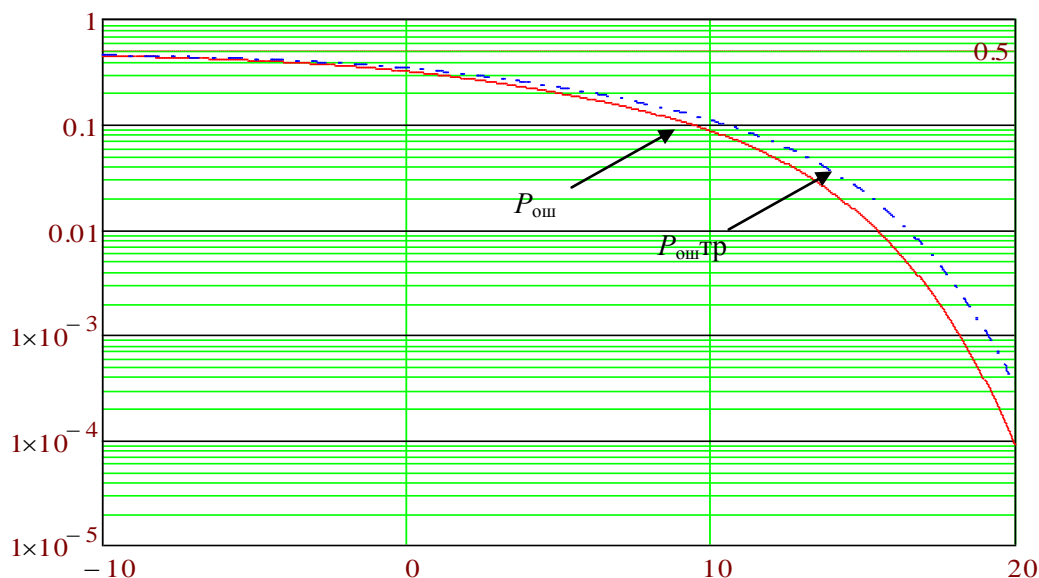


Рисунок 9

В таблице 3 представлен сравнительный анализ запаса мощности при использовании традиционной СК КАМ-16 и оптимизированной СК КАМ-16 в МК Грея при наличии двоичной помехи.

Таблица 3

	$P_{тр}[ош]$											
	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
$\Delta h_{п}^2$ (дБ)	1.75	1.76	1.77	1.77	1.78	1.79	1.79	1.79	1.79	1.78	1.78	1.78
$\Delta h_{опт}^2$ (дБ)	0.225	0.201	0.209	0.222	0.213	0.213	0.213	0.224	0.241	0.255	0.261	0.258

В таблице 3 использованы следующие обозначения: $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ – требуемая вероятность ошибки; $\Delta h_{\text{п}}$ – запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ при сравнении СК традиционной КАМ-16 с оптимизированной, $\Delta h_{\text{опт}}$ - запас мощности, необходимый для достижения $P_{\text{тр}}[\text{ош}]$ при сравнении СК оптимизированной КАМ-16 в МК Грея при наличии двоичной помехи до оптимизации по коэффициентам расположения СТ и после оптимизации, то есть дополнительный запас мощности, получаемый в результате оптимизации СК КАМ-16, в которой СТ были расположены на окружностях.

Так же произведено сравнение оптимизированной СК КАМ-16 с сигнальной конструкцией, использующейся в стандарте DVB-S2. По предварительным расчётам анализ имитационного моделирования показано, что эффективность возрастает на 3% (исходя из оценки ОСШ при вероятности ошибки $P_{\text{ош}}=2 \cdot 10^{-2}$). График вероятности ошибки оптимизированной СК КАМ-16 и СК КАМ-16, использующейся в DVB-S2, представлен на рисунке 10.

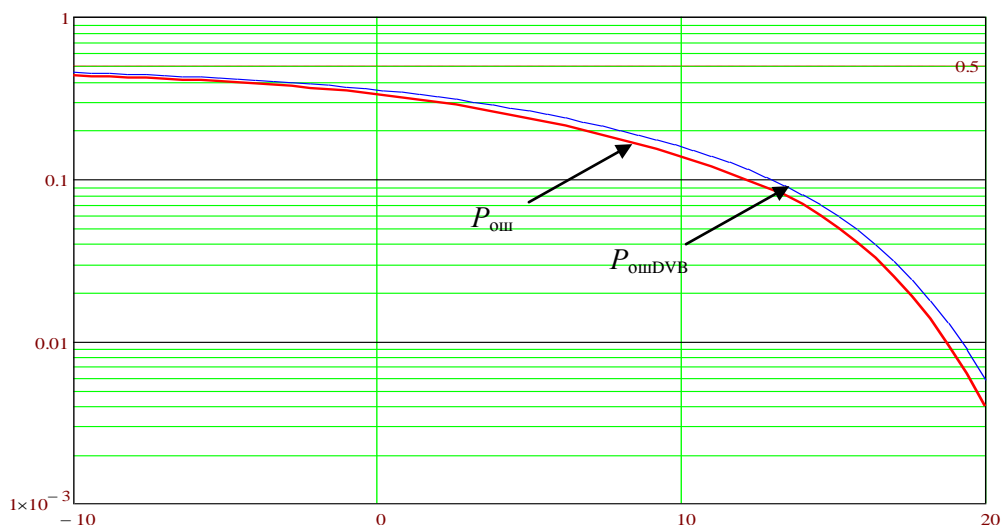


Рисунок 10

На рисунке 11 представлена структурная схема устройства формирования сигналов оптимизированной КАМ. Делители напряжения задают уровни напряжения синфазной и квадратурной составляющих в соответствии с заданными коэффициентами расположения СТ: $\vec{u}_i^I = k_i \vec{u}_{r_i}^I$, $\vec{u}_j^Q = k_j \vec{u}_{r_j}^Q$. Выбранный уровень напряжения зависит от значений информационных битов r_i .

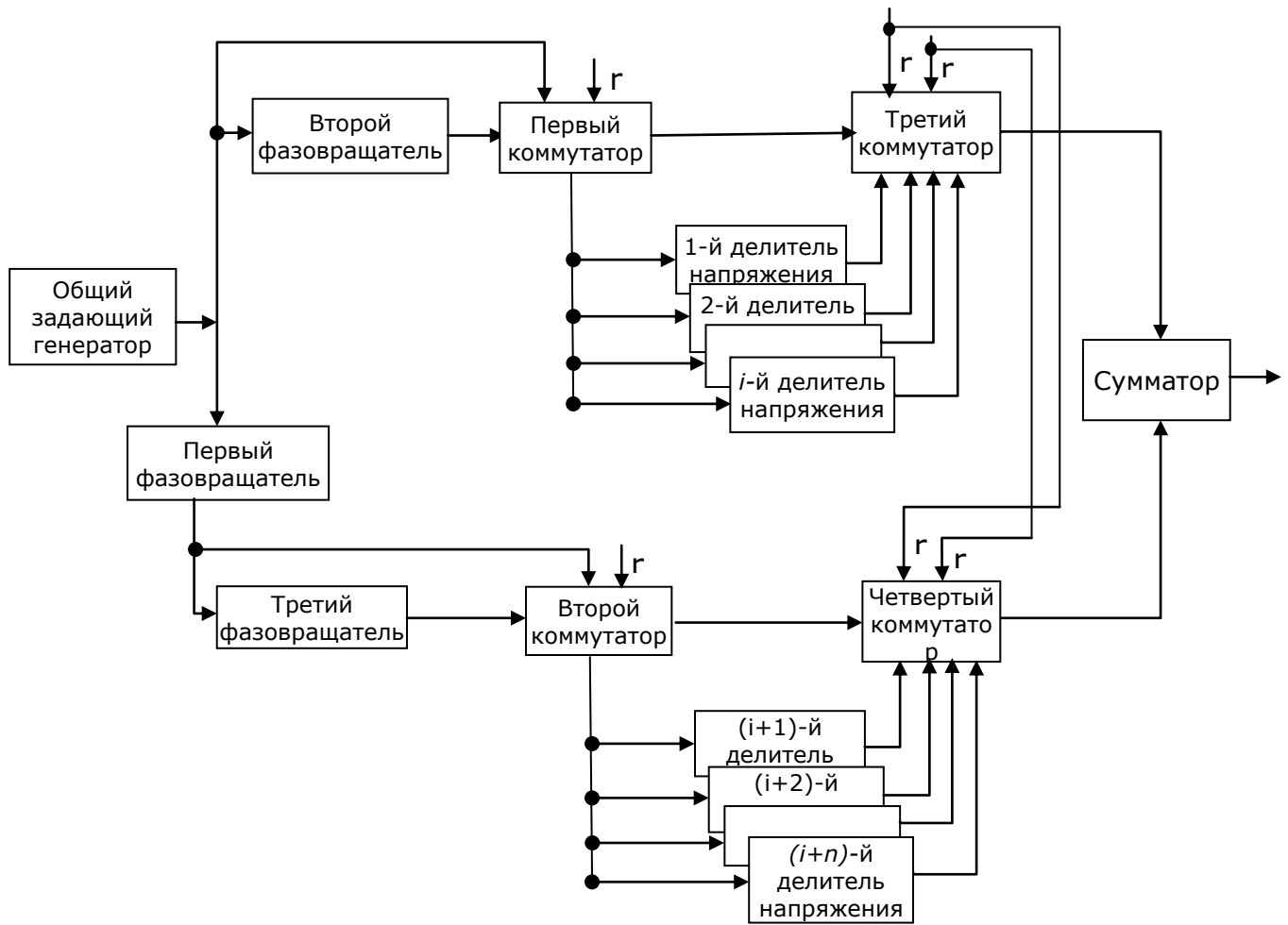


Рисунок 11

Методика разработки алгоритмов когерентного приема сигнальных конструкций КАМ, оптимизированных на основе предлагаемого метода, в канале с постоянными параметрами

Разработка алгоритмов когерентного приёма сигнальных конструкций КАМ происходит на основе формирования эффективных границ областей принятия решения (ГОПР) [6, 7]. Представим в компенсационном виде алгоритм приёма СК КАМ в соответствии с критерием минимум вероятности ошибки на групповой символ ($\min P_e$).

В формализованном виде критерий оптимальности $\min P_e$ можно записать:

$$\min_{Y_r^*} P_e = \max_{Y_r^*} p(r = r^* / y), \quad (10)$$

где Y_r^* – область пространства наблюдений на выходе корреляторов, соответствующая групповому информационному параметру $r = r^*$.

В соответствии с (10) оптимальная область наблюдений примет вид:

$$Y_{0,r^*} = \{ \mathbf{y} : \max_r p(r/\mathbf{y}) = p(r^*/\mathbf{y}) \}. \quad (11)$$

В соответствии с компенсационным алгоритмом правило оценивания двоичных символов примет вид:

$$\mathbf{r}^* = \text{rect} \{ \mathbf{y} - \mathbf{g} \}, \quad (12)$$

где $\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$ - функция принятия решения,

$\mathbf{r}^* \Delta (r_1, r_2, \dots, r_K)T$ – вектор информационных параметров сигналов;

$\mathbf{g} \Delta (g_1, g_2, \dots, g_K)T$, $g_i \Delta g_i(\mathbf{y}) = g_i[(y_1, y_2, \dots, y_K)]$ – вектор оптимальных ГОПР;

$\mathbf{y} \Delta (y_1, y_2, \dots, y_K)T$ – вектор откликов корреляторов (вектор наблюдений),

где $y_i \Delta (\mathbf{y}, \hat{\mathbf{s}}_i)$; $\hat{\mathbf{s}}_i = (\sqrt{E_i})^{-1} \mathbf{s}_i$, $i=1..K$ – нормированный i -ый двоичный цифровой сигнал.

Как следует из формального представления в компенсационном виде алгоритма (12), основной задачей является формирование вектора ГОПР \mathbf{g} . Строятся границы для каждого бита.

Границы области принятия решения (ГОПР) для СК КАМ представляют собой линейно-ломаные линии.. Количество границ определяется сигнальной конструкцией. Границы строятся отдельно для каждого бита. Проходят между СТ, имеющими разные значения (0 и 1). Каждый участок линии проходит через середину отрезка, соединяющего СТ, которые разделяет ГОПР. При этом линия перпендикулярна этому отрезку. Количество участков зависит от формы сигнальной конструкции и манипуляционного кода.

Участки линейно-ломаных границ могут быть представлены в виде:

$$f_i(y) = k_i y + b_i \sqrt{E}, \quad i=1..l \quad (13)$$

l – количество участков ГОПР.

Для фиксированного \mathbf{y} граница определяется по линейному закону (13).

Строятся границы на одинаковом расстоянии от СТ, соответствующим разным значениям двоичного символа (0 и 1). Каждый участок линии проходит через середину отрезка, соединяющего СТ, которые разделяет ГОПР. При этом линия перпендикулярна этому отрезку. Количество участков зависит от позиционности КАМ, формы сигнальной конструкции и манипуляционного кода.

Алгоритм приёма представлен на рисунке 12.

На первом этапе определяется позиционность СК КАМ. От этого зависит количество бит в символе. Также определяется манипуляционный код, от которого зависит, какой символ какой сигнальной точке соответствует.

Далее для каждого бита строятся границы областей принятия решения. Их может быть несколько.

Так как ГОПР являются линейно-ломаными, то необходимо определить количество участков границы. Количество участков будет зависеть от количества сигнальных точек с разными значениями двоичного символа, находящихся рядом.

Далее происходит построение этих участков. Для этого строится отрезок, соединяющий сигнальные точки с разными значениями двоичного сигнала. К нему строится срединный перпендикуляр, который и будет являться участком линейно-ломаной границы. После этого строится следующий участок ГОПР, находится точка пересечения участков. Таким образом будет построена вся граница.

После построения всех ГОПР можно принять решение о принятом бите. Эта процедура проводится для каждого бита. В результате определяется принятый символ.

Предложенным способом были построены ГОПР для третьего и четвёртого бита оптимизированной КАМ-16 (рис. 13) и для 3-го, 4-го, 5-го битов оптимизированной КАМ-32 (рис.14 а, б, в соответственно). Границы для первого и второго бита проходят по осям.

Полученные границы определяют алгоритм приёма оптимизированных предложенным в работе методом СК КАМ.

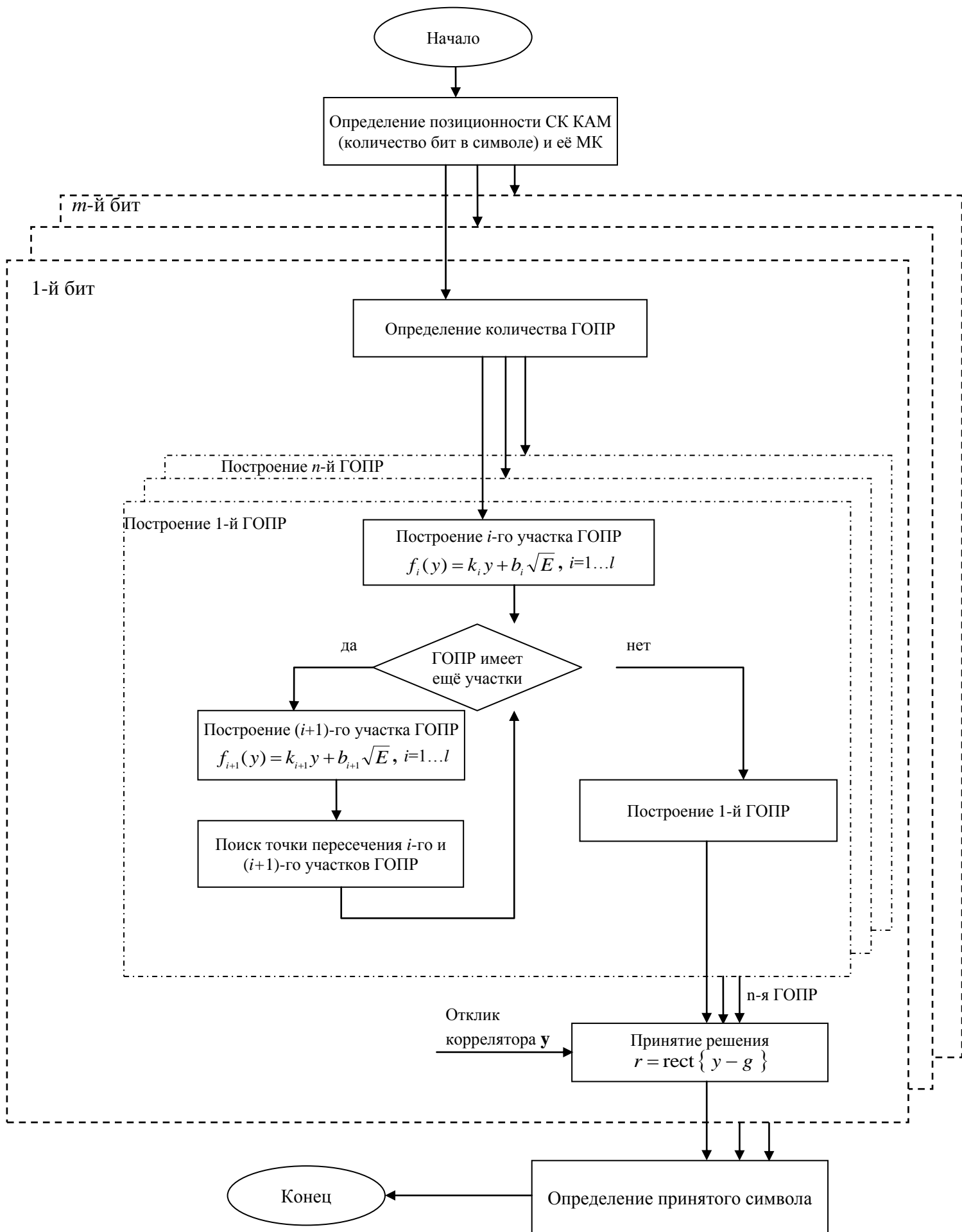


Рисунок 12

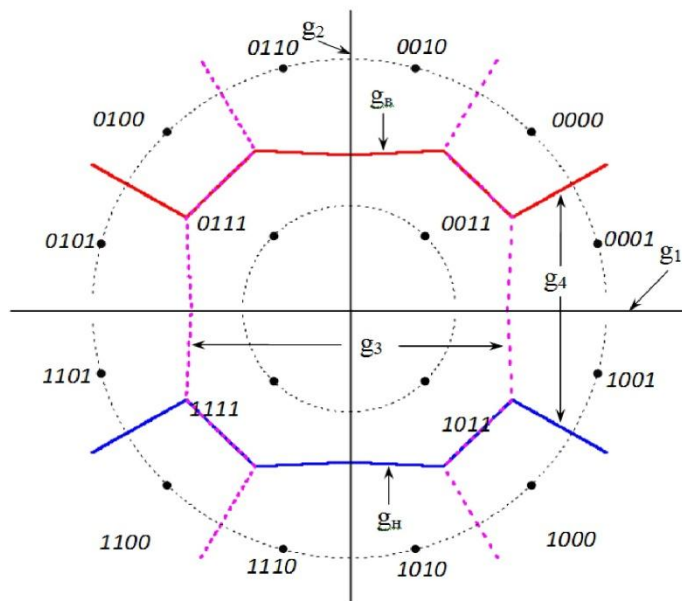
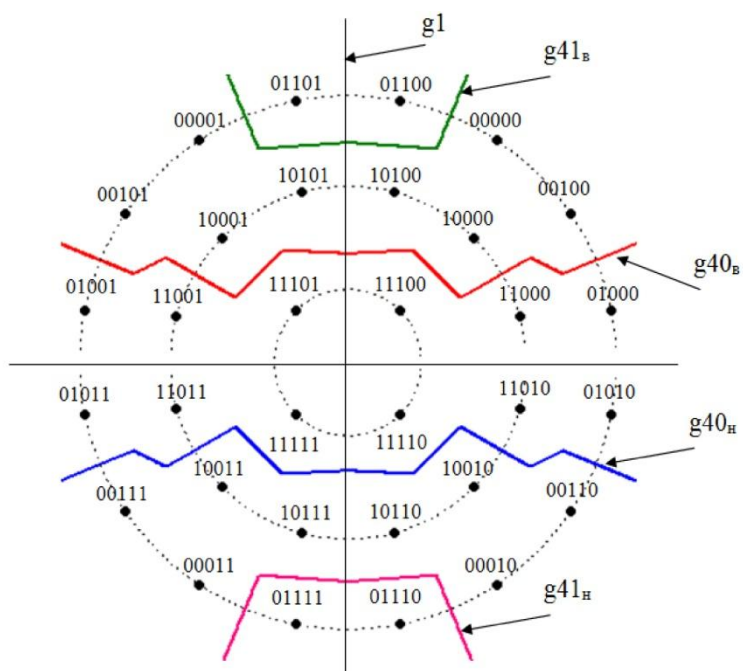
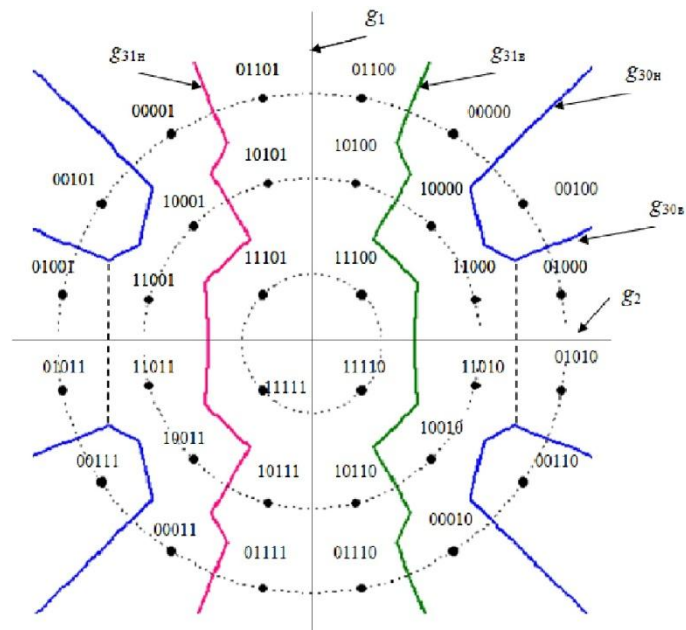


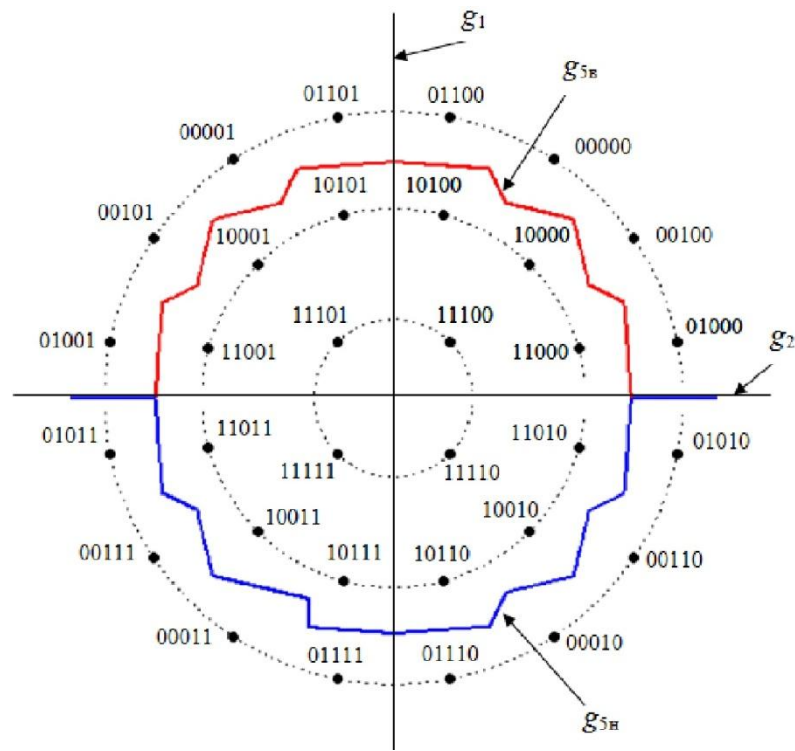
Рисунок 13



a)



б)



в)

Рисунок 14

Выводы

Предлагаемый метод оптимизации СК КАМ подразумевает возможность построение таких сигнальных конструкций КАМ, которые позволяют минимизировать ОСШ с сохранением требуемой вероятности ошибки. Это достигается путём расположения сигнальных точек СК КАМ в соответствии с рассчитываемыми коэффициентами (координатами СТ). Коэффициенты рассчитываются, исходя из минимизации вероятности ошибки, при этом учитывается влияние помех в канале на сигнал КАМ.

Применение предложенного метода оптимизации СК КАМ позволяет задавать требуемую вероятность ошибки не только для группового символа, но и для определённых бит или групп бит. Это позволяет повысить помехоустойчивость сообщений одних абонентов за счёт других либо повысить помехоустойчивость более значимой части информации. То есть, появляется возможность оптимизировать иерархические СК КАМ.

Практическая реализация предложенного в работе метода оптимизации СК КАМ возможна в каналах с заранее известными параметрами. Также возможно применять предложенный метод оптимизации для адаптивных систем, используя канал обратной связи для передачи изменившихся параметров канала.

Т.о в работе показано, что даже в случае белого шума задача оптимизации имеет место, так как построение сигнальной конструкции зависит от отношения сигнал/шум. Предлагаемый метод оптимизации СК КАМ позволит повысить эффективность использования системы передачи и приема, а также добиться требуемой помехоустойчивости при ограниченном энергетическом ресурсе.

Список использованной литературы

1. Гаврющенко А.П. Оценка спектрально-энергетических характеристик многопозиционных сигнальных конструкций для систем многоканальной радиосвязи военного назначения. Дис. канд. техн. наук. –СПб.: ВУС, 2001 г.
2. Бобровский В.И., Бураченко Д.Л., Тимошин И.В. Оптимизация сигнальной конструкции иерархической 16 QAM при двух алгоритмах оптимального приема и двух манипуляционных кодах. Сборник докладов МТК в ГИТ СПбГУТ. – СПб.: 2002.
3. Бобровский В.И., Бураченко Д.Л., Тимошин И.В. Алгоритмы многопользовательского приема сигналов с иерархической квадратурной амплитудной модуляцией // Системы связи: анализ, синтез, управление. Сборник научных трудов. Выпуск 8. Под редакцией В.П. Постюшкова – СПб: Тема, 2002
4. Аверьянов А.В., Бобровский В.И. и др. Способ и устройство формирования сигналов КАМ. Патент РФ №2246794 от 25.08.2011г.
5. Бобровский В.И., Латыпова С.С. и др. Способ и устройство формирования сигналов квадратурной амплитудной манипуляции. Патент РФ №2486681 от 27.06.2013г.
6. Бураченко Д.Л. Оптимальное разделение цифровых сигналов многих пользователей в линиях и сетях связи в условиях помех. - Л.: ВАС, 1990.-302с.
7. Бобровский В.И. Алгоритмы разрешения конфликтов на физическом уровне в синхронных системах множественного доступа военного назначения. / Дис. ... канд. техн. наук. –СПб.: ВУС, 2000 г.
8. Л.Севальнев Эфирное вещание цифровых ТВ-программ со сжатием данных //ТЕЛЕ-Спутник, 1998, №7, с.56-64
9. Варгаузин В., Артамонов А. Сравнительная характеристика европейского и американского стандартов цифрового наземного телевидения //ТЕЛЕ-Спутник, 1999, №11(49)

Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)

1. Бобровский В.И., Латыпова С.С. и др. Способ и устройство формирования сигналов квадратурной амплитудной манипуляции. Патент РФ №2486681 от 27.06.2013г.
2. Бобровский В.И., Латыпова С.С., Скворцов А.К. Повышение эффективности OFDM модемов на основе модификации сигнальных конструкций поднесущих группового сигнала // Техника средств связи №4 (143), 2015. - с.42-50.
3. Бобровский В.И., Латыпова С.С. Модификация сигнальной конструкции с тридцати двух позиционной квадратурной амплитудной манипуляцией // Техника средств связи №5 (144), 2016. - с. 36-46.
4. Латыпова С.С. Способ построения сигнальных конструкций с шестнадцати позиционной квадратурной амплитудной манипуляцией // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: Сборник статей XII Международной научно-практической конференции. В 3 ч. Ч. 1. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». –2020. – с. 157-160. (eLIBRARY ID: 42928059)
5. Латыпова С.С. Оптимизация сигнальных конструкций КАМ // «Российская наука в современном мире» Сборник статей XXX Международной научно-практической конференции, 2020, Научно-издательский центр «Актуальность.РФ» с.121-122