

УДК 621.396, 004.032.24

Метод оптимизации энергетических параметров системы передачи информации в парциальных радиоканалах малоразмерных подвижных объектов на основе аппарата теории нечетких множеств

Махов Д. С.

Постановка задачи: организация связи в радиотехнической системе ставит задачу устранить противоречие между увеличением объема информации, необходимой для передачи и минимизации времени на ее передачу. Особую актуальность данная задача приобретает в системе связи с высокоманевренными малоразмерными подвижными объектами, например, в робототехнических комплексах, функционирующих в условиях преднамеренных помех. Одним из методов сокращения времени передачи информации является организация параллельных пространственных радиоканалов передачи информации, обычно применяемая в системах сотовой связи последнего поколения. Для подвижных систем, в которых в качестве базовой станции или ретранслятора выступает роботизированная мобильная платформа робототехнического комплекса, задача оптимального перераспределения мощности передатчика для повышения качества параллельных каналов приобретает особую актуальность в виду ограничения энергетических ресурсов, высокой скорости изменения координат мобильной платформы. При этом требования к скорости поиска оптимального решения распределительной задачи возрастают. Это требует разработки новых методов решения задачи определения оптимального значения мощности в парциальном радиоканале в каждый момент времени. **Целью работы** является разработка метода оптимизации распределения мощности передатчика мобильной платформы робототехнического комплекса при организации пространственных параллельных радиоканалов связи. Для решения задачи предлагается использовать аппарат теории нечетких множеств для построения модифицированных функций принадлежности значений мощности каждого канала значениям целевой функции, определяющей качество всей совокупности параллельных радиоканалов. **Используемые методы:** Решение оптимизационной задачи выполняется на основе построения специальных функций принадлежности нечетких множеств и выполнения нечетких логических операций. Применение нечетких логических операций над данными функциями позволяет оценить вклад мощности каждого канала в общую совокупность. Проводится сравнение с известными методами оптимизации. **Новизна** предлагаемого метода заключается в модификации известных функций принадлежности и нечетких логических операций, а также разработке новой последовательности действий для решения оптимизационной задачи и получения точного решения. Результатом использования предлагаемого метода является оптимальное распределение мощности в пространственных параллельных радиоканалах, что позволит обеспечить и поддерживать требуемое качество каждого парциального канала при изменении его характеристик во время сеанса связи. **Практическая значимость:** предлагаемое решение может быть реализовано на базе нечеткого логического контроллера, выход которого соединен с усилительным каскадом передатчика, либо может быть включен в схему автоматической регулировки усиления. Также реализация предлагаемого решения может быть проведена на базе программируемых логических интегральных схем в виде программного обеспечения модуля управления мощностью передатчика.

Ключевые слова: пространственные параллельные радиоканалы, система связи робототехнического комплекса, оптимальное управление мощностью передатчика, функция принадлежности,

Библиографическая ссылка на статью:

Махов Д. С. Метод оптимизации энергетических параметров системы передачи информации в парциальных радиоканалах малоразмерных подвижных объектов на основе аппарата теории нечетких множеств // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 27-49. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10402.

Reference for citation:

Makhov D. S. Method of power parameters optimization of communication system in partial radio channels of small-sized mobile objects based on the fuzzy sets theory basis. Systems of Control, Communication and Security, 2019, no. 4, pp. 27-49. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10402 (in Russian).

нечеткое множество, длительность передачи информации, метод оптимизации энергетических параметров.

Введение

Робототехнические комплексы (РТК) становятся неотъемлемой частью ведения современных, в том числе военных операций. Необходимость применения существующих и вновь разрабатываемых РТК подтверждается успешным проведением множества различных операций с их использованием [1, 2]. Возрастание динамики проведения спасательных операций, сбора разведывательной информации, военных конфликтов и пр. вынуждает разработчиков РТК непрерывно совершенствовать отдельные подсистемы и комплексы в целом, в том числе, системы сбора, обработки и передачи информации [3]. Особенностью таких систем является многофункциональность, поступление информации от множества датчиков, использование высокоскоростной съемки с высокой разрешающей способностью. Особую актуальность приобретают работы по унификации полезной нагрузки РТК, что позволяет одному РТК одновременно осуществлять различные виды разведки.

Модернизация РТК в данных направлениях ведет к увеличению объема целевой информации на борту, необходимой для передачи за минимальное время лицу, принимающему решение (ЛПР). При этом требование к своевременности доведения информации диктуется скоротечностью ведения операций с использованием РТК. Вместе с тем увеличение объема разнородной информации предъявляет жесткие требования к энергетическим ресурсам РТК, которые, в свою очередь, во многом определяются качественными и количественными характеристиками радиоканалов РТК [4, 5]. Невыполнение данных требований ставит под угрозу своевременность доведения информации до ЛПР и функционирование системы передачи информации в целом.

Это заставляет искать новые способы оптимизации энергетических характеристик радиоканалов РТК и совершенствования подсистем управления их параметрами, такими как скорость передачи информации, мощность передатчика и пропускная способность радиоканала. В связи с этим повышение скорости передачи целевой информации с борта РТК на наземный пункт обработки информации (ПОИ) является актуальной задачей [5].

Особую актуальность данная задача приобретает в условиях преднамеренных помех [6, 7]. В случае воздействия преднамеренных помех целевая информация с мобильной роботизированной платформы (МРП) РТК должна быть передана на наземные промежуточные пункты приема информации любого назначения за минимальное время, а затем по имеющимся защищенным проводным высокоскоростным каналам доставлена в ПОИ. Задача повышения скорости передачи информации по радиоканалу тесно связана с задачей обеспечения помехоустойчивости систем связи РТК, что обуславливает применения методов помехоустойчивого кодирования, решающей обратной связи и методов организации параллельных каналов передачи [7-9].

В силу того, что радиоканал РТК является неконтролируемой зоной априорно неизвестного воздействия помех, организация решающей обратной

связи является слабоэффективной мерой обеспечения помехоустойчивости. Вместе с тем организация параллельных пространственных каналов передачи целевой информации с МРП РТК в ПОИ физически реализуема за счет введения промежуточных пунктов приема. В качестве данных пунктов могут выступать наземные пункты управления, командные пункты, запасные пункты управления, отдельные боевые единицы. Это позволяет повысить скорость передачи информации за счет оптимального перераспределения энергетических параметров системы передачи информации по пространственно разнесенным параллельным каналам.

В известных источниках литературы [8, 13, 14] введено понятие параллельных каналов связи. К методам организации таких каналов относят методы организации каналов с временным, частотным и кодовым разделением, а также методы расширения спектра. Кроме того, в известной литературе рассматриваются каналы, учитывающие многолучевую модель распространения сигнала и его прием как в одной (многолучевое распространение) так и в нескольких точках пространства (разнесенный прием). В данных работах рассматриваются обобщенные методы оптимального приема сигналов, передача которых производится по одному пространственному каналу, а в процессе передачи из-за особенностей распространения радиоволн и сопутствующих эффектов возникает множество путей распространения этих сигналов. Введение параллельных каналов обусловлено необходимостью повышения достоверности приема сообщений. В источнике [8] приводится наиболее полная классификация систем передачи информации с параллельными каналами и указывается возможность обеспечения практически полной декорреляции помех за счет правильного формирования ансамбля сигналов. Там же указано, что большинство решаемых задач по повышению достоверности приема сообщений в параллельных каналах характеризуется статистически независимым характером аддитивных помех. При этом остаются без ответов вопросы распределения энергетических ресурсов (например, мощности передатчика) между параллельными каналами, разнесенными в пространстве, вопросы передачи сигналов различной длительности и модуляции по таким каналам.

Частично ответы на вопросы организации пространственных параллельных каналов даются в научной литературе, описывающей технологию ММО (multiple input – multiple output) [10-12]. При этом вопросы касаются оптимального перераспределения энергетического ресурса, несмотря на востребованность, остаются без ответа.

Для решения задачи оптимизации энергетических ресурсов пространственных параллельных радиоканалов с учетом ограничений на энергетические параметры передатчика необходимо ввести понятие парциального радиоканала.

Определение. Парциальным радиоканалом РТК называется совокупность элементов кодека, модема, приемо-передатчика, элементов диаграммообразующей схемы (ДОС) передающей (многолучевой) и приемной (произвольной) антенных систем (АС), а также **пространственно ориентированной** радиолинии, формируемой отдельным лучом АС, предназначенная для передачи и приема информации в РТК.

К параметрам парциального радиоканала (далее – парциального канала), подлежащим оптимизации, можно отнести мощность передатчика МРП воздушного или наземного РТК, параметры усилителей в выходных цепях системы передачи, параметры АС, отвечающие за формирование требуемой характеристики направленности (ХН) АС. Оптимизация данных параметров является многокритериальной задачей, решение которой очевидно далеко не всегда.

Целью статьи является разработка метода перераспределения мощности передатчика в параллельных каналах РТК.

Описание геометрии задачи и формальная постановка

Пусть МРП воздушного РТК, расположенной в точке A с координатами x_0, y_0, z_0 , необходимо передать информацию объемом V_0 на ПОИ, расположенный в точке $B(x_b, y_b, z_b)$. Пусть также имеется M наземных промежуточных пунктов приема информации в точках $C_m(x_m, y_m, z_m)$. Геометрия задачи представлена на рис. 1.

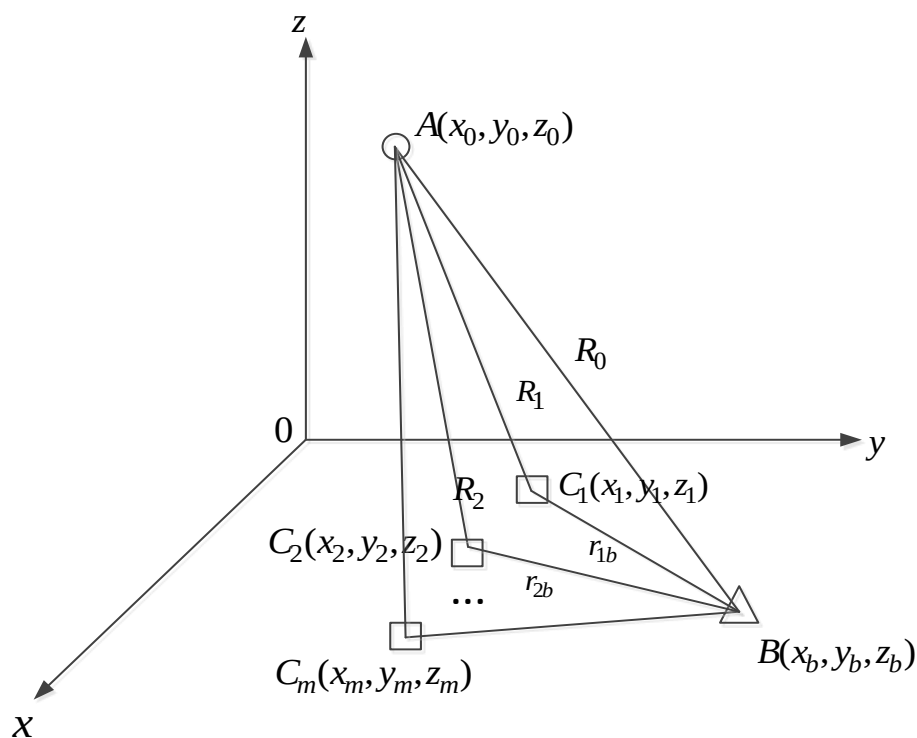


Рис. 1. Пространственное расположение РТК, ПОИ и промежуточных пунктов приема информации

Расстояние между РТК и ПОИ может быть определено по известной формуле [13, 14]:

$$R_0 = \sqrt{(x_0 - x_b)^2 + (y_0 - y_b)^2 + (z_0 - z_b)^2}. \quad (1)$$

Дальности R_m определяются по формуле (1) путем замены соответствующих индексов при координатах точек C_m . Причем $R_m \neq R_{M-m}$.

Пусть на МРП РТК установлена АС в виде многолучевой антенной решетки (МАР), параметры которой позволяют формировать количество M лучей характеристики направленности (ХН), равное количеству промежуточных пунктов приема информации [15]. Рассмотрим случай, когда отношение сигнал/(помеха+шум) (ОСПШ) в радиоканале $\overline{AB}$ дальностью R_0 много меньше единицы: $Q_0 \ll 1$.

Такой случай может иметь место при воздействии преднамеренных помех на радиоканал $\overline{AB}$, либо при отсутствии между точками A и B прямой видимости (наличии препятствия). В таком случае возникает задача передачи информации объемом V_0 за минимальное время t_0 на M промежуточных пунктов приема информации с заданной вероятностью ошибки $\rho_0 = \rho_m$. При условии того, что имеется возможность с помощью МАР повысить качество радиоканалов $\overline{AC}_m$, дальность которых равна R_m , возникает необходимость определить, какую мощность необходимо выделить для передачи информации V_0 по каждому из радиоканалов $\overline{AC}_m$ с требуемым качеством?

Известно, что качество информации в точке приема при передаче ее по радиоканалу определяется требуемой вероятностью ошибки на бит информации. Очевидно, что уменьшение вероятности битовой ошибки характеризуется увеличением мощности передатчика (при ряде допущений). Однако при организации парциальных радиоканалов существует верхний предел мощности передатчика на МРП РТК, определяемый энергетическими параметрами передатчика МРП РТК. Поэтому повышение качества информации в точке приема по каждому парциальному каналу зависит от правильного перераспределения мощности на МРП РТК.

Таким образом, при возможности организации M пространственных парциальных радиоканалов, необходимо разработать метод, позволяющий распределить мощность передатчика между ними так, чтобы общая вероятность ошибки на бит в совокупности парциальных каналов была минимальной:

$$\mathbf{P}_t^* = \{P_{t_m}^*\}: \rho_\Sigma(\mathbf{P}_t) \rightarrow \min, \quad (2)$$

где

ρ_Σ – вероятность ошибки в парциальных каналах;

$\mathbf{P}_t$ – вектор мощностей передатчика в парциальных радиоканалах;

$\mathbf{P}_t^*$ – вектор оптимальных значений мощностей передатчика в парциальных каналах.

Вероятность битовой ошибки в парциальном канале без учета вида модуляции описывается формулой:

$$\rho(P_t) = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{h^2(P_t)} \right) \right], \quad (3)$$

где

$$\Phi(\chi) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\chi e^{-\frac{t^2}{2}} dt - \text{функция Крампа};$$

$h^2(P_t)$ – параметр, учитывающий ОСПШ и коэффициент передачи канала.

Вероятность битовой ошибки в параллельных каналах ρ_Σ описывается выражением [8]:

$$\rho_\Sigma(P_{t_m}) = 0,5 \left[1 - \Phi \left(\sqrt{\sum_{m=1}^M h_m^2(P_{t_m})} \right) \right]. \quad (4)$$

В силу того, что целевая функция (4) нелинейна, а параметров несколько, то на первый взгляд, задача без учета ограничений на параметры может быть решена известными итерационными методами, например, методом Ньютона или методом простых итераций [16, 17]. С практической точки зрения задача, несмотря на простоту математической постановки, отличается от аналогичных задач организации параллельных каналов, описанных, например в [8], тем, что МРП РТК находится в движении и энергетические параметры парциальных радиоканалов $\overrightarrow{AC}_m$ представляют функциональные зависимости от времени. Кроме этого, в работах, посвященных параллельным каналам и системам ММО [18] ограничения на мощность передатчика не накладываются. В связи с этим оптимальное перераспределение мощности информации возможно на основе управления энергетическими характеристиками системы передачи. Синтез системы оптимального управления энергетическими характеристиками радиоканалов является самостоятельной научной задачей и выходит за рамки работы.

Ограничения на решение задачи

Примем ограничения: связь между промежуточными пунктами приема информации и ПОИ устанавливается по идеализированным защищенным каналам на расстоянии r_{mb} . Скорость передачи информации по каналам r_{mb} максимальна, а помехи отсутствуют. Следует отметить, что параметры наземной системы связи крайне важны для практики, но при этом наземная система связи с точки зрения теории систем и системного анализа является независимой от воздушной системы, поэтому рассмотрение не характеризует создаваемое эмерджентное свойство, присущее рассматриваемой в статье системе связи. Для парциальных радиоканалов установим, что в каждом канале используется фазовая модуляция, каналы без памяти, каналные коэффициенты одинаковы, а частота несущего колебания одинакова для всех каналов. Будем полагать также, что средой распространения является свободное пространство, рефракция не учитывается, замирания в канале отсутствуют, распределение шума – гауссово, радиолиния идеальная, один символ содержит один бит информации, а помехоустойчивое кодирование не используется. Коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника выбираются равными. Несмотря на значительный объем ограничений, они необходимы для определения основных соотношений по оптимальному распределению мощности передатчика в парциальных радиоканалах. Ограничение ресурса мощности передатчика может быть выражено следующим образом:

$$P_{t\Sigma} = \sum_{m=1}^M P_{tm}. \quad (5)$$

В такой постановке задача представляет задачу нелинейного программирования [19-21]. Задача безусловной оптимизации сводится к задаче на условный экстремум нелинейной функции (4).

Метод решения задачи

Прежде чем подойти к решению задачи, выдвинем гипотезу о том, что минимальному значению целевой функции (4) будет соответствовать оптимальное распределение параметров P_{tm} при ограничениях (5).

Для этого раскроем $h_m^2(P_t)$ в выражении (3). Эта величина определяется выражением:

$$h_m^2 = \frac{\gamma_m^2 P_{cm} T}{v_m^2}, \quad (6)$$

где

γ_m^2 – коэффициент передачи парциального радиоканала;

v_m^2 – спектральная плотность мощности шума;

$P_{cm} T$ – произведение мощности принятого символа P_c на длительность символа T , равное энергии символа E_c в парциальном канале.

Так как прямо ограничение равенства одного символа одному биту, то $E_c = E_b$.

Раскрывая в выражении (6) отношение средней мощности сигнала к средней мощности шума и используя первое уравнение радиосвязи, получим выражение связи энергии бита с объемом передаваемой информации и параметрами радиоканала в промежуточных пунктах приема информации [22-24]:

$$D_m(R, P_t) = \frac{P_{tm} G_t G_r \lambda^2 \Delta \omega}{16 \pi^2 R_m^2 v_{0m}^2 U}, \quad (7)$$

где: λ – длина волны;

P_t – мощность передатчика;

G_t, G_r – коэффициенты усиления антенн передатчика и приемника соответственно;

$\Delta \omega$ – диапазон частот;

U – скорость передачи информации;

v_{0m}^2 – средняя мощность шума в канале.

Преследуя цель оптимизации мощности передатчика, следует заметить, что усиление мощности самого передатчика не всегда является оптимальным решением задачи. Покажем это. Представим параметр G_r в виде [25]:

$$G_r = \frac{4 \pi S_r}{\lambda^2}, \quad (8)$$

где S_r – эффективная площадь приемной антенны.

Перепишем выражение (7) с учетом (8):

$$D_m(R, P_t) = \frac{P_{tm} G_t G_r \Delta \omega}{4\pi R_m^2 U v_{0m}^2}. \quad (9)$$

Анализ этого уравнения показывает, что, начиная с некоторой мощности передатчика (порядка нескольких ватт), всегда выгоднее повышать энергетический потенциал радиолинии за счет увеличения усиления передающей АС, а не за счет увеличения мощности передатчика [25]. При этом масса и стоимость аппаратуры оказываются минимальными. Увеличение G_t ограничивается либо габаритами АС, что характерно для летательных аппаратов, либо требованиями к ширине ХН АС [4, 15]. Вместе с тем вопрос оптимизации параметров МАР в зависимости от параметров кодирования передаваемой информации и является предметом отдельной работы.

Таким образом, для каждого парциального радиоканала достижение минимального значения вероятности битовой ошибки возможно за счет обеспечения максимума мощности передатчика при отсутствии помех (или равном уровне шума в каждом канале) (рис. 2). На рис. 2 кривая 1 соответствует зависимости мощности передатчика от вероятности битовой ошибки для первого парциального радиоканала. Кривые 2 и 3 на рис. 2 означают те же зависимости для второго и третьего парциальных каналов.

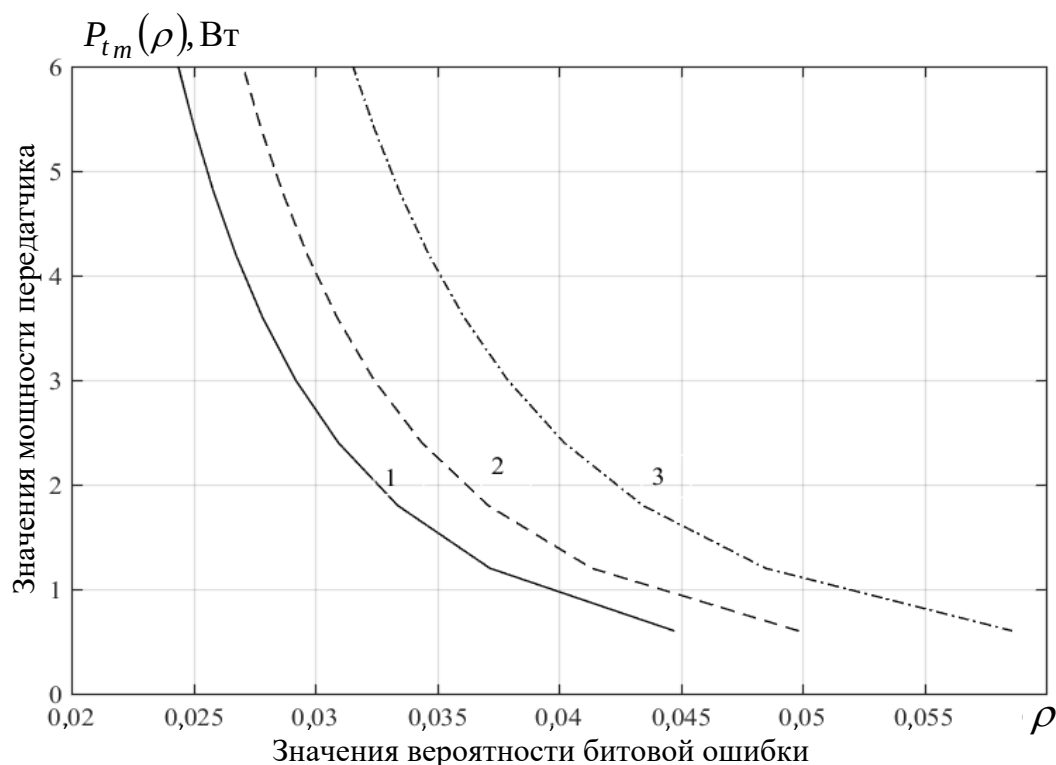


Рис. 2. Зависимости мощности передатчика от вероятности битовой ошибки в парциальных каналах (обозначения 1-3 – номера парциальных каналов)

Для подтверждения гипотезы решим задачу методом полного перебора всех возможных сочетаний мощности для $M = 3$ парциальных каналов с различными расстояниями R_m . Выбор $M = 3$ обусловлен тем, что система (4) при

неизвестных параметрах P_{tm} для $M = 2$ может быть решена простейшим методом подстановки, что невозможно при $M > 2$.

Необходимо доказать, что условие (2) будет выполняться при введенных ограничениях (5).

Если вероятность битовой ошибки для M парциальных радиоканалов без помех, вычисленная по формуле (4), достигнет минимума ρ_{Σ}^* при условии, что сумма мощностей в парциальных радиоканалах удовлетворит условию (5), то мощность передатчика будет иметь оптимальное значение P_{tm}^* в каждом парциальном радиоканале, то есть:

$$\rho_{\Sigma}(P_{tm}) \xrightarrow[\sum_{m=1}^M P_{tm} = P_{t\Sigma}]{} \min, P_{tm} \in P_{tm}^*.$$

Так как прямой функциональной зависимости между (3) и (4) нет, то задача поиска P_{tm}^* в явном виде не решается.

Применим метод полного перебора значений P_{tm} в выражении (4). Затем выделим среди всех сочетаний P_{tm} те, которые удовлетворяют условию (5). Значения функции (4), удовлетворяющие условию (5) приведены на рис. 3.

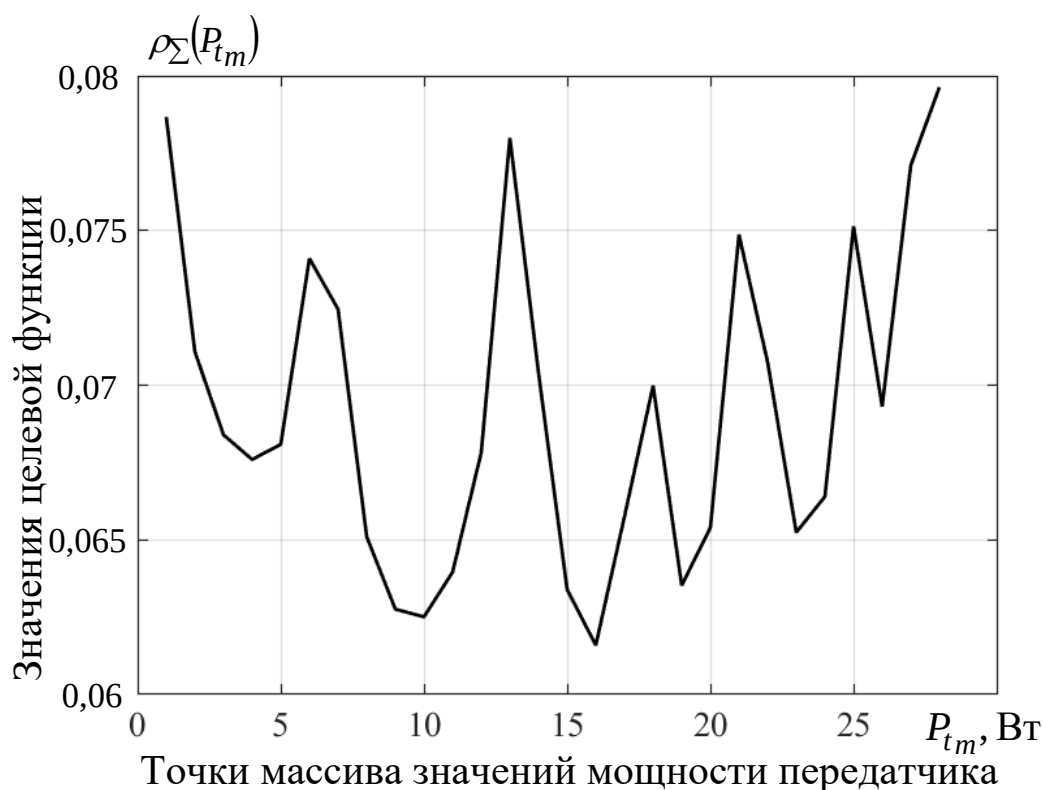


Рис. 3. Значения целевой функции, удовлетворяющих условию (5) на множестве допустимых сочетаний параметров мощности передатчика

На рис. 3 построены значения вероятности ошибки $\rho_{\Sigma}(P_{tm})$ для $M = 3$ парциальных радиоканалов с различными R_m без помех для значений, удовлетворяющих условию (5), полученные методом полного перебора всех значений

мощностей передатчика парциальных радиоканалов. Из рис. 3 видно, что ограничение (5) позволяет искать безусловный экстремум (в данном случае глобальный минимум) функции в допустимом множестве решений. Из множества допустимых решений (числа сочетаний мощностей P_{t_m}) оптимальному вектору параметров $\mathbf{P}_t^*$ будет соответствовать минимум вероятности ошибки параллельных парциальных каналов $\rho_\Sigma(P_{t_m})$.

Значительное число операций метода полного перебора делает его применение неудовлетворительным для решения задачи, а применение численных градиентных методов поиска глобального экстремума создает предпосылки попадания в локальный экстремум функции, в связи с чем требуется разработка нового метода решения оптимизационной задачи.

Рассмотрим другой подход к решению задачи, позволяющий получить решение, удовлетворяющее критерию (2). Для этого выразим степень принадлежности значений параметров P_{t_m} оптимальному решению в виде функций принадлежности (ФП) нечетких множеств $\tilde{n}$ допустимых значений параметров $P_t(\tilde{n})_m$ на универсальном множестве n значений параметров $m = 1, \overline{M}$ парциальных каналов [26]:

$$\mu_m^{(P)}(P_t(\tilde{n})_m, \phi(n)) = \exp\left(\frac{-(P_t(\tilde{n})_m - \phi(n))^2}{2\eta^2}\right) \cdot \rho_\Sigma(P_t(\tilde{n})_m), \quad (10)$$

где: $\phi(n)$ – высота нечеткого множества;

η – альфа-уровень нечеткого множества.

В выражении (10) за основу взята гауссова функция принадлежности. Мощность в каждом парциальном канале изменяется в одинаковых для всех каналов пределах $[P_{t_{\min}}, P_{t_{\max}}]$. Параметр высоты определяет положение максимума ФП нечеткого множества и пробегает все значения универсального множества значений мощности передатчика от $P_{t_{\min}}$ до $P_{t_{\max}}$. Значения целевой функции $\rho_\Sigma(P_t(\tilde{n})_m)$ для мощности m -го парциального канала рассчитываются при фиксированных значениях мощностей других $\tilde{m} = M - m$ парциальных каналов $P_{t_{\tilde{m}}} | \tilde{m} \neq m = P_{t_{\min}}$. То есть, если выбрано значение $\tilde{n} = 3$, то степень принадлежности вероятности ошибки в парциальном канале к оптимальному решению среди всех n . Это отражается ФП в (10).

Новизна (10) заключается в том, что в отличие от классического подхода [27, 28] для каждого парциального канала строится ФП множества значений мощности с учетом вклада каждого значения в целевую функцию множеству всех значений мощности m -го парциального канала. Данная ФП представляет двумерный массив $[n \times \tilde{n}]$ значений, вид которого для некоторых $\tilde{n}$ для одного парциального канала представлен на рис. 4.

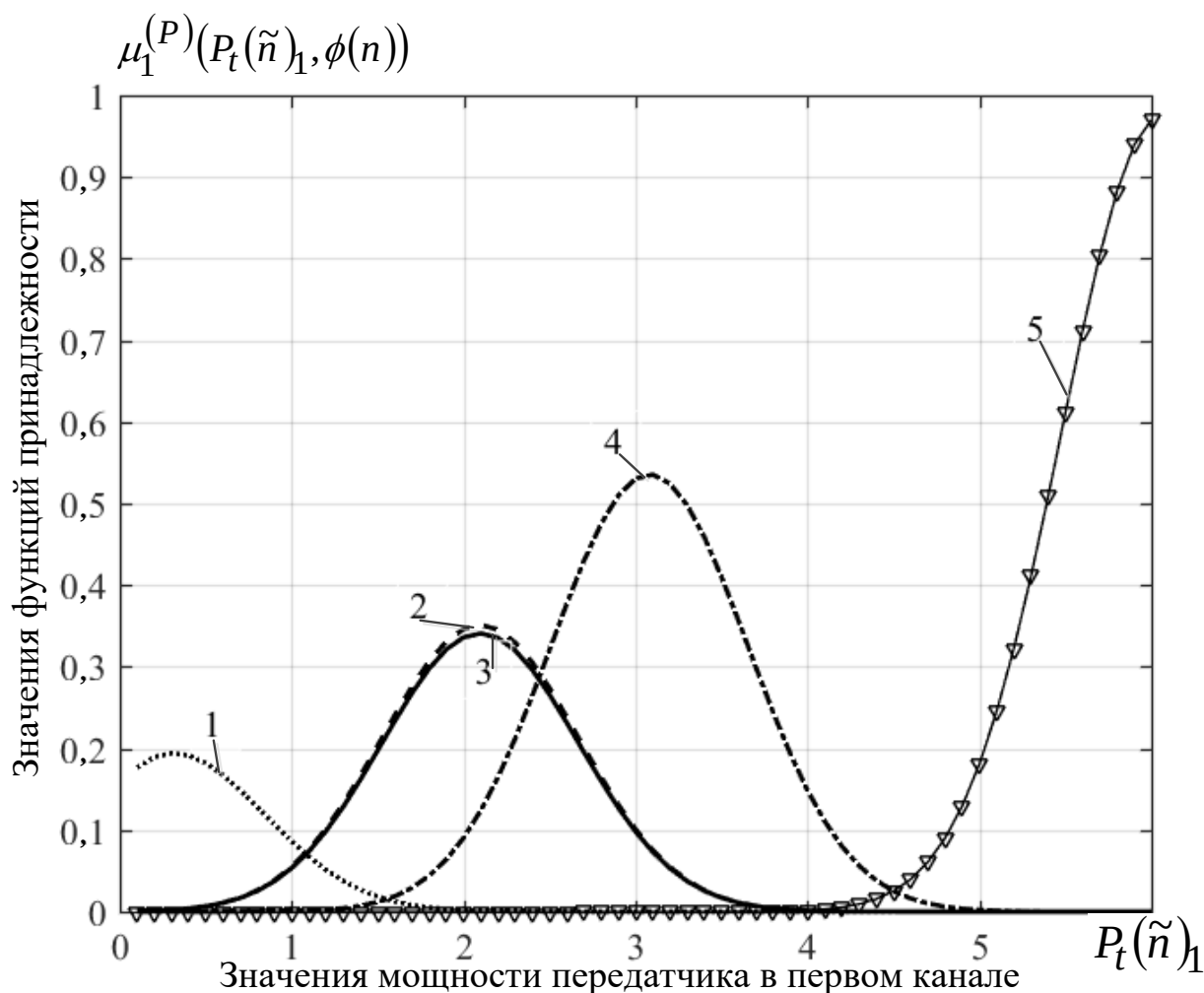


Рис. 4. Функции принадлежности значений мощности решению целевой функции (цифрами 1-5 обозначены функции принадлежности различных значений мощности передатчика значениям целевой функции)

На рис. 4 цифрами 1-5 обозначены некоторые ФП значений мощности первого радиоканала значениям целевой функции. Например, ФП с номером 5 показывает вклад множества значений мощности в одно значение целевой функции. Из рис. 4 видно, что максимальное значение параметра одного парциального радиоканала принадлежит с максимальной степенью минимуму целевой функции без учета ограничений (5).

Для учета ограничений построим ФП по формуле (10) с тем отличием, что параметрами в них являются вероятности ошибки в парциальных каналах, рассчитанные по формуле (3):

$$\mu_m^{(\rho)}(\rho_m(\tilde{g}), \phi(g)) = \exp\left(\frac{-(\rho_m(\tilde{g}) - \phi(g))^2}{2\eta^2}\right) \cdot \rho_\Sigma(\tilde{g}_m), \quad (11)$$

где: $g = \overline{1, G'}$ – универсальное множество значений вероятности ошибки;

$\tilde{g} = \overline{1, \tilde{G}'}$ – множество допустимых значений вероятности ошибки.

Выражение (11) позволяет связать вероятности ошибки ρ_m каждого парциального канала с вероятностью ошибки параллельных парциальных каналов.

Срезы данных ФП для некоторых значений ϕ (кривые 1-5 рис. 5) приведены на рис. 5.

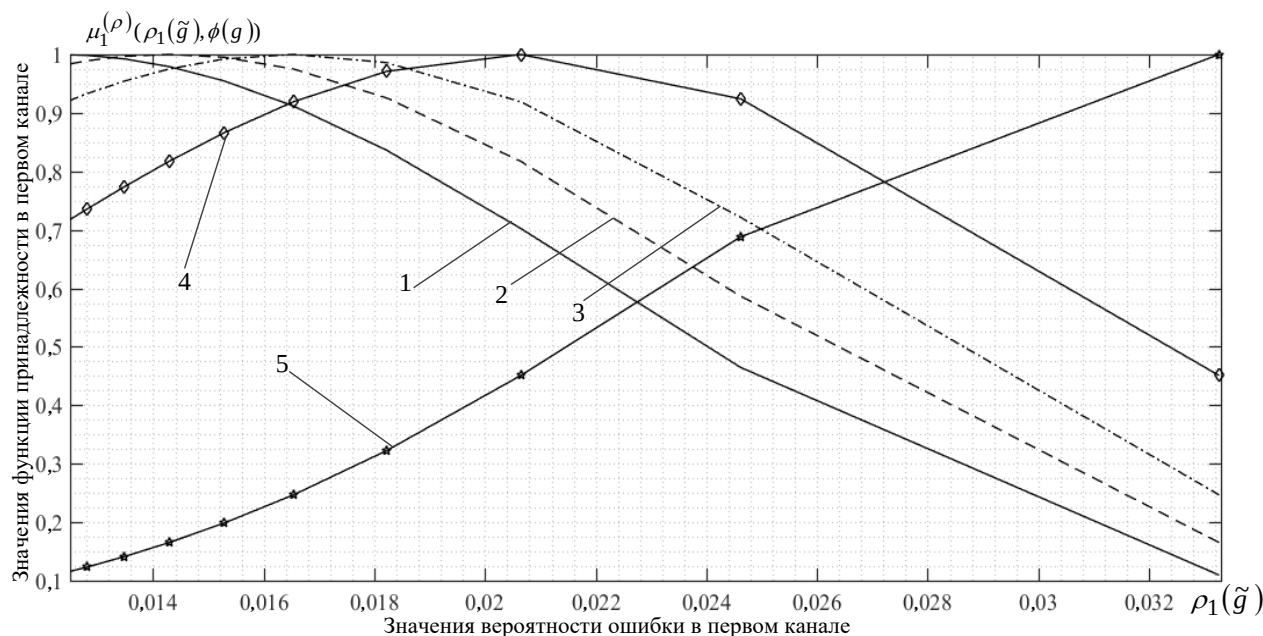


Рис. 5. Значения пересечений функций принадлежности параметров различных каналов (кривые с номерами 1-5 означают функции принадлежности различных значений вероятности ошибки в первом канале значениям целевой функции)

Использование аппарата теории нечетких множеств позволяет выразить параметры и функции через универсальные ФП, область существования которых находится в пределах $\{0,1\}$.

Далее для того, чтобы установить связь между параметрами мощности, влияющими на вероятность ошибки парциального канала и целевой функцией – вероятностью ошибки в параллельных каналах, применим операцию нечеткого отношения в виде:

$$Q_m(\tilde{g}, \tilde{n}) = \mu_m^{(\rho)}(\rho_m(\tilde{g}), \phi(g)) \times \mu_m^{(P)}(P_t(\tilde{n})_m, \phi(n)). \quad (12)$$

Нечеткие отношения между ФП мощностей вероятностям ошибки парциальных каналов и ФП вероятностей ошибки парциальных каналов вероятности ошибки параллельных каналов позволяют наложить условие (5) и ограничить область допустимых решений.

Теперь применим операцию пересечения входных ФП с нечеткими отношениями (12) для формирования множества возможных решений. Согласно [27] существует несколько операций пересечения нечетких множеств. Воспользуемся классическим пересечением по Заде [28]:

$$\mu_{\cap} = \sum_{m=1}^M \mu_m^{(\rho)}(\rho_m(\tilde{g}), \phi(g)) \cap Q_m(\tilde{g}, \tilde{n}). \quad (13)$$

Графики результатов пересечения (13) приведены на рис. 6. На данном рисунке кривые показывают две функции принадлежности при различных сочетаниях мощностей на множестве значений целевой функции. Кривая 1 соот-

ветствует вектору $\mathbf{P}_t^*$ оптимальных значений мощностей передатчика, вычисленных методом полного перебора. Кривая 2 показывает ФП неоптимальных значений мощности.

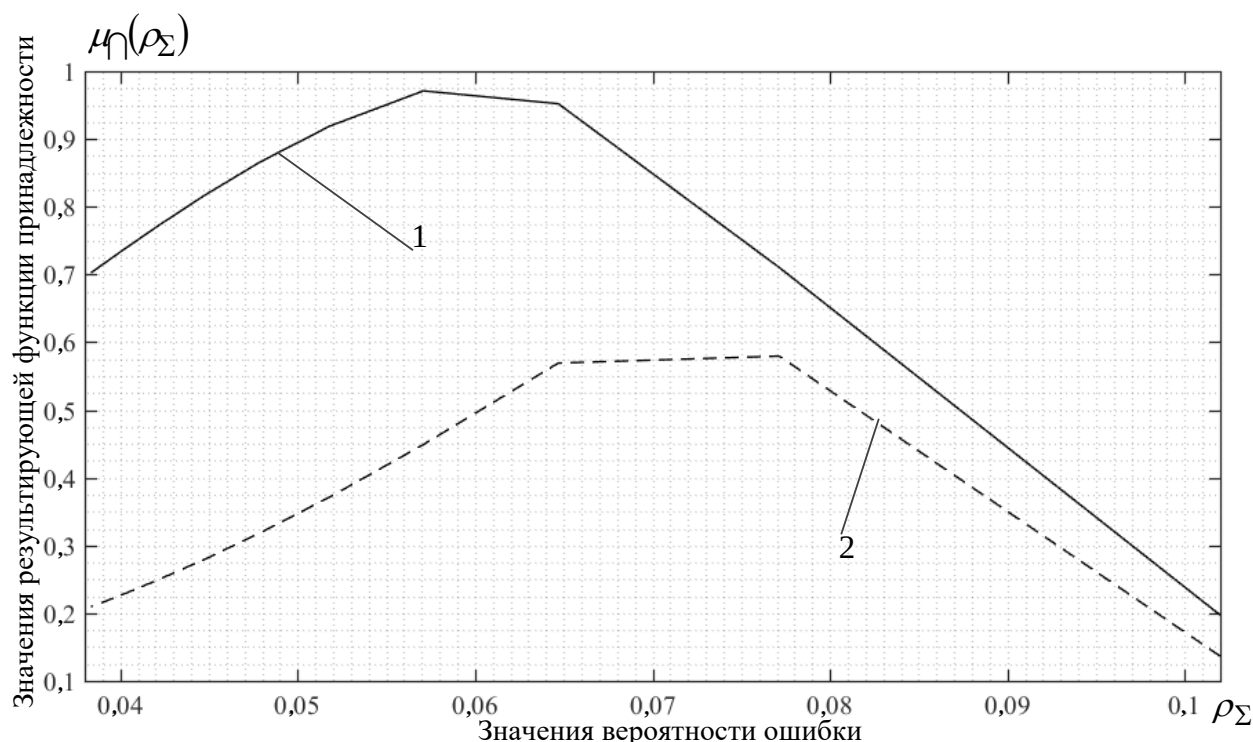


Рис. 6. Значения пересечений функций принадлежности значений параметров парциальных каналов (кривая 1 – функция принадлежности для оптимального распределения мощностей, кривая 2 – функция принадлежности для неоптимального распределения мощностей)

Для получения четкого значения целевой функции из нечеткого значения принадлежности применим операцию дефазификации:

$$\varphi^* = \frac{\sum_{n=1}^N [\cup(\cap \mu_n(\varphi_n))] \varphi_n}{\sum_{n=1}^N [\cup(\cap \mu_n(\varphi_n))]} . \quad (14)$$

В результате выполнения операции (14) получаем значение вероятности ошибки в параллельных парциальных каналах, равное $\rho_\Sigma = 0,0615$.

Численные исследования и сравнение с известными методами

Проведем сравнение полученных результатов предлагаемого метода с методами проектируемого градиента, методом множителей Лагранжа и генетическим алгоритмом (ГА). Наличие нескольких локальных минимумов в области допустимых решений целевой функции (4) не позволяет применить некоторые численные методы из-за невозможности регулирования шага градиентной процедуры. Наиболее подходящим для решения задачи поиска экстремума нели-

нейной функции нескольких переменных является метод проектируемого градиента, суть которого можно отобразить выражением [16]:

$$x_n^{k+1} = x_n^k \pm b \frac{\partial f(x_n^k)}{\partial x_n^k}, \quad (15)$$

где b – величина шага приращения градиента целевой функции $f(x_n)$.

Движение к экстремуму в (15) осуществляется на основании выбора кратчайшего направления градиента на k -ой итерации. При этом выбор величины шага градиента осуществляется интуитивно. Применительно к решению рассматриваемой задачи выбор величины шага осуществлялся путем сравнения значения целевой функции k -ой итерации с аналогичным значением на $(k-1)$ -ой итерации. Кроме того, на каждом шаге выполняется проверка условия (5). Результаты работы метода представлены на рис. 7.

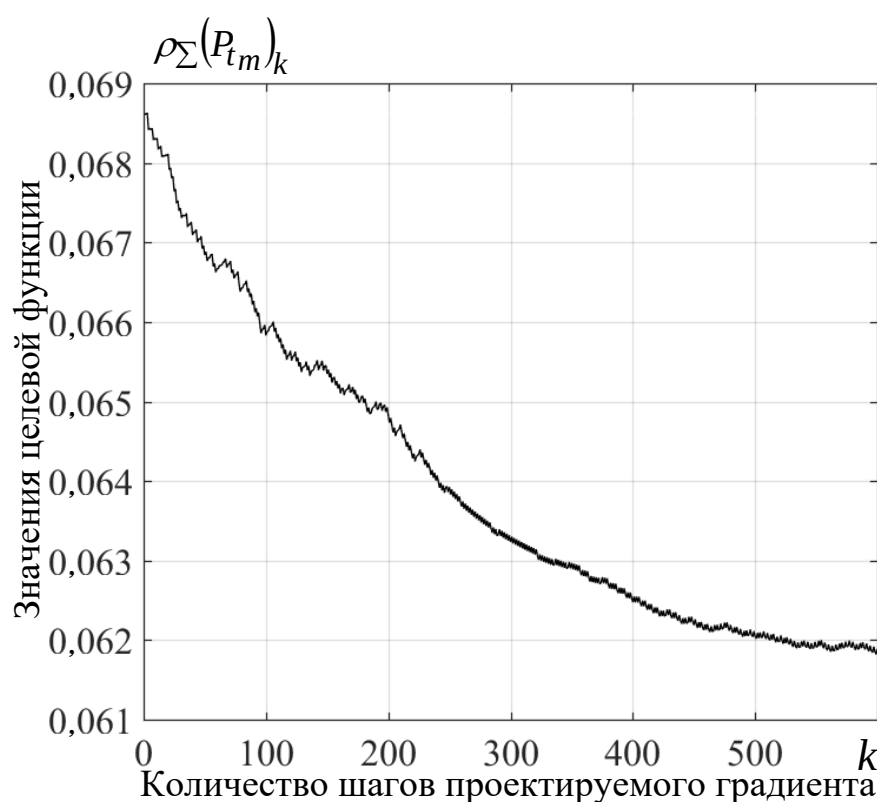


Рис. 7. Метод проектируемого градиента

Из рис. 7 видно, что применение метода обусловлено количеством процедур подбора размера шага для выхода из локального экстремума на каждой итерации. Большое количество процедур не позволяет решать задачу в режиме реального времени, что является необходимым в виду высокой динамики РТК.

Рассмотрим решение задачи методом множителей Лагранжа:

$$L(P_{t_m}) = 0,5 \left[1 - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\sqrt{\sum_{m=1}^M h_m^2(P_{t_m})}} \exp\left(-\frac{\sqrt{\sum_{m=1}^M h_m^2(P_{t_m})}^2}{2}\right) dt \right] + \alpha \cdot \left(\sum_{n=1}^N P_t(n) - P_{t\Sigma} \right). \quad (16)$$

Составим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) из частных производных функции Лагранжа (16) по $P_t(n)$ и α . Применение данного не итерационного подхода позволяет учесть накладываемые ограничения [21].

Решение данной СЛАУ позволяет определить значения параметров и неизвестный множитель Лагранжа α , которые позволяют получить систему равенств. Решение для числа каналов $M = 3$ при предельном значении мощности передатчика $P_{t\Sigma} = 6$ Вт дало значение параметров $P_{t1} = 2,4166$ Вт, $P_{t2} = 2,0207$ Вт, $P_{t3} = 1,5627$ Вт. При данных значениях аргументов функция приняла значение $\rho_\Sigma = 0,0633$. Полученное значение не соответствует минимуму целевой функции (4) с учетом ограничений (5).

Решим задачу методом генетического алгоритма (ГА) [29], не требующим вычисления производных целевой функции. Суть данного метода заключается в том, что на каждом этапе итерационного процесса выполняется следующий алгоритм:

- 1) случайным образом выбираются значения из множества параметров, таких что $P_{t_m} \in \{0, P_{t\Sigma}\}$;
- 2) отличительной особенностью метода от (ГА) является то, что выбранные из данного диапазона значения дополнительно подвергаются проверке на выполнение условия (5). Все удовлетворяющие данному значению условия образуют родительское множество;
- 3) далее выполняется уточнение пределов полученного множества аргументов и производится процедура скрещивания;
- 4) данная процедура состоит в том, что также случайным образом выбираются новые значения уже из уточненного (зауженного) интервала аргументов;
- 5) вычисляется минимальное значение целевой функции из выбранного диапазона значений (например, методом «пузырька»);
- 6) выполняется процедура мутации, которая заключается в сравнении интервалов матрицы скрещивания с новой популяционной матрицей. Это позволяет дополнительно уточнить интервал допустимых решений.

На рис. 8 представлен результат решения поставленной задачи методом ГА. Из графика видно, что ГА позволяет получить решение уже через 12-ти итераций. Это связано с малой размерностью задачи. Также из графика видно,

что значение целевой функции от итерации к итерации имеет большую дисперсию, что обусловлено случайным выбором параметров из интервалов. Однако случайность выбора и определяет название алгоритма.

Данная особенность заложена в основу нового метода, описание которого выходит за рамки данной работы. Поэтому ограничимся применением итерационной процедуры из метода ГА над параметрами ФП. Так как интервал ФП определен, то поиск оптимального сочетания параметров займет меньшее количество числовых операций, что позволит добиться сокращения количества итераций при поиске оптимального решения.

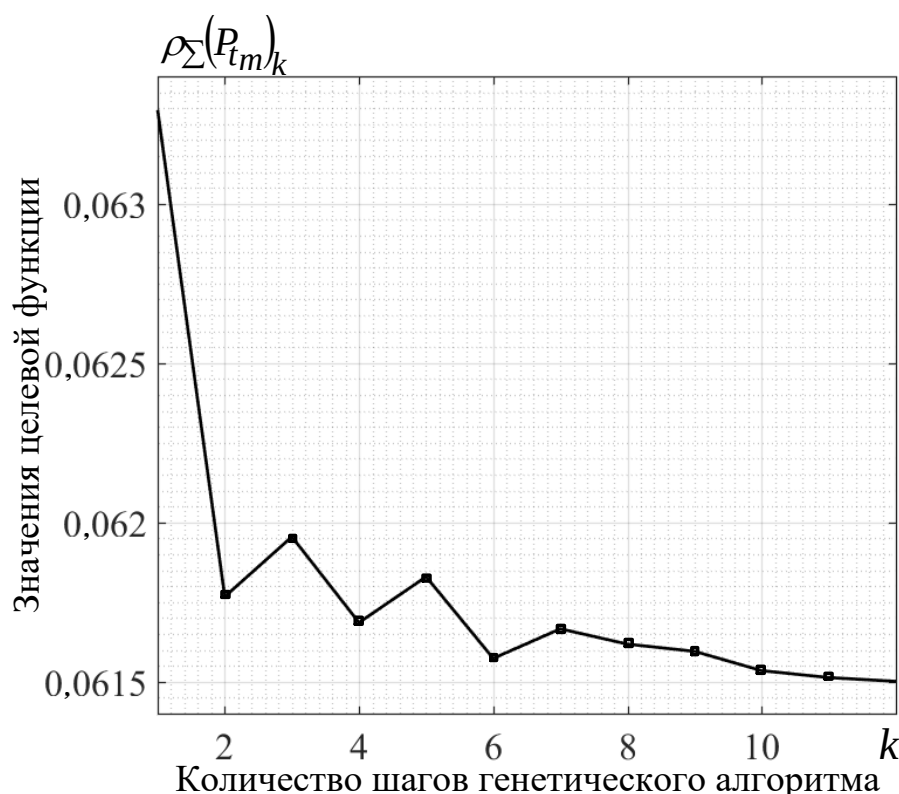


Рис. 8. Значения целевой функции от количества итераций

Результаты численных исследований

Сравнительный анализ рассмотренных методов и предлагаемого метода решения задачи определения оптимальных значений параметров мощности передатчика для парциальных радиоканалов приведен в таблице 1.

Анализ показывает, что применение градиентных методов на примере метода проектируемого градиента позволяет получить сколь угодно точное решение за число итераций, обусловленное выбором начального приближения. Выбор начального приближения является важным условием сходимости подобных методов. Большое число итераций может не удовлетворять требованиям к вычислительной способности процессоров, установленных на РТК. Метод неопределенных множителей Лагранжа дает приближенный результат, хотя не является итерационным для решения данной задачи. Применение итерационного поиска на множестве множителей Лагранжа безусловно дало бы точный результат, но также бы увеличило вычислительные трудности. Применение мето-

да генетического алгоритма позволяет уменьшить число итераций и получить более точное решение, но целевая функция имеет большую дисперсию при движении к минимуму. Предлагаемый метод, учитывающий степень принадлежности каждого параметра оптимальному решению, позволяет за счет модифицированных ФП нечетких множеств получить решение за минимальное число операций, число которых больше, чем в ГА, но при этом решение по точности сравнимо с методом проектируемого градиента. Недостатком предлагаемого подхода является необходимость построения такого числа ФП для каждого параметра, которое равно числу значений параметра в интервале. Это определяет точность предлагаемого подхода. Однако преимущество заключается в гибкости получения решения путем варьирования числа ФП в каждый момент времени и отсутствии необходимости задания начального приближения

Таблица 1 – Сравнительный анализ результатов работы предложенного и известных методов оптимизации

Номер канала	Дальность канала R_m , м	Значения мощностей передатчика P_{tm}^* , Вт			
		Метод проектируемого градиента	Метод неопределенных множителей Лагранжа	Метод генетического алгоритма	Предлагаемый метод на основе нечетких множеств
1	2000	1,9500	2,4166	2,4920	2,1961
2	2827	1,8650	2,0207	1,8137	2,0407
3	2498	2,1669	1,5627	1,6903	1,7632
$P_{t\Sigma}$, Вт		6	6	6	6
Количество итераций, шт		598	1	12	7
$\rho_{\Sigma}(P_{tm})$		0,06167	0,0633	0,06151	0,06157

Вывод

Задача оптимального перераспределения мощности между параллельными парциальными радиоканалами, формируемыми на борту РТК, для достижения минимума вероятности битовой ошибки требует применения методов решения нелинейных уравнений с ограничениями на общую мощность, выделяемую для функционирования передатчика. Так как ресурс мощности ограничен, то от оптимального распределения мощности зависит достоверность приема информации абонентом в условиях высокой динамики РТК. Поэтому возникающее противоречие между увеличением вычислительных затрат градиентных методов и обеспечением требуемой точности может быть разрешено за счет применения методов на основе искусственного интеллекта, таких как генетические алгоритмы, нейронные сети и нечеткие множества. Преимущества последних заключаются в расширении их области применимости из лингвистических задач на технические за счет возможности выражения разнородных технических параметров функциями принадлежности нечетких множеств [30, 31]. Реализация такого подхода возможна на основе применения нечетких логических контроллеров [32]. Так, схема управляющего устройства, реализующего пред-

лагаемый подход может быть выполнена на программируемом контроллере или программируемой логической интегральной схеме, включенной в блок управления мощностью передатчика. Это позволяет абстрагироваться от областей существования конкретных параметров и совершать вычислительные операции именно над их функциями принадлежности. Недосток данного аппарата заключается в том, что единое правило выбора функций принадлежности для разнородных параметров отсутствует. Приведенные в статье результаты численных исследований позволяют сделать вывод о том, что указанный выше недостаток нечетких множеств может быть уменьшен или устранен путем конкретизации и обоснования применения той или иной функции. Преимущества же данного аппарата используются и могут иметь дальнейшее развитие при анализе и синтезе многофункциональных РТК и систем на основе использования искусственного интеллекта.

Литература

1. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132.
2. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2012. С. 86-91.
3. Самойленко Д. В., Еремеев М. А., Финько О. А. Повышение информационной живучести группы робототехнических комплексов методами модулярной арифметики // Наукоемкие технологии в космических исследованиях земли. 2018. Т. 10. № 2. С. 62-77.
4. Боев Н. М. Способы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровых систем связи беспилотных летательных аппаратов // Труды МФТИ. 2014. Т. 6. № 2. С. 162-166.
5. Польшинкин А. В., Ле Х. Т. Исследование характеристик радиоканала связи с беспилотными летательными аппаратами // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Т. 2. №. 7. С. 98-106.
6. Защита от радиопомех / под. ред. М. В. Максимова – М.: Советское радио, 1976. – 496 с.
7. Тузов Г. И., Сивов В. А., Прытков В. И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
8. Андронов И. С., Финк Л. М. Передача дискретных сообщений по параллельным каналам. – М.: Советское радио, 1971. – 408 с.
9. Дворников С. В. Методика оценки имитостойчивости каналов управления роботизированных устройств // Радиопромышленность. 2016. № 2. С. 64-69.
10. Бакулин М. Г., Варукина Л. А., Крейнделин В. Б. Технология MIMO: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия-Телеком, 2014. – 244 с.
11. Рашич А. В. Сети беспроводного доступа WiMAX. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2011. – 179 с.

12. Muaayed Al-Rawi. Massive MIMO system: an overview // International journal of open information technologies. 2017. Vol. 5. No. 2. P. 5-8.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1974. – 832 с.
14. Волков Р. В., Дворников С. В., Саяпин В. Н., Симонов А. Н. Основы построения и функционирования разностно-дальномерных систем координатометрии источников радиоизлучений / под ред. Р. В. Волкова. – СПб.: Военная академия связи, 2013. – 116 с.
15. Мануилов Б. Д., Башлы П. Н., Климухин Д. В., Мануилов М. Б., Безуглов Ю. Д. Многофункциональные антенные системы. – Ростов-на-Дону: Ростовский военный институт ракетных войск, 2008. – 443 с.
16. Акулич И. Л. Математическое программирование в примерах и задачах. – М.: Высшая школа, 1986. – 319 с.
17. Кривилев А. В. Основы компьютерной математики с использованием системы Matlab. – М.: Лекс-Книга, 2005. – 496 с.
18. Янцен А. С., Носов В. И. Оценка помехоустойчивости и пропускной способности технологии ММО с учетом корреляции сигналов в антеннах // Вестник Сибирского государственного университета. 2016. № 2. С. 63-77.
19. Ortega J. M., Rheinboldt W. C. Iterative solution of nonlinear equation in several variables. – New York, University of Maryland Colledge Park, Maryland, Academic press, 1970. – 553 p.
20. Himmelblau D. V. Applied nonlinear programming. – Austin, Texas, The University of Texas, McGraw-Hill Book Company, 1972. – 526 p.
21. Васильев Ф. П. Методы оптимизации. – М.: Факториал Пресс, 2002. – 824 с.
22. Прокис Дж. Цифровая связь. Пер. с англ. / под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
23. Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Назаров М. В., Финк Л. М. Теория передачи сигналов. – М.: Связь, 1980. – 288 с.
24. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
25. Джазовский Н. Б., Орлова Л. В. Радиоканалы систем передачи информации. – Пенза: Пензенский политехнический институт, 1988. – 64 с.
26. Батыршин И. З. Основные операции нечеткой логики и их обобщение. – Казань: Отечество, 2001. – 100 с.
27. Дилигенский Н. В., Дымова Л. Г., Севастьянов П. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Машиностроение, 2004. – 304 с.
28. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами Matlab. – М.: Горячая линия-телеком, 2007. – 288 с.
29. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. – М.: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 2014. – 446 с.

30. Махов Д. С., Мищенко С. Е. Метод решения многокритериальных задач синтеза интеллектуальных антенных систем // Известия Южного федерального университета. Технические науки. Методы искусственного интеллекта. 2010. № 2. С. 117-121.

31. Белов С. Г. Использование нечеткой логики при отождествлении воздушных радиолокационных объектов в процессе их многоцелевого сопровождения // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 5. С. 64-71.

32. Чернов В. Г. Нечеткие контроллеры. Основы теории и построения. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2003. – 148 с.

References

1. Makarenko S. I. Military robots – the current state and prospects of improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132 (in Russian).

2. Boev N. M. Analysis of UAV radio control and telemetry systems. *Vestnik SibGAU*, 2012, no. 42, pp. 86-91 (in Russian).

3. Samoylenko D. V., Yeremeyev M. A., Finko O. A. Increase in information survivability of group of robotic complexes by methods of modular arithmetics. *Hi-tech earth and spase research*, 2018, vol. 10, no. 2, pp. 62-77 (in Russian).

4. Boev N. M. Sposoby povysheniya jenergeticheskoy i spektral'noj jeffektivnosti cifrovyyh sistem svyazi bespilotnyh letatel'nyh apparatov [Ways of increase in power and spectral efficiency of UAV digital communication systems]. *Journal of Moscow Institute of Physics Technology*, 2014, vol. 6, no. 2, pp. 162-166 (in Russian).

5. Polynkin A. V., Le H. T. Analysis of characteristics of UAV communication link. *Izvestiya Tula State University*, 2013, vol. 7, no. 2, pp. 98-106 (in Russian).

6. Maksimov M. V. *Zaschita ot radiopomeh* [Protection against a radio noise]. Moscow, Soviet radio Publ., 1976. 496 p (in Russian).

7. Tuzov G. I., Sivov V. A., Prytkov V. I. *Pomehozashhennost' radiosistem so slozhnymi signalami* [Noise immunity of radio systems with difficult signals]. Moscow, Radio and communication Publ., 1985. 264 p (in Russian).

8. Andronov I. S., Fink L. M. *Peredacha diskretnyh soobshhenij po parallel'nym kanalam* [Digital communication in parallel channels]. Moscow, Soviet radio Publ., 1971. 408 p (in Russian).

9. Dvornikov S. V. Metodika ocenki imitoustojchivosti kanalov upravleniya robotizirovannyh ustrojstv [Metod of estimation of harmful interference stability in robotic control channels]. *Radio industry*, 2016, no. 2, pp. 64-69 (in Russian).

10. Bakulin M. G., Varukina L. A., Krejndelin V. B. *Tehnologija MIMO: principy i algoritmy* [MIMO technology: principles and algorithms]. Moscow, Gorjachaja linija-telekom Publ., 2014. 244 p (in Russian).

11. Rashich A. V. *Seti besprovodnogo dostupa WiMAX* [WiMAX wireless communication networks]. Saint-Petersburg, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University Publ., 2011. 179 p (in Russian).

12. Muaayed Al-Rawi. Massive MIMO system: an overview. *International journal of open information technologies*, 2017, vol. 5, no. 2, pp. 5-8.

13. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike* [Mathematics reference book]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 832 p (in Russian).
14. Volkov R. V., Dvornikov S. V., Sajapin V. N., Simonov A. N. *Osnovy postroeniya i funkcionirovaniya raznostno-dal'nomernykh sistem koordinatometrii istochnikov radioizluchenij* [Bases of construction and functioning of differential ranging measuring systems of sources of radio emissions]. Saint-Petersburg, Military Telecommunication Academy Publ., 2013. 116 p (in Russian).
15. Manuilov B. D., Bashly P. N., Klimuhin D. V., Manuilov M. B., Bezuglov Ju. D. *Mnogofunkcional'nye antennnye sistemy* [Multifunctional antenna systems]. Rostov-on-Don, Rostovskij voennyj institut raketnyh vojsk, 2008. 443 p (in Russian).
16. Akulich I. L. *Matematicheskoe programmirovaniye v primerah i zadachah* [Mathematical programming in examples and tasks]. Moscow, Higher School Publ., 1986. 319 p (in Russian).
17. Krivilev A. V. *Osnovy komp'yuternoj matematiki s ispol'zovaniem sistemy Matlab* [Fundamentals of computer mathematics with use of the Matlab system]. Moscow, Leks-Kniga Publ., 2005. 496 p (in Russian).
18. Jancen A. S., Nosov V. I. Noise stability and the capacity estimation of MIMO technology taking account antenna signals correlation. *Vestnik SibGUTI*, 2016, no. 2, pp. 63-77 (in Russian).
19. Ortega J. M., Rheinboldt W. C. *Iterative solution of nonlinear equation in several variables*. New York, University of Maryland Colledge Park, Maryland, Academic press, 1970. 553 p.
20. Himmelblau D. V. *Applied nonlinear programming*. Austin, Texas, The University of Texas, McGraw-Hill Book Company, 1972. 526 p.
21. Vasil'ev F. P. *Metody optimizacii* [Methods of optimization]. Moscow, Factorial Press Publ., 2002. 824 p (in Russian).
22. Proakis J.G. *Digital communications*. New York, McGraw-Hill Book Company, 1983. 800 p.
23. Zjuko A. G., Klovskij D. D., Nazarov M. V., Fink L. M. *Teoriya peredachi signalov* [Signal transfer theory]. Moscow, Svjaz' Publ., 1980. 288 p (in Russian).
24. Bernard Sklar. *Digital communications fundamentals and applications* second edition communications engineering services, Tarzana, University of California, Los Angeles, 2000. 1104 p.
25. Dzhazovskij N. B., Orlova L. B. *Radiokanalny sistem peredachi informacii* [Radio channels of systems of information transfer]. Penza, Penza State University Publ., 1988. 64 p (in Russian).
26. Batyrshin I. Z. *Osnovnye operacii nechetkoj logiki i ih obobshhenie* [Main operations of fuzzy logic and their generalization]. Kazan', Otechestvo Publ., 2001. 100 p (in Russian).
27. Diligenskij N. V., Dymova L. G., Sevast'janov P. V. *Nechetkoe modelirovaniye i mnogokriterial'naya optimizaciya proizvodstvennykh sistem v uslovijah neopredelennosti: tehnologiya, jekonomika, jekologiya* [Fuzzy modeling and multicriteria optimization of production systems in the conditions of uncertainty:

technology, economy, ecology]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 2004. 304 p (in Russian).

28. Shtovba S. D. *Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami Matlab* [Design of fuzzy systems means of Matlab]. Moscow, Gorjachaja linija-telekom Publ., 2007. 288 p (in Russian).

29. Karpenko A. P. *Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vdohnovlennye prirodoj* [Modern algorithms of search optimization. The algorithms inspired by the nature]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2014. 446 p (in Russian).

30. Mahov D. S., Mishhenko S. E. Method of the decision manycriteria problems of the synthesis of the intellectual antenna systems. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2010, pp. 117-121 (in Russian).

31. Belov S. G. Use of fuzzy logic identification of air radar objects in the course of their multi-purpose maintenance. *Journal of Radio Electronics*, 2017, no. 5, pp. 64-71 (in Russian).

32. Chernov V. G. *Nechetkie kontrollery. Osnovy teorii i postroeniya* [Fuzzy controllers. Bases of the theory and construction]. Vladimir, Vladimir State University Publ., 2003. 148 p (in Russian).

Статья поступила 6 августа 2019 г.

Информация об авторе

Махов Денис Сергеевич – кандидат технических наук. Докторант специальной кафедры. Краснодарское высшее военное училище имени генерала армии С.М. Штеменко. Область научных интересов: теория синтеза антенных решеток; помехоустойчивое кодирование; цифровая обработка сигналов. E-mail: sinedvoham@yandex.ru

Адрес: 350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4.

Method of power parameters optimization of communication system in partial radio channels of small-sized mobile objects based on the fuzzy sets theory basis

D. S. Makhov

Problem definition: the organization of communication in radio engineering system sets a task to eliminate a contradiction between increase in volume of information necessary for transfer and its transfer time minimization. This task acquires special relevance in the communication system with high-maneuverable small-sized mobile objects, for example in the robotic complexes functioning in the interference conditions. The organization of parallel spatial radio channels of information transfer which is usually applied in mobile communication system of the last generation can reduce information transfer time. For mobile systems, in which the robotic mobile platform of a robotic complex acts as the base station or a repeater, the problem of optimum transmitter power redistribution for improvement the parallel channels quality acquires special relevance because of the energy resources restriction and the high platform mobility. At the same time the optimal search speed requirements of a distributive task solution increase. New methods of optimum power value definition in a partial radio channel in real time are required. **The purpose of the**

work is the development of transmitter power distribution optimization method in a robotic complex mobile platform at the spatial parallel radio channels organization. In order to solve the problem, it is proposed to use a fuzzy set theory apparatus to construct modified functions, which allow to explore the belonging of each channel power values to target function values. Such target function determines the quality of the entire set of parallel radio channels. **The used methods:** The solution of optimization problem is performed by the construction of special fuzzy sets belonging functions and fuzzy logical operations execution. The application of fuzzy logical operations on these functions allows to estimate each channel power contribution to the total set. Comparison with known optimization methods is carried out. **Novelty** of the offered method lies in known accessory functions modification and fuzzy logical operations, and also development of the new algorithm to solve an optimizing task and to obtain the exact decision. Optimum power distribution in spatial parallel radio channels is the result of using the offered method. If characteristics of each partial channel change, optimum power distribution allows to provide and to maintain the required quality during the communication session. **Practical importance:** the proposed solution can be realized on the fuzzy logic controller basis which is connected to the transmitter intensifying cascade. Also it can be included in the automatic strengthening adjustment scheme. Also the implementation of the proposed solution can be carried out by the programmable logical integrated circuits in the form of the transmitter power management module software.

Keywords: spatial parallel radio channels, communication system of the robotic complex, optimal transmitter power control, membership function, fuzzy set, information transmission duration, method of optimization of energy parameters.

Information about Author

Denis Sergeevich Makhov – Ph.D. of Engineering Sciences. Doctoral Candidate of Holder of an Advanced Doctorate of Special Department. Krasnodar Higher Military School named after General of the Army S.M. Shtemenko. Field of research: synthesis of antenna arrays; noiseproof coding; signal processing. E-mail: sinedvoham@yandex.ru

Address: Russia, 350063, Krasnodar, Krasina street, 4.