

## ОТЗЫВ

официального оппонента Габриэльяна Дмитрия Давидовича на диссертацию Белокопя Дмитрия Александровича на тему: «Параметрический синтез декаметрового канала связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

### Актуальность диссертационного исследования

В настоящее время Российская Федерация активно развивает проекты в Арктической зоне. Одним из таких проектов является развитие Северного морского пути. С учетом географических и климатических особенностей важной задачей в Арктическом регионе является обеспечение связи с подвижными и стационарными объектами, находящимися на значительном удалении друг от друга (более 400 километров). Наиболее экономически выгодным видом связи является декаметровая (ДКМ) связь.

Анализ современных и перспективных ДКМ систем связи показывает, что они создаются на базе протоколов и стандартов MIL-STD-188-110 и STANAG, которые используют цифровые виды модуляции сигналов. Наиболее часто применяется фазовая модуляция  $M$ -PSK с кратностью  $M=4, 8, 16$ , а также квадратурная амплитудная модуляция  $M$ -QAM с кратностью модуляции  $M=16, 32, 64$ . Скорость передачи информации в таких модемах достигает 240 кбит/с, что почти на 2 порядка больше, чем при использовании традиционных для ДКМ связи сигналов BFSK (порядка 3 кбит/с).

Помимо скорости передачи информации важнейшим показателем качества ДКМ систем связи является надежность, характеризуемая выполнением условия ( $P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}}$ ).

Анализ современных систем ДКМ связи с цифровыми видами модуляции показал, что при возрастании требований к надежности связи до  $D_{\text{св тр}} = 0,85$ , требования допустимой вероятности ошибки возросли на два порядка до уровня  $P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$ . Экспериментальным путем установлено, что обеспечить такие значения показателей качества можно только на основе устранения дискретной многолучевости в ДКМ канале связи, обусловленной рассеянием волны на неоднородностях ионосферы в одном дискретном луче (моде). Однако в арктических широтах часто наблюдаются возмущения типа диффузности ионосферы, характеризуемой существенным (на 1...2 порядка) увеличением интенсивности мелкомасштабных неоднородностей ионосферы, диффузного рассеяния волны и характеристик замираний принимаемых сигналов в однолучевом ДКМ канале связи.

Несмотря на многочисленные исследования, связанные с вопросами структуры ионосферы и ее изменения, существующий научный аппарат не дает полного понимания о выборе направлений совершенствования систем ДКМ связи. С учетом этого тема диссертации, посвященной синтезу параметров однолучевого декаметрового канала с цифровыми сигналами, обеспечивающими требуемую надежность в условиях диффузности ионосферы, является актуальной.

### Анализ содержания диссертации

При выполнении системного анализа показателей качества систем ДКМ связи соискатель Белоконь Д.А. правомерно сформулировал центральную идею диссертационного исследования – повышения надежности ДКМ связи за счет выбора параметров ДКМ каналов связи, таких как отношение рабочей частоты к максимально применимой частоте (МПЧ)  $f_0/f_m$ , вид модуляции  $g$ , кратности модуляции  $M$ , кратности разноса приемных антенн  $n$ , допустимой дистанции разноса приемных антенн  $\Delta\rho_{a\partial on}$  на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы.

С учетом выбранной области исследований наиболее общей постановкой явился бы поиск глобального экстремума некоторого функционала, связанного с надежностью связи в виде

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(f_0/f_m, g, M, n, \Delta\rho_{a\partial on})$$

и его частных производных, на основе которых определяется изменение функционала по каждому из входящих в него параметров

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{\partial\mathcal{E}(f_0/f_m, g, M, n, \Delta\rho_{a\partial on})}{\partial(f_0/f_m)} \Delta(f_0/f_m),$$

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{\partial\mathcal{E}(f_0/f_m, g, M, n, \Delta\rho_{a\partial on})}{\partial g} \Delta g,$$

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{\partial\mathcal{E}(f_0/f_m, g, M, n, \Delta\rho_{a\partial on})}{\partial M} \Delta M,$$

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{\partial\mathcal{E}(f_0/f_m, g, M, n, \Delta\rho_{a\partial on})}{\partial n} \Delta n,$$

$$\Delta\mathcal{E} = \frac{\partial\mathcal{E}(f_0/f_m, g, M, n, \Delta\rho_{a\partial on})}{\partial\Delta\rho_{a\partial on}} \Delta(\Delta\rho_{a\partial on}).$$

При этом частные производные по виду модуляции  $g$ , кратности модуляции  $M$  и кратности разноса приемных антенн  $n$  понимаются как изменение функционала при переходе в упорядоченном множестве значений соответствующего параметра.

Однако в данной постановке решение выходит далеко за рамки уровня научной задачи, которая характерна для диссертации на соискание степени кандидата наук, и является решением научной проблемы, составляющей уровень диссертации на соискание степени доктора наук.

Вместе с тем, соискатель успешно справился с исследованием отдельных направлений, которые имеют теоретическую и практическую значимость для последующего решения научной проблемы.

Результаты исследований указанных вопросов автором изложены в диссертации, которая состоит из введения, четырех глав и заключения и трех приложений. Основной текст диссертации изложен на 189 страницах. Список литературы состоит из 161 наименования.

Во **введении** обоснован объект, предмет и цель диссертационного исследования. Обоснованы противоречия в практике и науке, на основе которых осуществлена постановка общей и 3 частных научных задач. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Показан личный вклад соискателя.

**В первой главе** проведен анализ показателей качества декаметровых каналов связи и влияние на них диффузности ионосферы. Обоснованы современные возможности цифровых ФАР для устранения дискретной многолучевости и выделения одного дискретного луча в ДКМ канале связи. Приведено обоснование противоречия в практике и постановка цели исследования. С применением методов системного анализа проведен анализ альтернативных методов повышения надежности декаметровых каналов связи. На основе проведенного анализа выявлено противоречие в науке. На этой основе выполнена постановка общей научной задачи и произведена ее декомпозиция на 3 частные научные задачи.

**Во второй главе** решена первая частная научная задача, которая заключается в разработке методики оценки надежности однолучевого декаметрового канала связи при одиночном приеме бинарных сигналов с частотной модуляцией (BFSK) с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы. Представлена численная и аналитическая методики оценки надежности, проведен их сравнительный анализ. Разработан алгоритм оценки надежности декаметрового канала связи при одиночном приеме сигналов BFSK с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы.

**В третьей главе** представлены результаты решения второй и третьей частных научных задач диссертационного исследования.

Второй частной научной задачей является разработка методики оценки надежности ДКМ канала связи при разнесенном приеме многократных цифровых сигналов с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы.

При ее решении используется апробированный численный метод, реализованный в стандартной библиотеке MATLAB. На основе данного метода построены графики зависимости вероятности ошибки от отношения сигнал/шум и параметра Райса. По этим графикам выполняется оценка допустимого отношения сигнал/шум при приеме цифровых сигналов PSK и QAM. Полученные оценки допустимого отношения сигнал/шум используются как основа при оценке надежности декаметрового канала связи в условиях диффузности ионосферы.

Результаты решения первой и второй частных научных задач позволили решить третью частную научную задачу разработки методики выбора параметров декаметрового канала связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы для обеспечения требуемой надежности связи на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы.

На основе разработанной методики построен алгоритм обеспечения требуемой надежности декаметрового канала связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы.

**В четвертой главе** представлены технические решения по реализации разработанной методики выбора параметров декаметрового канала связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы для обеспечения требуемой надежности связи на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы. Отличительной особенностью данного решения является то, что оценка уровня диффузности ионосферы в интересах ДКМ связи осуществляется с помощью модифицированного двухчастотного GISTM-приемника GPStation-6.

Разработаны практические рекомендации по обеспечению требуемой надежности ДКМ канала связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы. Показано, что разработанная методика выбора параметров декаметрового канала связи позволяет в условиях сильной диффузности ионосферы обеспечить повышение надежности ДКМ канала связи с многократными цифровыми сигналами на 55...64% за счет разнесенного приема на  $n=2-4$  антенны и на 11...16 % - за счет выбора кратности ( $M$ ) и вида модуляции (PSK или QAM).

**В заключении** представлены основные результаты и выводы проведенных диссертационных исследований.

**Анализ автореферата диссертации** показал, что он соответствует тексту диссертации, основным положениям работы и в достаточной мере отражает её содержание.

## **Научная новизна диссертационной работы.**

Научная новизна диссертационного исследования обоснована получением следующих результатов:

1. Формализация и постановка общей научной задачи исследования выполнены на основе применения методов системного анализа проблемы обеспечения требуемой помехоустойчивости и надежности однолучевого ДКМ канала связи в условиях диффузности ионосферы.

2. Разработана методика оценки надежности ДКМ канала связи с сигналами BFSK с райсовскими замираниями в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы, которая, в отличие от известных, позволяет более достоверно оценить надежность связи (так как в однолучевом ДКМ канале преобладают райсовские замирания сигнала).

3. Разработана методика оценки надежности ДКМ канала связи при разнесенном приеме сигналов с цифровыми видами модуляции (*M*-PSK, *M*-QAM) с различной кратностью модуляции с райсовскими замираниями в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ, которая, в отличие от известных, позволяет учесть влияние диффузности ионосферы при оценке надежности ДКМ канала связи с многократными цифровыми сигналами.

4. Разработана методика выбора параметров ДКМ канала связи для обеспечения требуемой надежности связи, которая, в отличие от известных, позволяет осуществить многопараметрическую адаптацию ДКМ КС за счет выбора отношения рабочей частоты к МПЧ, вида и кратности модуляции, характеристик разнесения приемных антенн (количества и допустимого разноса приемных антенн).

## **Теоретическая значимость.**

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии известных методик оценки надежности декаметровых каналов связи. Полученные результаты позволяют производить расчет декаметровых радиолиний с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы.

## **Практическая значимость.**

Разработаны научно обоснованные рекомендации по обеспечению требований к надежности связи в однолучевом ДКМ канале с многократными цифровыми сигналами (PSK, QAM) в условиях диффузности ионосферы на основе результатов GPS-зондирования их уровня. Показана возможность повышения в условиях сильной диффузности ионосферы надежности связи в однолучевом ДКМ канале с цифровыми сигналами на 55...64% за счет разнесенного приема на  $n=2-4$  антенны и на 11...16 % - за счет выбора

кратности ( $M$ ) и вида модуляции. На основе полученных технических решений и представленных практических рекомендаций возможно осуществить проектирование и построение декаметровых систем связи, отвечающих современным требованиям к качеству их функционирования в условиях возмущений ионосферы.

### **Степень обоснованности и достоверности результатов диссертационного исследования.**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается применением апробированного научно-методического аппарата при решении поставленных научных задач, апробацией полученных результатов и их практической реализацией, корректностью принятых допущений и ограничений.

### **Внедрение результатов работы.**

Основные результаты диссертационного исследования были реализованы в ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени» (г. Санкт-Петербург) в ходе выполнения научно-исследовательской работы «Опорник-ВНС-ВАС», в АО «НПО «Рязаньприбор» при выполнении инициативной работы «Разработка аппаратуры передачи специальных данных ПД-442», в АО «РАДИЙ-ТН» (г. Москва) в ходе выполнения опытно-конструкторской работы «Лир» и в учебном процессе кафедры радиосвязи ФГКВОУ ВО «Военная академия связи» (г. Санкт-Петербург).

### **Апробация и публикация результатов исследования.**

Основные результаты диссертационной работы отражены в 20 научном труде по теме диссертационной работы, в том числе: в 7 статьях в журналах из перечня ВАК по специальности 2.3.1, в 2 статьях в журналах, индексируемых в базе RSCI, в 1 патенте РФ на изобретение и 1 патенте на полезную модель, в 2 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ, в 7 докладах на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях.

### **Соответствие паспорту специальности.**

Полученные в работе результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки):

- п.2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта;
- п.7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем;
- п.11. Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества, надежности функционирования сложных систем управления и их элементов.

### **Замечания по диссертационной работе.**

В проведенном диссертационном исследовании имеются следующие замечания:

1. В работе отсутствует анализ характеристик направленности цифровых ФАР, обеспечивающих излучение(выделение) одного дискретного луча в ДКМ каналах связи.

2. Не приведены результаты оценки достижимой надежности связи в ДКМ канале при повышении требований к вероятности ошибочного приема сигналов BFSK до  $10^{-5}$  в условиях их общих (например, релейских) замираний.

3. В диссертации автор для оценки уровня диффузности ионосферы предлагает использовать двухчастотный модернизированный GISTM-приемник систем спутниковой навигации GPS/ГЛОНАСС. Целесообразно пояснить выбор именно данного метода оценки уровня диффузности ионосферы и его преимущества по сравнению с известными.

4. В работе не обоснован способ применения цифровых ФАР для одновременного решения задач выделения одного дискретного луча в ДКМ канале связи и пространственно-разнесенного приема сигналов для борьбы с замираниями.

Выявленные замечания и недостатки не носят принципиального характера и не наносят существенного ущерба значимости полученных результатов диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне.

### **Выводы**

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой. Научная новизна, актуальность, теоретическая и практическая значимость, личный вклад автора не вызывают сомнений. Опубликованные работы и автореферат отражают основное содержание диссертации.

Полученные в работе результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Результаты диссертационного исследования свидетельствуют о решении научной задачи, имеющей значение для декаметровый радиосвязи. С учетом этого соискатель Белоконов Дмитрий Александрович заслуживает присуждения степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заместитель начальника научно-технического комплекса по науке Федерального государственного унитарного предприятия «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»

«30» октября 2025 г.

Д.Д. Габриэльян

Докторская диссертация защищена по специальности 20.02.25 «Военная электроника, аппаратура комплексов военного назначения».

344038, г. Ростов-на-Дону, ул. Нансена, 130, Телефон: (863) 2555-311, Адрес электронной почты: [rniirs@rniirs.ru](mailto:rniirs@rniirs.ru), Адрес сайта организации: [rniirs.ru/index.shtml](http://rniirs.ru/index.shtml).

Подпись Габриэльяна Д.Д. заверяю.

И.о. заместителя директора по управлению персоналом Федерального государственного унитарного предприятия «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»

«30» октября 2025 г.



Е.С. Букарева