

РАДИОЛИНИИ МЕТЕОРНОЙ СВЯЗИ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

С.В. Воронин¹, В.И. Дорошенко², Ю.Г. Ксенофонтов^{2*}

¹Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,
Санкт-Петербург, 196105, Российская Федерация

²Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова,
Санкт-Петербург, 198035, Российская Федерация

*Адрес для переписки: ksenofontov.ura@mail.ru

Информация о статье

УДК 621.371

Статья поступила в редакцию 09.06.2019

Ссылка для цитирования: Воронин С.В., Дорошенко В.И., Ксенофонтов Ю.Г. Радиолинии метеорной связи в телекоммуникационной сети Северного морского пути // Труды учебных заведений связи. 2019. Т. 5. № 3. С. 13–18. DOI:10.31854/1813-324X-2019-5-3-13–18

Аннотация: Целью данной статьи является обоснование целесообразности применения метеорной сети связи как телекоммуникационной основы в сети доступа системы управления движением судов к объектам инфраструктуры Арктики России в прибрежной зоне Северного морского пути. В ней с позиций системного анализа представлены основные параметры, характеризующие телекоммуникационные технологии метеорной связи, структурно-функциональная схема, обобщенная математическая модель сети, состоящей из радиопередатчика и приемника, включая антенные системы. Сформулированы предложения по использованию в качестве ультракоротковолновых антенных систем адаптивных антенных решеток.

Ключевые слова: радиолиния метеорной связи, структурно-функциональная схема, адаптивные антенные решетки, коэффициент использования радиолинии, многолучевое распространение.

Метеорная связь на ультракоротких волнах (УКВ) широко используется во всем мире, в том числе и в условиях Крайнего Севера [1], однако проблема передачи данных по радиолиниям метеорной связи (РМС) относится к числу слабо структурируемых задач. Самую большую неопределенность вносит случайный характер моментов появления метеорных следов [2], пригодных для передачи данных, и случайный характер длительностей существования этих следов, которые способны обеспечить энергетический контакт между корреспондентами. Отсутствие таких экономичных телекоммуникационных сетей тормозит развитие судоходства с использованием Северного морского пути. Один из вариантов, который включает в себя три радиосети на базе РМС, позволяющих сформировать статистически устойчивый канал передачи данных между удаленными объектами инфраструктуры Северного морского пути [3], представлен на рисунке 1, где: А, Б, В – ведущие станции соответствующих подсетей; a_i , b_i – ведомые станции каждой подсети; ПРД – УКВ-передатчик; ПРМ – УКВ-приемник.



Рис. 1. Топология варианта телекоммуникационной сети обмена данными на примере морского спасательно-координационного центра (МСКЦ) в городе Диксон

Центром каждой из радиосетей является ведущая станция (ВДС). В свою очередь, все ведущие станции ВДС-1, ВДС-2 и ВДС-3 включены в единую локальную вычислительную сеть (ЛВС), в центре которой расположен главный сервер, например, МСКЦ, регулирующий работу всех радиосетей.

Исходя из того, что технические средства навигационного оборудования (ТС НО) в Арктике функционируют в сложных географических условиях, и расположены в радиусе до 2000 км от ВДС, возникает необходимость поиска наиболее рационального решения дальней связи по критерию «эффективность-стоимость». Тем не менее, несмотря на широкое использование РМС во всем мире, такой вид связи до настоящего времени не применяется в телекоммуникациях Северного морского пути. В то же время для обеспечения его нормального функционирования в условиях Арктики целесообразно в автоматизированной системе управления движением судов (СУДС) в условиях сложной гидрометеорологической обстановки Севера России применить РМС. Сложные технические средства навигационного оборудования СУДС в этих условиях могут выходить из строя, а поэтому необходим централизованный непрерывный автоматический мониторинг эксплуатационного состояния этих ТС НО. Поэтому для каждого ТС НО необходимо предусмотреть автоматический контроль своей работоспособности и по его результатам формировать формализованное сообщение для центра, осуществляющего такого вида мониторинг. Исходя из решения стоящих перед ним задач, с учетом складывающейся обстановки, частоту передачи и объем таких сообщений определяет СУДС. Если сообщения передаются по прерывистому каналу передачи данных РМС, то в течение каждого энергетического контакта могут быть переданы либо все сообщения полностью, либо (если были прерывания в связи) по частям. Для охвата всех ТС НО на большой территории (до 2000 км) формируется сеть РМС. Эта сеть может охватывать до 200 ТС НО. Территория, которую может охватывать одна РМС, зависит от параметров ее технических средств: мощности радиопередающих устройств (РПДУ), чувствительности радиоприемных устройств (РПУ), физических параметров антенн, реализованных методов модуляции-демодуляции сигнала и др. Эти параметры определяют коэффициент использования $K_{и}$ пропускной способности РМС, а от него зависит предельное количество ТС НО, которые могут быть охвачены одной РМС. Таким образом, задача построения структуры РМС является многокритериальной задачей и для ее оптимизации требуется нахождение компромиссного решения. В данной работе основное внимание уделяется проблеме повышения $K_{и}$ путем применения адаптивных антенных решеток (ААР) на УКВ.

Принцип реализации предлагаемого решения следующий. Суммарное количество метеоров в атмосфере Земли оценивается миллионами штук в сутки, но при сгорании не все они оставляют следы, которые возможно использовать для передачи данных на УКВ. Некоторые метеоры после сгорания оставляют ионизированные следы длиной порядка 20 км, которые существуют от нескольких секунд до нескольких минут. Эти следы способны отражать сигналы УКВ и их можно использовать для связи между корреспондентами на расстоянии до 2000 км. В условиях Севера на частотах 40–60 МГц средняя длительность контакта от одного метеорного следа составляет от 0,2 до 200 с, которая изменяется в течение времени (на протяжении суток, времени года и др.) [4–8].

Так как данный канал связи является прерывным по своей природе, то для его оценки вводится такой параметр, как коэффициент использования линии для передачи данных:

$$K_{и} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ci}}{t_{н}}, \quad (1)$$

где t_{ci} – длительность i -го прохождения сигнала, измеренная на уровне порогового напряжения $U_{пор}$; $t_{н}$ – время наблюдения.

Коэффициент $K_{и}$ зависит от длины волны, мощности передатчика, коэффициента усиления антенны и направления главного лепестка ее диаграммы направленности (ДН), величины $U_{пор}$, определяемой заданным отношением сигнал/помеха ($U_c/U_{п}$) на входе РПУ, а также от числа и частоты появления в ионосфере метеорных следов (рисунок 2). Изменения числа и направления движения метеоров в течение суток и времени года приводит к значительным колебаниям величины $K_{и}$. В большинстве случаев среднюю величину $K_{и}$ можно считать приблизительно равной 0,05–0,1.

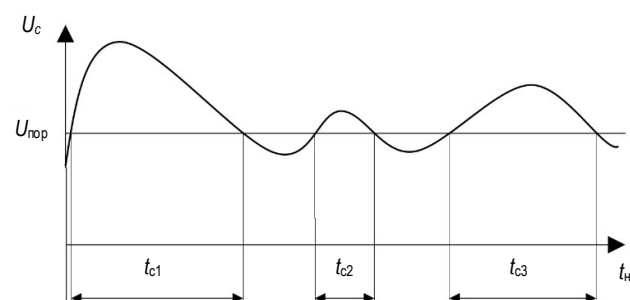


Рис. 2. Временная диаграмма функционирования РМС, характеризующая коэффициент использования пропускной способности $K_{и}$ (для примера, на рисунке отображены три энергетических контакта между корреспондентами)

Как видно из рисунка 2, система способна функционировать лишь при относительно сильном сигнале, где отношение $U_c/U_{п}$ превышает пороговое значение.

В РМС в дежурном режиме (режим поиска контакта для связи) используются немодулированные

гармонические колебания. Для увеличения пропускной способности канала передачи данных рекомендуется применить такие методы многопозиционной модуляции, как BPSK, QPSK или QAM, позволяющие увеличить количество кодируемых в единицу времени бит, при этом существенно повысить помехоустойчивость их передачи по каналу РМС [10]. Минимальная мощность принимаемого сигнала на входе РПУ равна [9]:

$$P_{\text{РПУmin}} = AP_{\text{РПДУ}}G^2\lambda^2N_0^2, \quad (2)$$

где A – коэффициент пропорциональности; $P_{\text{РПДУ}}$ – мощность радиопередающего устройства; λ – длина волны; N_0 – электронная плотность метеорного следа, позволяющая получить уровень сигнала, превышающий пороговый.

Из (2) видно, что при повышении N_0 имеет место регистрация отражений от более плотных (насыщенных) следов, при этом радиолиния использует относительно сильные сигналы.

При постоянном пороговом уровне приема $U_{\text{пор}}$ с возрастанием коэффициента усиления антенны G аппаратура регистрирует сигналы, отраженные также и от менее плотных метеорных следов, что, в свою очередь, непременно повышает чувствительность приемной аппаратуры. Исходя из этого, предлагается один из способов повышения эффективности РМС – выбор направления ориентации ДН и корректировка коэффициента усиления приемной ААР, когда используются наиболее насыщенные метеорные следы, вследствие чего увеличиваются амплитуды сигналов U_{ci} и, соответственно, интервалы t_{ci} (см. рисунок 2), что непременно обеспечивает повышение значения коэффициента $K_{\text{и}}$ (1).

Большой научный интерес представляет вопрос, в какую точку небесного пространства должны быть направлены передающая и приемная антенны. Теоретический анализ показывает, что наилучшие результаты достигаются при некотором отклонении ДН обеих антенн в сторону от направления основной трассы. При этом оптимальный угол ориентации антенн зависит как от времени суток, так и от географического положения линии. Эти отклонения достигают 30° ; отсюда ширина диаграммы направленности должна быть порядка $50\text{--}60^\circ$. Возможна также работа с узконаправленными антеннами. В последнем случае направление главного лепестка должно изменяться в течение суток в соответствии со смещением области с наибольшим числом полезных отражений. Для этой цели предлагается применить особый класс антенн – ААР [11], которые позволяют автоматически подстраивать ширину и направление главного лепестка ДН в соответствии с заданным алгоритмом синхронизации антенн. На линиях метеорной связи наблюдается многолучевое распространение радиоволн, обусловленное существованием нескольких следов, разрывом следа

на части и его сильным искривлением под действием сильных атмосферных потоков, а также отражением от регулярных слоев ионосферы. Полоса пропускания метеорного канала может достигать $5\text{--}6$ МГц, однако на практике из-за многолучевости полоса пропускания радиотракта ограничивается, и, как правило, не превышает 300 кГц. К тому же, увеличение полосы пропускания метеорного тракта требует значительного увеличения мощности передатчика.

В целом, при мощности передатчика 5 кВт и усилении антенн 10 дБ можно получить статистически устойчивую связь на расстоянии до 2000 км.

Идея адаптации ДН ААР состоит в том, что поиск контакта с корреспондентом осуществляется на широкой ДН (порядка $50\text{--}60^\circ$), а после вхождения в связь осуществляется автоматическое ее сужение с целью снижения возможного уровня посторонних помех на приеме. Это позволит адаптивно повышать как достоверность приема дискретных сигналов, так и скорость передачи данных в течение времени короткого контакта с корреспондентом. Таким образом, не затрагивая другие элементы РМС (РПДУ, РПУ и др.), предлагается повышать коэффициент использования энергетического ресурса РМС за счет более полного использования потенциальных возможностей физической среды, в которой функционирует РМС.

По определению ААР – многоэлементная антенна, в которой амплитуды и фазы передаваемых (принимаемых) сигналов автоматически регулируются и устанавливаются по требуемому закону. В них используется система из N линейно-разнесенных антенных элементов-излучателей (рисунок 3), а также процессор цифровой обработки сигналов, работающий в режиме реального времени. Данный процессор управляет формированием пространственных характеристик антенной системы.

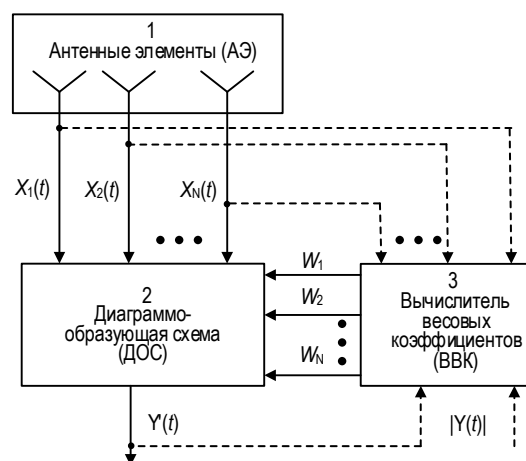


Рис. 3. Структурная схема ААР

В приемной части указанной выше антенной системы сигналы, поступающие от каждого i -го элемента решетки, подвергаются демодуляции и вы-

делению синфазных и квадратурных составляющих. Полученные сигналы перемножаются на весовые коэффициенты (ВК), а затем суммируются, формируя выходной сигнал. Выбор соответствующего набора ВК позволяет сформировать пространственную характеристику ААР так, чтобы максимизировать мощность принимаемого сигнала от передающей станции.

Процесс адаптации зависит от многих факторов: принципа построения адаптивной антенны, типа антенных элементов, типа процессора, используемых алгоритмов адаптации и т. д.

ААР в составе РМС выполняет следующие функции:

- переключается на луч w_k с наилучшим соотношением U_c/U_n ;
- обнаруживает луч с сигналом, уровень которого значительно ниже уровня шумов;
- определяет направление на источник сигнала с наилучшим соотношением U_c/U_n ;
- создает узкую ДН в направлении источника сигнала с наилучшим соотношением U_c/U_n ;
- выполняет корректировку уровня боковых лепестков.

В свою очередь, она обладает двумя основными свойствами: во-первых, способностью формировать многолучевую ДН, что дает возможность обеспечить пространственный обзор, а во-вторых, – способностью функционировать в адаптивном режиме, при котором ААР адаптируется к изменению соотношения U_c/U_n .

В многолучевых ААР (рисунок 4) каждому сигналу, соответствующему отдельному лучу ДН, присваивается вес [11]. При этом амплитудная ДН многолучевой ААР определяется следующим выражением:

$$sF(u) = \sum_{k=1}^K w_k F_k, \quad (3)$$

где w_k – весовой коэффициент в канале адаптации k -го луча; $F_k(u)$ – ДН, соответствующая k -му лучу.

В целом ААР в составе РМС решает следующие задачи:

- определяет направления поступления сигналов от каждого k -го источника и их количество K ;
- идентифицирует полезные сигналы и помехи;
- формирует узкие ДН в направлении полезных источников и минимальные уровни боковых лепестков в направлении источников помех;
- производит формирование пространственно-временной области.

В качестве обобщенной математической модели рассмотрим общий случай функционирования РМС, в которой одновременно присутствуют отражения от нескольких следов метеоров разной плотности, и, соответственно, образуются несколько трасс r_j ($j = \overline{1, k}$).

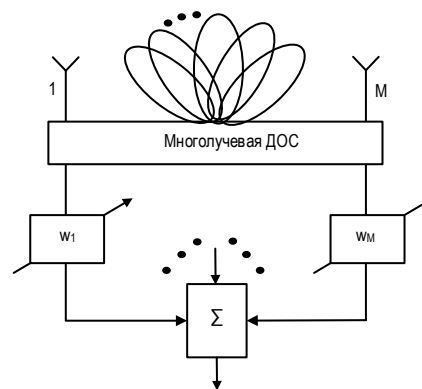


Рис. 4. Структурная схема многолучевой ААР

Процесс передачи сообщений в такой системе описывается системой операторных уравнений (помехи в канале в данном случае не учитываются):

$$s(\lambda, t) = A[\lambda, s(t)], \quad (4)$$

$$s(\lambda, r, t) = Bs(\lambda, t), \quad (5)$$

$$e_j(\lambda, r_j, t) = C_j s(\lambda, r, t), \quad (j = \overline{1, k}), \quad (6)$$

$$e_\Sigma(\lambda, t) = \sum_{j=1}^k D_j e_j(\lambda, r_j, t), \quad (j = \overline{1, k}), \quad (7)$$

$$\lambda = E e_\Sigma(\lambda, t). \quad (8)$$

Структурно-функциональная схема тракта, реализующая систему (4–8), представлена на рисунке 5, где: A, A_i ($i = \overline{1, N}$) – устройства преобразования сообщений в каналах, несущих полезную информацию; B – ДН передающей антенны; C_j ($j = \overline{1, k}$) – физическая среда (метеорный след, обеспечивающий отражение сигналов на УКВ); D_j ($j = \overline{1, k}$) – j -ая ДН многолучевой приемной ААР УКВ-диапазона; E – входное устройство приемника, содержащее узкополосную фильтрующую цепь, демодулятор и низкочастотное фильтрующее звено; λ – передаваемое сообщение в основном канале; $s(t)$ – переносчик информации.

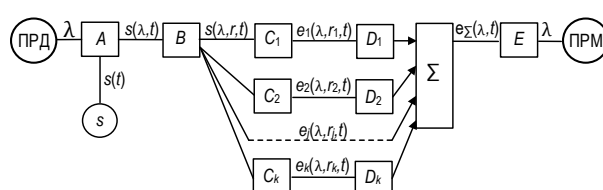


Рис. 5. Структурно-функциональная схема канала РМС с использованием приемной многолучевой ААР УКВ-диапазона

Так как в (7) учитывается лишь свойство направленности приемной антенной системы, то комплексную ДН можно описать выражением:

$$D(r_j) = kD(\alpha_{n1}, \alpha_{n2}) e^{i\psi_D(\alpha_{n1}, \alpha_{n2})}, \quad (9)$$

где $D(\alpha_{n1}, \alpha_{n2})$ – амплитудная ДН; $\psi_D(\alpha_{n1}, \alpha_{n2})$ – фазовая ДН; $(\alpha_{n1}, \alpha_{n2})$ – угловые координаты полезного отраженного сигнала, несущего сообщение λ в

вертикальной и горизонтальной плоскостях соответственно, наблюдаемого по j -му каналу в трехмерной системе пространственной системе (x, y, z) ; k – нормирующий коэффициент.

В соответствии с операторным уравнением (7) и соотношением (9) на выходе антенной системы получим:

$$e_{\Sigma}(\lambda, t) = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{j=1}^K A_j(\lambda, r_j, t) D_j(\alpha_{n1}, \alpha_{n2}) e^{i\omega_c t} \right\}, \quad (10)$$

где A_j – комплексная огибающая электрической составляющей поля в раскрыве антенной системы.

С выхода антенной системы сигнал преобразуется оператором E , и в итоге получаем решение (оценку) $\tilde{\lambda}$, воспроизводящее переданное сообщение с определенной достоверностью. В общем случае эта оценка определяется следующим операторным уравнением, полученным из системы (4–8):

$$\tilde{\lambda} = E \left\{ \sum_{j=1}^K D_j C_j B A[\lambda, s(t)] \right\}. \quad (11)$$

Большая часть энергии, излучаемой передающей антенной, расходуется в пространстве крайне

нерационально, поскольку в данный момент приемная антенна ориентирована строго в определенном направлении. Имея предположение, что сигнал посылался бы только в направлении наилучшего его отражения, то это позволило бы значительно повысить эффективность связи в энергетическом плане. Это может быть отмечено возрастанием соотношения сигнал/помеха при передаче данных между корреспондентами, и, соответственно, способствует увеличению K_n .

Вывод

Проведенные исследования показали, что повышение коэффициента использования линии K_n с целью увеличения пропускной способности РМС может быть достигнуто путем использования на приемной стороне ААР УКВ-диапазона.

Дальнейшие исследования необходимо проводить в направлении совершенствования технических характеристик ААР, учитывая возможности их применения в арктическом регионе РФ с учетом специфики распространения УКВ-сигнала, отраженного от метеорных следов.

Список используемых источников

1. Дорошенко В.И., Стратонова О.Н., Пивоварова А.К. Метеорная связь в районах Крайнего Севера России // Материалы IV Межвузовской научно-практической конференции аспирантов, студентов и курсантов «Современные тенденции и перспективы развития водного транспорта России» (Санкт-Петербург, Россия, 14 мая 2015 года). СПб.: ГУМРФ, 2015. С. 31–33.
2. Капралов Д.Д., Кирик Д.И. Стохастическая модель метеорного радиоканала // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4. № 3. С. 54–64. DOI:10.31854/1813-324X-2018-4-3-54-64
3. Дорошенко В.И., Ксенофонтов Ю.Г. Применение метеорной связи в системах обеспечения безопасности объектов инфраструктуры Северного морского пути // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2019. № 1-2(127-128). С. 3–11.
4. Титков С.Б. Технические предложения по использованию метеорной связи // Защита информации. Инсайд. 2006. № 3(9). С. 74–80.
5. Рябов И.В., Толмачев С.В., Лебедева А.А. Принципы программно-определяемых радиосистем и их применение в рамках задачи исследования метеорной радиосвязи // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7-1. С. 59–66.
6. Стругов Ю.Ф., Семенов А.М., Добровольский С.М., Батырев И.А. Стохастическое моделирование каналов с аддитивными и мультипликативными помехами. Схема реализации // Математические структуры и моделирование. 2015. № 2(34). С. 48–63.
7. Качнов А.И., Пенкин А.А., Рыбаков А.В. Разработка мобильной системы информационного обеспечения с использованием каналов метеорной связи // V Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Россия, 10–11 марта 2016). Сборник научных статей. СПб.: СПбГУТ, 2016. С. 177–181.
8. Благоев Д.С., Волвенко С.В. Повышение скорости передачи информации в метеорных системах связи путем использования сигналов переменной длительности // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 5(108). С. 7–13.
9. Белокопытов А.Е. Выбор эффективного вида цифровой модуляции в системах радиосвязи по критериям эффективности // Научный альманах. 2015. № 11-3(13). С. 35–38. DOI:10.17117/na.2015.11.03.035
10. Рябов И.В., Толмачев С.В., Лебедева А.А. Аппаратно-программный комплекс для обнаружения метеорных следов с изменяемой полосой пропускания // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 4(24). С. 66–75.
11. Петров В.П. Алгоритмы оценки пространственного спектра в адаптивных цифровых антенных решетках // Вестник СибГУТИ. 2014. № 4. С. 60–70.

* * *

RADIOCHANNELS OF METEOR-BURST COMMUNICATION NETWORK OF THE NORTHERN SEA ROUTE

S. Voronin¹, V. Doroshenko², Y. Ksenofontov²

¹Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia,
St. Petersburg, 196105, Russian Federation

²State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, 198035, Russian Federation

Article info

The article was received 09 June 2019

For citation: Voronin S., Doroshenko V., Ksenofontov Y. Radiochannels of Meteor-Burst Communication Network of the Northern Sea Route. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2019;5(3):13–18. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-3-13-18>

Abstract: *The aim of this article is to justify the usefulness of meteor communication network usage as a telecommunication basis on the access connectivity network for Vessel traffic management on their way to the Arctic Russian infrastructure in the coastal zone of the northern sea route. It represent us the main options, from the point of view of system analysis, which characterise the telecommunication technologies of meteor connection, structural-functional scheme, generalized mathematical model of the network consisting of the radiotransmitter and receiver including antenna systems. It is represented the usage of adaptive antenna grids as UHF antenna systems.*

Keywords: *radioline meteor communication, structural and functional scheme, adaptive antenna grids, coefficient of using radio channel transmitting capability, multi ray distribution.*

References

1. Doroshenko V.I., Stratonova O.N., Pivovarova A.K. Meteornaia sviaz v raionakh Krainego Severa Rossii [Meteor Communication in the Far North of Russia]. *Materialy IV Mezhdvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov studentov i kursantov "Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiia vodnogo transporta Rossii", 14 May 2015, St. Peterburg, Rossia* [Proceedings of the IV Interuniversity Scientific-Practical Conference of Graduate Students, Students and Cadets "Current Trends and Prospects for the Development of Water Transport in Russia", 14 May 2015, St. Petersburg, Russia]. St. Petersburg: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping Publ.; 2015. p.31–33. (in Russ.)
2. Kapralov D., Kirik D. Stochastic Model of Meteor-Burst Radio Channel. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2018;4(3):54–64. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2018-4-3-54-64>
3. Doroshenko V.I., Ksenofontov Y.G. Application of Meteor Communication in the Security Systems of the Northern Sea Route Infrastructure Objects. *Military Enginery. Scientific and Technical Journal. Counter-terrorism technical devices. Issue 16*. 2019;1-2(127-128):3–11. (in Russ.)
4. Titkov S.B. Tekhnicheskie predlozheniia po ispolzovaniuu meteornoj sviazi [Technical Proposals for the Use of Meteor Communication]. *Zašita informacii. Inside*. 2006;3(9):74–80. (in Russ.)
5. Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Lebedeva A.A. Principles of Software-Based Radiosystems and its Application within the Framework of Meteor-Burst Communication Investigation. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016;7-1:59–66. (in Russ.)
6. Strugov I.F., Semenov A.M., Dobrovolskii S.M., Batyrev I.A. Stokhasticheskoe modelirovanie kanalov s additivnymi i multiplikativnymi pomekhami. Skhema realizatsii [Stochastic modeling of channels with additive and multiplicative noise. Implementation scheme]. *Mathematical Structures and Modeling*. 2015;2(34):48–63. (in Russ.)
7. Kachnov A., Penkin A.A., Rybakov A. The Development of Mobile Information Provision Systems Using Meteor Communication Channels. *Proceedings of the Vth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 1–11 March 2016, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2016. p.177–181. (in Russ.)
8. Blagov D.S., Volvenko S.V. Increase of speed of information transfer in meteor-burst communication systems by use of signals of variable duration. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems*. 2010;5(108):7–13. (in Russ.)
9. Belokopytov A.E. The choice of an effective form of digital modulation in the radio communication systems according to the criteria of efficiency. *Science Almanac*. 2015;11-3(13):35–38. (in Russ.) Available from: <https://doi.org/10.17117/na.2015.11.03.035>
10. Ryabov I.V., Tolmachev S.V., Lebedeva A.A. Hardware and software package for meteor trails detection having variable bandwidth. *RTS Journal*. 2016;4(24):66–75. (in Russ.)
11. Petrov V.P. Spatial spectrum analysis algorithms in adaptive digital arrays. *Vestnik SibGUTI*. 2014;4:60–70. (in Russ.)