

А.Д. Скорик

АЛГОРИТМ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ И ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАЧИ В ДКМ-КАНАЛЕ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ГНСС-МОНИТОРИНГА

Актуальность. Современные требования к автоматизированным системам управления (АСУ) специального назначения и достижения в области техники связи возрождают интерес к декаметровому (ДКМ) диапазону как к перспективному средству управления робототехническими комплексами (РТК) различного базирования, прежде всего морскими и воздушными. Существующие алгоритмы адаптации ДКМ-систем, регламентированные национальными и международными стандартами являются реактивными и не учитывают частотную зависимость параметров ионосферы, что ограничивает их эффективность для решения задач надежного управления РТК. **Цель работы** – разработка алгоритма выбора оптимальной рабочей частоты и параметров передачи (полоса, скорость, мощность, глубина перемежения) на основе прогнозирования частотно-зависимых характеристик диффузного ДКМ-канала по данным пассивного ГНСС-мониторинга. **Методы.** Используются структурно-многолучевая модель для интервалов корреляции, методики ITU-R для среднего отношения сигнал/помеха, аналитические выражения для параметра Накагами и допустимого отношения сигнал/помеха с учётом разнесённого приёма. **Результаты.** Разработан алгоритм, включающий оценку параметров ионосферы по результатам ГНСС-мониторинга, расчёт частотно-зависимых характеристик канала и выбор оптимального режима работы, максимизирующего энергетический запас и надёжность связи. Численное моделирование для типовой трассы подтвердило его работоспособность. **Выводы.** Предложенный алгоритм обеспечивает упреждающий выбор параметров связи с учётом реального состояния ионосферы, повышая надёжность и скорость передачи, что критически важно для задач управления РТК. Он является шагом к созданию когнитивных КВ-систем.

Декаметровая связь; робототехнические комплексы; оптимальная рабочая частота; прогнозирование; ионосфера; ГНСС; параметр Накагами; когнитивное радио.

A.D. Skorik

ALGORITHM FOR SELECTING THE OPTIMAL OPERATING FREQUENCY AND TRANSMISSION PARAMETERS IN THE HF CHANNEL BASED ON PREDICTION USING GNSS MONITORING DATA

Relevance. Modern requirements for specialized automated control systems and advances in communication technology are reviving interest in the HF band as a promising means of controlling ground, sea, and air-based robotic complexes (RCs). Existing adaptation algorithms for HF communication systems, by national and international standards are reactive and do not take into account the frequency dependence of ionospheric parameters, which limits their effectiveness for reliable RC control. **Objective.** To develop an algorithm for selecting the optimal operating frequency and transmission parameters (bandwidth, data rate, power, interleaving depth) based on prediction of frequency-dependent characteristics of a diffuse HF channel using passive GNSS monitoring data. **Methods.** A structural multipath model for correlation intervals, the ITU-R method for the mean signal-to-interference ratio, and analytical expressions for the Nakagami parameter and the permissible signal-to-interference ratio taking into account diversity reception are used. **Results.** An algorithm has been developed that includes estimating ionospheric parameters from GNSS data, calculating the frequency-dependent characteristics of the channel, and selecting the optimal operating mode that maximizes the energy margin and communication reliability. Numerical simulation for a typical path confirmed its efficiency. **Conclusions.** The proposed algorithm provides proactive selection of communication parameters taking into account the real state of the ionosphere, increasing reliability and data rate, which is critically important for RC control tasks. It is a step towards the creation of cognitive HF systems.

HF communication; robotic complexes; optimal operating frequency; prediction; ionosphere; GNSS; Nakagami parameter; cognitive radio.

Введение. В последние годы наблюдается устойчивый рост требований к автоматизированным системам управления (АСУ) специального назначения, связанный с необходимостью обеспечения надежного и устойчивого канала связи с подвижными объектами [1, 2], действующими в условиях отсутствия или подавления спутниковых систем связи. Особую актуальность эта проблема приобретает для управления робототехническими комплексами (РТК) различного базирования – наземными, морскими и воздушными. Для морских и воздушных РТК, действующих на значительном удалении от пунктов управления, традиционные средства связи УКВ-диапазона оказываются неэффективными из-за ограниченной дальности прямой видимости, а спутниковые каналы – недоступными в силу различных факторов (высокая эксплуатационная стоимость и стоимость терминала, ограниченность применения, например, из-за низких углов закрытия и пр.)

В этом контексте декаметровый (ДКМ) диапазон (3–30 МГц), обладающий уникальным свойством сверхдальнего распространения радиоволн за счет отражения от ионосферы, вновь привлекает внимание разработчиков. Современные достижения в области цифровой обработки сигналов, помехоустойчивого кодирования и адаптивных алгоритмов позволяют преодолеть традиционные недостатки ДКМ-канала – его нестационарность и подверженность многолучевым замираниям. Это открывает перспективы использования КВ-каналов не только как резервных, но и как основных для передачи команд телеуправления, телеметрии и даже потокового видео с борта РТК в реальном времени.

Важно отметить, что техническая база для практической реализации таких решений уже существует. Разработаны и серийно выпускаются относительно компактные КВ-радиосредства с малыми массогабаритными характеристиками, пригодные для установки на различные типы РТК. В качестве возможного примера можно привести авиационную бортовую радиостанцию «Прима-КВ» (диапазон частот 2–30 МГц, масса передатчика не более 13 кг), которая поддерживает современные режимы адаптивной связи ALE и стандарты передачи данных, включая STANAG 4538 и MIL-STD-188-110B [3]. Наличие таких аппаратных средств в сочетании с предложенным алгоритмом когнитивного управления позволяет рассчитывать на практическую реализацию высоконадежных каналов управления РТК в ДКМ-диапазоне.

Однако существующие алгоритмы адаптации ДКМ-систем, регламентированные действующими стандартами [4–6], являются преимущественно реактивными: они изменяют параметры передачи (частоту, мощность, скорость) только после обнаружения факта ухудшения качества связи, что может приводить к потере управления или задержкам. Ключевой недостаток таких алгоритмов – отсутствие в контуре управления физической модели среды распространения, позволяющей прогнозировать состояние канала и его частотно-зависимые характеристики на основе независимых данных.

Целью настоящей работы является разработка и обоснование алгоритма, упреждающего (когнитивного) выбора оптимальной рабочей частоты и параметров передачи в ДКМ-канале, ориентированного на задачи управления РТК. Алгоритм основан на прогнозировании частотно-зависимых характеристик диффузной ионосферы по данным пассивного ГНСС-мониторинга.

1. Формальная постановка задачи. Рассматривается одномодовый ДКМ-канал связи, образованный однократным отражением волны от слоя F ионосферы. Канал характеризуется диффузной многолучевостью, вызванной рассеянием радиоволн на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации с интенсивностью β_n и поперечным масштабом l_s [7, 8]. В районе трассы функционирует двухчастотный ГНСС-приёмник, обеспечивающий непрерывное измерение:

- ♦ наклонного полного электронного содержания (ПЭС) $I = \int N \, dl$;
- ♦ дисперсии флуктуаций фазы $\sigma_{\phi, GPS}^2$ (или индекса сцинтилляций S_4);
- ♦ скорости дрейфа неоднородностей $V_{др}$ (по доплеровским измерениям).

Цель работы – разработать алгоритм, который для текущего состояния ионосферы позволяет решить следующие подзадачи:

1. По данным ГНСС восстановить ключевые параметры ионосферы: β_n , l_s , критическую частоту $f_{кр}$, максимально применимую частоту (МПЧ) f_m и наименьшую применимую частоту (НПЧ).

2. Для всего диапазона рабочих частот f_0 от НПЧ до МПЧ вычислить прогнозируемые значения:

- ♦ СКО фазовых флуктуаций $\sigma_\varphi(f_0)$ с учётом масштабирования по частоте [7];
- ♦ параметр Накагами $m(f_0)$ по формуле, связывающей его с $\sigma_\varphi^2(f_0)$ [10];
- ♦ интервала частотной корреляции (полосы когерентности) $\Delta F_k(f_0)$ [7];
- ♦ интервала пространственной корреляции $\Delta \rho_k(f_0)$ [9];
- ♦ интервала временной корреляции $\Delta t_k(f_0) = \Delta \rho_k(f_0)/V_{др}$;
- ♦ среднего отношения сигнал/помеха $\bar{Z}(f_0)$ согласно рекомендаций ITU-R [11, 12];
- ♦ допустимого отношения сигнал/помеха $Z_{доп}(f_0, n)$ для заданной вероятности ошибки и числа ветвей разнесения n [13].

3. Определить частоту $f_0^{opt(n)}$, максимизирующую энергетический запас

$$\Delta Z(f_0, n) = \bar{Z}(f_0) - Z_{доп}(f_0, n).$$

4. Для найденной оптимальной частоты выбрать сигнально-кодую конструкцию (СКК) с максимальной скоростью, удовлетворяющую условию $\Delta F_c \leq \Delta F_k(f_0^{opt})$, также при необходимости обосновать разнос антенн для пространственного разнесения по приему ($\Delta r \geq \Delta \rho_k(f_0^{opt})$).

5. Определить требуемый запас мощности и установить глубину перемерения $Tил \geq 5\Delta t_k(f_0^{opt})$ для борьбы с временными замираниями.

Таким образом, в результате выполнения алгоритма будут определены все параметры, необходимые для адаптации к текущим условиям распространения: рабочая частота, полоса сигнала, глубина перемерения, а также обоснована возможность использования пространственного разнесения и необходимый энергетический запас по мощности.

2. Анализ существующих алгоритмов адаптации. Действующие алгоритмы адаптации ДКМ-радионаправлений, как отечественные [4], так и зарубежные [5, 6], построены по реактивной схеме. Они включают этапы мониторинга (активное зондирование или пассивный анализ), ранжирования частот, установления связи и адаптации в сеансе при превышении порога ошибок. Основные этапы и их отличия от предлагаемого прогностического подхода (ГНСС + модель) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение этапов существующего и предлагаемого алгоритмов

Этап работы алгоритма адаптации	Алгоритм адаптации	
	По ГОСТ Р 55711-2013 [4]	Предлагаемый прогностический подход
1. Мониторинг среды	Активное зондирование тестовыми посылками, оценка $K_{ош}$	Пассивное определение $\beta_{и}, l_s, f_{кр}, V_{др}$ по данным ГНСС-мониторинга
2. Экстраполяция/прогноз	Отсутствует, работа «по факту»	Расчёт частотно зависимых $\sigma_\varphi^2(f_0), m(f_0), \Delta F_k(f_0), \bar{Z}(f_0), Z_{доп}(f_0, n)$ для всего интервала частот (от НПЧ до МПЧ)
3. Выбор частоты	Ранжирование по результатам зондирования	Поиск $f_0^{opt(n)}$ максимизирующую $\Delta Z(f_0, n)$
4. Выбор СКК	Жёсткая иерархия (снижение скорости, смена частоты)	Фильтр по полосе $\Delta F_c \leq \Delta F_k(f_0^{opt})$
5. Настройка интерливера	Фиксированная структура кадра	Выбор глубины: $Tил \geq 5\Delta t_k$ [13, 14]
6. Расчёт запаса	Фиксированные пороги по мощности	Динамический запас $Z_{доп}(f_0^{opt}, n)$
7. Реконфигурация	Через разрыв сеанса (квитанции)	Упреждающая смена параметров

Принципиальное ограничение существующих стандартов – отсутствие в контуре адаптации физической модели среды, связывающей параметры ионосферы с корреляционными характеристиками канала. Это не позволяет системе адаптироваться к быстрым изменениям диффузной многолучевости, что критически важно для высоких требований по надежности, предъявляемых системами управления РТК.

3. Предложения по реализации (Физическая модель и алгоритм). 3.1. Восстановление параметров ионосферы по данным ГНСС. По измеренному ПЭС и известной геометрии «спутник – приёмник» с использованием модели IRI [15] восстанавливаются критическая частота $f_{кр}$ и высота максимума h_m слоя F. Для заданной дальности связи R рассчитываются угол падения волны на ионосферу θ_0 и эквивалентный путь в ионосфере $S's(d)$ [16].

Ключевым этапом является оценка интенсивности мелкомасштабных неоднородностей β_i . Используя данные ГНСС ($\sigma_{\phi, GPS}^2(f_{GPS}) f_{GPS} \approx 1575$ МГц) и соотношения структурно-многолучевой модели [7], интенсивность неоднородностей может быть выражена через СКО флуктуаций электронной концентрации $\sigma_{\Delta N}(h)$ [17]:

$$\beta_i = \frac{\sigma_{\Delta N}(h)}{\bar{N}(h)}, \quad (1)$$

3.2. Прогнозирование частотно-зависимых характеристик ДКМ-канала. На основе восстановленных параметров для всего диапазона рабочих частот f_0 от НПЧ до МПЧ (с шагом Δf) вычисляются следующие функции.

Среднеквадратическое отклонение флуктуаций фазы на выходе ионосферы [7, 9]:

$$\sigma_{\phi}(f_0) = \pi \beta_i f_0 \sqrt{2L_0 L_3} / c K_s^2 \sec^2 \varphi_0, \quad (2)$$

где L_3 – эквивалентный однородный путь распространения волны в отражающем слое F ионосферы [м], который соответствует длине воображаемой криволинейной траектории распространения волны в «трубке» от входа до выхода отражающего слоя F ионосферы с неизменной (однородной) по высоте (h) средней электронной концентрацией $\bar{N}(h) = const$, соответствующей ее наибольшему значению на высоте $h=h_{от}$ отражения волны $\bar{N}(h_{от})$ [м⁻³], l_0 – наибольший масштаб неоднородностей, K_s – коэффициент сферичности Земли и ионосферы, φ_0 – угол падения волны на ионосферу, c – скорость света.

Интервал частотной корреляции (полоса когерентности) [7, 18]:

$$\Delta F_k(f_0) = \frac{f_0}{\sigma_{\phi}(f_0) \sqrt{2+d_1^2(f_0)}}, \quad (3)$$

где d_1 – дифракционный коэффициент, характеризующийся частотой и геометрией трассы [7, 18]. Полоса сигнала ΔF_c выбираемой СКК должна удовлетворять условию $\Delta F_c \leq \Delta F_k(f_0)$ для исключения частотно-селективных замираний.

Интервал пространственной корреляции [7, 9]:

В общем случае он зависит от $\sigma_{\phi}^2(f_0)$ и l_s . Уточнённое выражение, полученное в [9], имеет вид:

$$\Delta \rho_k(f_0) = l_s * \Phi(\sigma_{\phi}(f_0)), \quad (4)$$

где функция $\Phi(\sigma_{\phi}(f_0))$ определяется численно из условия $K_n(\Delta \rho_k) = e^{-1}$ для корреляционной функции [17]. Для инженерных расчётов можно использовать аппроксимацию:

$$\Phi(\sigma_{\phi}(f_0)) = \begin{cases} 1, & \sigma_{\phi}(f_0) \leq 1 \\ 1 - 0,8(\sigma_{\phi} - 1), & 1 < \sigma_{\phi} \leq 1,25 \\ 1/\sigma_{\phi}(f_0), & \sigma_{\phi}(f_0) > 1,25 \end{cases}.$$

Для обеспечения независимости ветвей разнесённого приёма необходимо выполнение условия разнесения по приему $\Delta r \geq \Delta \rho_k(f_0)$, где Δr – разнос антенн.

Интервал временной корреляции на основе гипотезы Тейлора о «замороженной» турбулентности [9, 19, 20]:

$$\Delta t_k(f_0) = \frac{\Delta \rho_k(f_0)}{V_{др}}. \quad (5)$$

Глубина перемежения выбирается из условия [14]

$$T_{ил} \geq 5\Delta t_k(f_0). \quad (6)$$

Параметр Накагами, характеризующий глубину замираний [10]:

$$m(f_0) = \frac{1}{1 - e^{-2\sigma_\phi^2(f_0)}}. \quad (7)$$

При $\sigma_\phi^2 \rightarrow 0$ (регулярный канал) $m \rightarrow \infty$; при $\sigma_\phi^2 \rightarrow \infty$ (рэлеевский канал) $m \rightarrow 1$.

Среднее отношение сигнал/помеха $\bar{Z}(f_0)$ определяется разностью медианных уровней сигнала и помех [11, 12]

$$\bar{Z}(f_0) = \bar{E}_c(f_0) - \bar{E}_n(f_0) \text{ (дБ)}. \quad (8)$$

Допустимое отношение сигнал/помеха для обеспечения заданной вероятности ошибки $P_{ош, доп}$ с учётом разнесённого приёма (n ветвей) [13]:

$$Z_{доп}(f_{0,n}) = 10 \lg \left[2m(f_0)(2P_{ош, доп})^{-1/(nm(f_0))} - 1 \right]. \quad (9)$$

3.3. Выбор оптимального режима работы. Для каждой частоты f_0 вычисляется энергетический запас

$$\Delta Z(f_0, n) = \bar{Z}_{f_0} - Z_{доп}(f_0, n). \quad (10)$$

Оптимальной считается частота $f_0^{opt}(n)$, на которой этот запас максимален. Соответствующая надёжность связи оценивается как

$$D_{св}(f_{0,n}) = F \left[\frac{\Delta Z(f_0, n)}{\sigma_z} \right], \quad (11)$$

где $F(\cdot)$ – функция Лапласа, $\sigma_z \approx 14$ дБ – среднеквадратическое отклонение превышения С/П [13].

Алгоритм реализует иерархию: выбор частоты $\rightarrow$ выбор СКК по условию $\Delta F_c \leq \Delta F_k \rightarrow$ определение глубины перемежения $T_{ил} \rightarrow$ обоснование разнесения $\Delta r \geq \Delta r_k \rightarrow$ корректировка мощности.

Предложенная иерархия полностью обоснована физическими зависимостями: частота первична, затем следуют параметры сигнала, адаптируемые под полосу когерентности, затем временная и пространственная корреляция, и наконец энергетика.

Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 1.

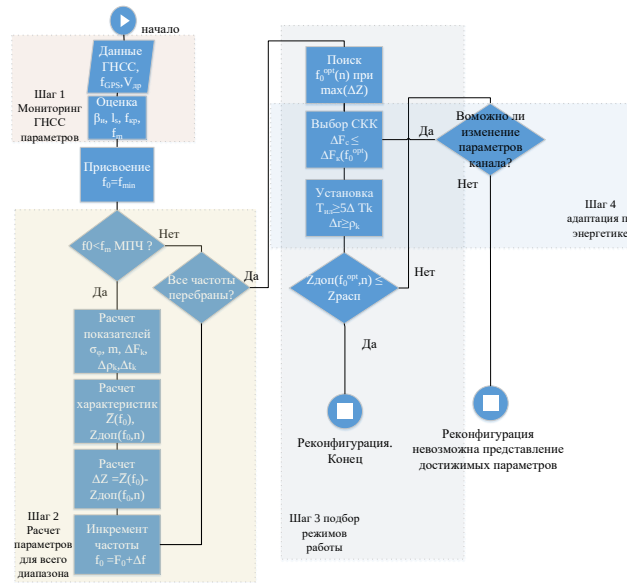


Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора оптимальных параметров передачи

4. Результаты численного моделирования и их обсуждение. Для верификации предложенного подхода проведено численное моделирование для типовой среднеширотной радиолинии протяжённостью $R = 2000$ км в дневных условиях. Исходные данные (по [7, 13]): $f_{кр} = 7$ МГц, $f_m = 12,1$ МГц, $h_0 = 250$ км, $l_s = 200$ м, $K_s = 1,1$, $V_{др} = 100$ м/с, $P_{ош, доп} = 3 \cdot 10^{-3}$, $\sigma_z = 14$ дБ. Рассматривались два уровня диффузности ионосферы: слабая ($\beta_n = 10^{-3}$) и сильная ($\beta_n = 10^{-1}$).

Значения $\sigma_{\phi, GPS}$ для этих уровней выбирались из условия, что на частоте $f_0 = 10$ МГц СКО флуктуации фазы составляют 0,5 рад (слабая диффузность) и 3,0 рад (сильная диффузность). На основе этих данных по формулам (2)-(11) рассчитаны соответствующие параметры. В табл. 2 и 4 приведены зависимости основных параметров канала от частоты для слабой и сильной диффузностей соответственно. В табл. 3 и 5 представлены энергетический запас и надёжность связи с учетом организации разнесенного приема. Сводные результаты на оптимальных частотах представлены в табл. 6.

Таблица 2

Расчётные значения параметров канала для случая $\beta_n = 10^{-3}$ (слабая диффузность)

f_0 , МГц	σ_{ϕ}	m	ΔF_k , кГц	$\bar{Z}$, дБ	$\Delta \rho_k$, м	Δt_k , с	$T_{ил}$, с
2	0,1	50	29,6	45	200	2	10
4	0,2	12,5	27,4	43	200	2	10
6	0,3	5,56	24,9	41	200	2	10
8	0,4	3,16	22,3	39	200	2	10
10	0,5	2,16	20	37	200	2	10
10,5	0,525	1,99	19,2	36	200	2	10
12	0,6	1,64	17,2	35	200	2	10

Видно, что с ростом частоты σ_{ϕ} растёт, параметр Накагами m уменьшается (замирания становятся глубже), полоса когерентности ΔF_k сужается – всё это соответствует физике и базовым работам [7, 18]. Значения ΔF_k лежат в типичном диапазоне 15–30 кГц.

Таблица 3

Энергетический запас и надёжность связи с учетом организации разнесенного приема для случая $\beta_n = 10^{-3}$ (слабая диффузность)

f_0 , МГц	$Z_{доп} (n=1)$, дБ	$\Delta Z (n=1)$	$D_{св} (n=1)$	$Z_{доп} (n=2)$, дБ	$\Delta Z (n=2)$	$D_{св} (n=2)$
2	20,4	14,6	0,851	20,2	14,8	0,855
4	15,6	20,4	0,927	14,7	21,3	0,936
6	14,3	22,7	0,947	12,2	24,8	0,962
8	14,9	24,1	0,957	11,2	27,8	0,976
10	16,6	24,4	0,96	11,2	29,8	0,983
10,5	17,1	25,9	0,968	11,3	31,7	0,988
12	18,7	26,4	0,97	11,6	33,4	0,991

По критерию максимизации энергетического запаса ΔZ оптимальная частота лежит в районе МПЧ (12 МГц 26,4 дБ соответственно), обеспечивая надёжность связи на уровне – 0,97. Разнесенный двоякный прием повышает и энергетический запас (33,4 дБ) и надёжность связи до 0,991, однако полоса когерентности в этом случае составит 17,2 кГц, что в 1,68 раза меньше максимально достижимого в диапазоне частот значения (29,6 кГц на НПЧ=2 МГц), время интерливера во всем диапазоне (задержка перемежения) составит 10 секунд.

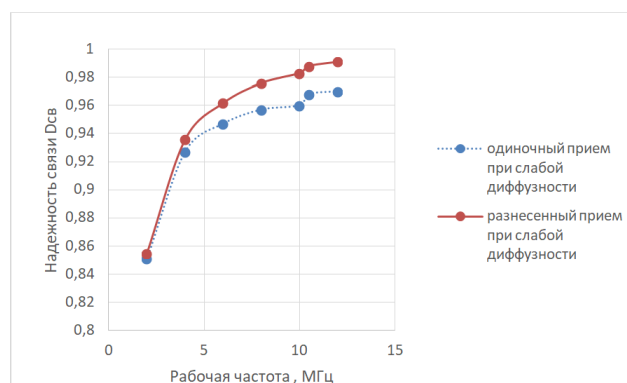


Рис. 2. Характер зависимости надежности связи в расчетном примере для одиночного и двойного разнесенного приема при слабой диффузности

Для ситуаций с сильной диффузностью ситуация несколько меняется.

Таблица 4

Расчётные значения параметров канала для случая $\beta n = 10^{-1}$ (сильная диффузность)

f_0 , МГц	σ_ϕ	m	ΔF_k , кГц	$\bar{Z}$, дБ	$\Delta \rho_k$, м	Δt_k , с	$T_{пл}$, с
2	0,6	1,64	4,9	45	200	2	10
4	1,2	1,07	4,2	43	167	1,67	8,35
6	1,8	1,01	3,6	41	111	1,11	5,55
8	2,4	1	3	39	83	0,83	4,15
10	3	1	2,5	37	67	0,67	3,35
10,5	3,15	1	2,3	36	63	0,63	3,15
12	3,6	1	2	35	56	0,56	2,8

Здесь σ_ϕ велико, поэтому m близко к 1, замирания практически релеевские. Полоса когерентности ΔF_k значительно уже, чем при слабой диффузности, и также убывает с частотой. Интервал пространственной корреляции $\Delta \rho_k$ вычислен по формуле (4) с учётом $\sigma_\phi > 1,25$: $\Delta \rho_k = l_s / \sigma_\phi$, что приводит к уменьшению требуемого разнosa антенн на высоких частотах – полученные значения подтверждаются соответствием базовым физическим процессам в ДКМ радиосвязи.

Таблица 5

Энергетический запас и надежность связи с учетом организации разнесенного приема для случая $\beta n = 10^{-1}$ (сильная диффузность)

f_0 , МГц	$Z_{доп} (n=1)$, дБ	$\Delta Z (n=1)$	$D_{св} (n=1)$	$Z_{доп}(n=2)$, дБ	$\Delta Z (n=2)$	$D_{св} (n=2)$
2	18,7	16,3	0,879	11,6	23,4	0,952
4	24,1	11,9	0,803	13,5	22,5	0,946
6	25	12	0,804	13,9	23,1	0,951
8	25,2	13,8	0,837	14	25	0,963
10	25,2	15,8	0,87	14	27	0,973
10,5	25,2	17,8	0,898	14	29	0,981
12	25,2	19,8	0,921	14	31	0,987

Из-за сильной диффузности почти пропадает маневр энергетического запаса за счет $Z_{\text{доп}}$ – допустимого отношения сигнал/помеха (оно теперь почти на всех частотах максимальное и составляет 25 дБ). Энергетический выигрыш по-прежнему фиксируется на МПЧ, но в абсолютных значениях этот запас (19,8 дБ) меньше энергетического выигрыша, достигаемого в условиях слабой диффузности (26,4 дБ). Соответственно и достижимые значения для надежности связи несколько ниже, чем для ситуации со слабой диффузностью (рис. 3). Фактически без разнесенного приема не удастся обеспечивать надежность связи выше 0,9.

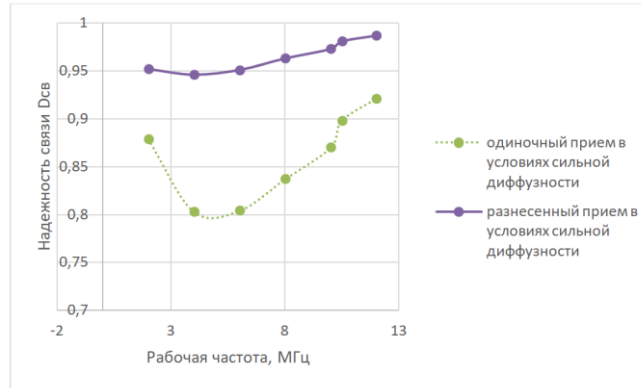


Рис. 3. Характер зависимости надежности связи в расчетном примере для одиночного и двойного разнесенного приема при сильной диффузности

Таблица 6

Оптимальные режимы работы

$\beta_{\text{и}}$	$f_{\text{опт}}, \text{МГц}$	n	$Z_{\text{доп}}, \text{дБ}$	$\Delta Z, \text{дБ}$	$D_{\text{св}}$	Тил,с
10^{-3}	10,5	1	15,4	20,6	0,929	10
10^{-3}	10,5	2	11,1	24,9	0,962	10
10^{-1}	12	1	25,2	9,8	0,758	4
10^{-1}	12	2	14	21	0,933	4

Обсуждение результатов. Во всех рассмотренных случаях максимум энергетического запаса ΔZ достигается на максимально применимой частоте (12 МГц). Это обусловлено ростом $\bar{Z}(f_0)$ с частотой, что соответствует типичной физической картине (уменьшение поглощения при увеличении частоты). При слабой диффузности разнесённый приём ($n=2$) повышает надёжность с 0,970 до 0,991 и может быть использован для перехода к работе на более низких частотах с целью использования СКК с более широкой полосой сигнала или скоростью; при сильной диффузности разнесенный прием позволяет повысить надежность с 0,921 до 0,987 и в принципе без разнесённого приема отсутствует возможность обеспечить надежность связи выше 0,95. Полоса когерентности при сильной диффузности резко сужается (до 2 кГц), что ограничивает максимальную скорость передачи (рис. 4). Поэтому алгоритм автоматически исключит широкополосные СКК на этапе выбора. Пространственный разнос антенн для сильной диффузности требуется всего 56 м против 200 м при слабой, что упрощает реализацию разнесённого приёма в сложных условиях.

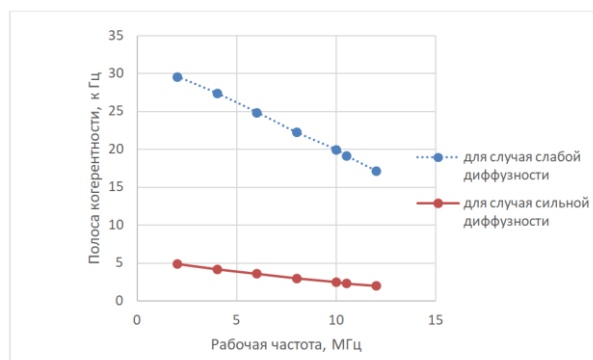


Рис. 4. Зависимость интервала частотной корреляции от рабочей частоты при различных уровнях диффузности.

Выводы:

1. Разработан алгоритм упреждающего выбора оптимальной рабочей частоты и параметров передачи в декаметровом канале связи, ориентированный на задачи управления робототехническими комплексами. В отличие от существующих реактивных методов [4–6], алгоритм использует данные пассивного ГНСС-мониторинга для прогнозирования частотно-зависимых характеристик диффузной ионосферы – среднеквадратического отклонения флуктуаций фазы σ_ϕ , интервалов частотной, пространственной и временной корреляции $(\Delta F_k, \Delta \rho_k, \Delta t_k)$, параметра Накагами m и допустимого отношения сигнал/помеха $Z_{\text{доп}}$. Это позволяет адаптироваться к текущему состоянию среды без активного зондирования и задержек на установление связи, что критически важно для обеспечения требуемой надёжности и скорости передачи при управлении подвижными объектами.

2. Новизна подхода заключается в комплексном использовании физической модели среды распространения, объединяющей структурно-многолучевое описание [7, 9] с уточнёнными зависимостями для интервалов корреляции [17, 18]. Благодаря корректному учёту частотной зависимости $\sigma_\phi(f_0)$, полученной из фундаментальных соотношений [7], все рассчитываемые параметры демонстрируют правильное физическое поведение: с ростом частоты глубина замираний увеличивается (m уменьшается), полоса когерентности ΔF_k сужается, а интервал пространственной корреляции $\Delta \rho_k$ сокращается, что согласуется с результатами базовых работ [7, 18] и экспериментальными данными.

3. Численное моделирование для типовой среднеширотной трассы подтвердило работоспособность алгоритма. Показано, что при слабой диффузности ионосферы максимум энергетического запаса ΔZ и, соответственно, оптимальная рабочая частота лежат вблизи традиционной оптимальной рабочей частоты (0,85–0,9 fm), а при сильной диффузности оптимум смещается к максимально применимой частоте. Использование разнесённого приёма ($n=2$) обеспечивает существенное повышение надёжности связи (с 0,921 до 0,987 в условиях сильной диффузности). При этом автоматически учитываются ограничения, накладываемые полосой когерентности и временем перемежения, что гарантирует выбор сигнально-кодовых конструкций, исключающих частотно-селективные замирания.

4. Практическая значимость работы состоит в том, что разработанный алгоритм может быть реализован в программном обеспечении современных ДКМ-радиостанций и модемов, включая уже существующие компактные образцы типа «Прима-КВ» [3]. Это позволит повысить качество и устойчивость каналов управления робототехническими комплексами морского и воздушного базирования. Дальнейшие исследования предполагают экспериментальную проверку алгоритма на действующих трассах, его адаптацию для многолучевых каналов, а также уточнение модели частотной корреляции путём введения частотно-зависимого дифракционного параметра $d1(f_0)$ согласно методике [18].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Будко П.А., Винограденко А.М., Жуков Г.А., Литвинов А.И. Комплексное использование разнородных каналов связи для управления робототехническими комплексами на базе единой системы радиомониторинга // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 18-41.
2. Будко П.А., Винограденко А.М., Литвинов А.И. Реконфигурация каналов связи при управлении смешанными группировками робототехнических комплексов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2017. – № 1. – С. 266-278. – DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-266278.
3. Прима-KB (с режимом ALE). НПП «ПРИМА». – URL: <https://www.prima-systems.ru/catalog/main/product/50/> (дата обращения: 18.03.2026).
4. ГОСТ Р 55711-2013. Комплекс технических средств автоматизированной адаптивной ВЧ (KB) дуплексной радиосвязи. Алгоритмы работы. – М.: Стандартинформ, 2014.
5. STANAG 4538. Technical Standards for an Automatic Radio Control System (ARCS) for HF Communication. – NATO, 2014.
6. MIL-STD-188-141B. Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems. – Department of Defense, USA, 1999.
7. Пашинцев В.П., Коваль С.А., Цимбал В.А., Тошкин В.Е., Сенокосов М.А., Скорик А.Д. Структурно-многолучевой подход к разработке пространственно-временной модели одномодового декаметрового канала связи с диффузной многолучевостью // Журнал радиоэлектроники. – 2022. – № 6. – DOI 10.30898/1684-1719.2022.6.5.
8. Blaunstein N., Plohotniuc E. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar. – New York: Taylor & Francis, 2008. – 577 p.
9. Пашинцев В.П., Коваль С.А., Потягов Д.А., Скорик А.Д., Сенокосов М.А. Уточненный метод определения интервала пространственной корреляции замираний в однолучевой декаметровой радиолнии // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 2. – DOI: 10.30898/1684-1719.2021.2.5.
10. Nakagami M. The m-distribution – A general formula of intensity distribution of rapid fading // Statistical Methods in Radio Wave Propagation. – Oxford: Pergamon Press, 1960. – P. 3-36.
11. Recommendation ITU-R P.533-13. Method for the prediction of the performance of HF circuits. – ITU, 2015.
12. Recommendation ITU-R P.372-12. Radio noise. – ITU, 2015.
13. Пашинцев В.П., Скорик А.Д., Коваль С.А., Киселев Д.П., Сенокосов М.А. Зависимость надежности связи в декаметровой радиолнии от выбора рабочей частоты с учетом сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – № 4. – С. 300-322. – DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412.
14. Кловский Д.Д. Передача дискретных сообщений по радиоканалам. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
15. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. – 2017. – Vol. 15. – P. 418-429. – DOI: 10.1002/2016SW001593.
16. Пашинцев В.П., Тишкин С.А., Смирнов А.А., Боровлев И.И. Эквивалентный путь распространения декаметровой волны в сферически-слоистой ионосфере // Журнал радиоэлектроники. – 2001. – № 8. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug01/1/text.html> (дата обращения: 10.03.2026).
17. Стейн С., Джонс Дж. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. – М.: Связь, 1971. – 376 с.
18. Пашинцев В.П., Скорик А.Д., Коваль С.А., Алексеев Д.В., Сенокосов М.А. Алгоритм расчета интервала частотной корреляции коротковолновой радиолнии с учетом сферичности и мелко-масштабных неоднородностей ионосферы // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 2. – С. 49-72. – DOI 10.24411/2410-9916-2020-10203.
19. Taylor G.I. The spectrum of turbulence // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1938. – Vol. 164, No. 919. – P. 476-490. – DOI: 10.1098/rspa.1938.0032.
20. Pashintsev V.P., Peskov M.V., Kiselev N.V., Mikhailov D.A., Dukhovnyi D.V. Analysis of noise immunity of satellite communications under small-scale. - ionospheric disturbances and time-selective fading of received signals // The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences. – 2023. – 26. – P. 1036-1045. – DOI: 10.1016/j.ejrs.2023.11.002.

REFERENCES

1. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Zhukov G.A., Litvinov A.I. Kompleksnoe ispol'zovanie raznorodnykh kanalov svyazi dlya upravleniya robototekhnicheskimi kompleksami na baze edinoi sistemy radiomonitoringa [Integrated use of heterogeneous communication channels for control of robotic complexes based on a single radio monitoring system], *Nauchnye tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High-Tech Technologies in Earth Space Research], 2017, Vol. 9, No. 1, pp. 18-41.
2. Budko P.A., Vinogradenko A.M., Litvinov A.I. Rekonfiguratsiya kanalov svyazi pri upravlenii smeshannymi gruppировками robototekhnicheskikh kompleksov [Reconfiguration of communication channels when controlling mixed groups of robotic systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 1, pp. 266-278. DOI: 10.18522/2311-3103-2017-1-266278.

3. Prima-KV (s rezhimom ALE) [Prima-KV (with ALE mode)], NPP «PRIMA». Available at: <https://www.prima-systems.ru/catalog/main/product/50/> (accessed 18 March 2026).
4. GOST R 55711-2013. Kompleks tekhnicheskikh sredstv avtomatizirovannoy adaptivnoy VCH (KV) dupleksnoy radiosvyazi. Algoritmy raboty [GOST R 55711-2013. Complex of technical means of automated adaptive HF (HF) duplex radio communication. Operating algorithms]. Moscow: Standartinform, 2014.
5. STANAG 4538. Technical Standards for an Automatic Radio Control System (ARCS) for HF Communication. NATO, 2014.
6. MIL-STD-188-141B. Interoperability and Performance Standards for Medium and High Frequency Radio Systems. Department of Defense, USA, 1999.
7. Pashintsev V.P., Koval' S.A., Tsimbal V.A., Toshkin V.E., Senokosov M.A., Skorik A.D. Strukturno-mnogoluchevoy podkhod k razrabotke prostranstvenno-vremennoy modeli odnomodovogo deka-metrovogo kanala svyazi s diffuznoy mnogoluchevost'yu [Structural-multipath approach to the development of a space-time model of a single-mode decameter communication channel with diffuse multipath], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2022, No. 6. DOI 10.30898/1684-1719.2022.6.5.
8. Blaunstein N., Plohotniuc E. Ionosphere and Applied Aspects of Radio Communication and Radar. New York: Taylor & Frances, 2008, 577 p.
9. Pashintsev V.P., Koval' S.A., Potyagov D.A., Skorik A.D., Senokosov M.A. Utochnennyy metod opredeleniya intervala prostranstvennoy korrelyatsii zamiraniy v odnoluchevoy dekametrovoy radiolinii [Refined method for determining the spatial correlation interval of fading in a single-hop decameter radio link], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2021, No. 2. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.2.5.
10. Nakagami M. The m-distribution – A general formula of intensity distribution of rapid fading, *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*. Oxford: Pergamon Press, 1960, pp. 3-36.
11. Recommendation ITU-R P.533-13. Method for the prediction of the performance of HF circuits. ITU, 2015.
12. Recommendation ITU-R P.372-12. Radio noise. ITU, 2015.
13. Pashintsev V.P., Skorik A.D., Koval' S.A., Kiselev D.P., Senokosov M.A. Zavisimost' nadezhnosti svyazi v dekametrovoy radiolinii ot vybora rabochey chastoty s uchetom signal'no-pomekhovoy obstanovki i diffuznosti ionosfery [Dependence of communication reliability in a decameter radio line on the choice of operating frequency, taking into account the signal-to-interference environment and ionospheric diffusivity], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2019, No. 4, pp. 300-322. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10412.
14. Klovskiy D.D. Peredacha diskretnykh soobshcheniy po radiokanalam [Transmission of discrete messages over radio channels]. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 304 p.
15. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions, *Space Weather*, 2017, Vol. 15, pp. 418-429. DOI: 10.1002/2016SW001593.
16. Pashintsev V.P., Tishkin S.A., Smirnov A.A., Borovlev I.I. Ekvivalentnyy put' rasprostraneniya dekametrovoy volny v sfericheski-sloistoy ionosfere [Equivalent propagation path of a decameter wave in a spherically layered ionosphere], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2001, No. 8. – Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/aug01/1/text.html> (Accessed 10 March 2026).
17. Steyn S., Dzhons Dzh. Printsipy sovremennoy teorii svyazi i ikh primeneniye k peredache diskretnykh soobshcheniy [Principles of modern communication theory and their application to the transmission of discrete messages]. Moscow: Svyaz', 1971, 376 p.
18. Pashintsev V.P., Skorik A.D., Koval' S.A., Alekseev D.V., Senokosov M.A. Algoritm rascheta intervala chastotnoy korrelyatsii korotkovolnovoy radiolinii s uchetom sferichnosti i melko-masshtabnykh neodnorodnostey ionosfery [Algorithm for calculating the frequency correlation interval of a short-wave radio link taking into account the sphericity and small-scale inhomogeneities of the ionosphere], *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2020, No. 2, pp. 49-72. DOI 10.24411/2410-9916-2020-10203.
19. Taylor G.I. The spectrum of turbulence, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 1938, Vol. 164, No. 919, pp. 476-490. DOI: 10.1098/rspa.1938.0032.
20. Pashintsev V.P., Peskov M.V., Kiselev N.V., Mikhailov D.A., Dukhovnyi D.V. Analysis of noise immunity of satellite communications under small-scale. - ionospheric disturbances and time-selective fading of received signals, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2023, 26, pp. 1036-1045. DOI: 10.1016/j.ejrs.2023.11.002.

Скорик Александр Дмитриевич – АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей»; e-mail: a.skorik@almaz-antey.ru; г. Москва, Россия; тел.: +74952762901; советник генерального конструктора.

Skorik Alexander Dmitrievich – Almaz-Antey Concern; e-mail: a.skorik@almaz-antey.ru; Moscow, Russia; phone: +74952762901; adviser to the general designer.