

УДК 621.296

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_3

**МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В РАЙОНЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ СЕТИ АБОНЕНТСКОГО РАДИОДОСТУПА**

**A TECHNIQUE FOR INCREASING THE RELIABILITY OF ESTIMATING
PARAMETERS OF THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENT IN THE AREA
OF OPERATION OF ELEMENTS OF THE RADIO ACCESS NETWORK**

*А.С. Ефанов, д-р техн. наук С.А. Иванов, канд. техн. наук Е.В. Вершенник,
д-р воен. наук Ю.И. Стародубцев*

A.S. Efanov, D.Sc. S.A. Ivanov, Ph.D. E.V. Vershennik, D.Sc. Yu.I. Starodubtsev

Военная академия связи им. С.М. Буденного

В статье рассмотрены вопросы оценки функционирования сети абонентского радиодоступа для удовлетворения потребностей ее высококомобильных потребителей в предоставляемых услугах. Известные методики оценки показателей качества радиосвязи [1–4] опираются на допущение об единообразии типа подстилающей поверхности на интервале радиосвязи и известном уровне помех. Объективное состояние радиоканала далеко от этого допущения, что связано с уникальным уровнем шума в конкретном месте приема и большим разнообразии типов подстилающей поверхности на интервале радиосвязи, а также изменениями диэлектрической проницаемости среды. Представленная методика позволяет с заданной достоверностью оценить качество обеспечения услугами связи потребителей сети абонентского радиодоступа.

Ключевые слова: сеть абонентского радиодоступа, подстилающая поверхность, электромагнитная обстановка, качество услуг.

This article examines the performance assessment of a subscriber radio access network to meet the service needs of its highly mobile consumers. Known methods for assessing radio communication quality [1–4] rely on the assumption of uniformity in the underlying surface type over the radio link interval and a known interference level. The objective state of a radio channel deviates from this assumption due to the unique noise level at a specific reception location and the wide variety of underlying surface types over the radio link interval, as well as variations in the permittivity of the medium. The presented method enables the quality of service provision to subscribers of a subscriber radio access network to be assessed with a given degree of reliability.

Keywords: subscriber radio access network, indicator, evaluation, integral indicator.

Появление нового класса объектов (например, робото-технических комплексов (РТК) роевого типа [5, 6]), ограниченных по времени функционирования, энергетике, возможностям и другим показателям, определили ужесточение подходов к планированию их применения. Ограничение этих по-

казателей требует качественно более детализированных исходных данных об обстановке в районе их применения [7] в части касающейся организации каналов их управления и обмена информацией (как между собой, так и с оператором), что и определило необходимость разработки методики.

Распространение радиоволн сопровождается искажением сигналов, обусловленным особенностями среды распространения [8]. Кроме того, затухание радиоволн в процессе их распространения зависит от диапазона рабочих частот радиолинии, механизма их распространения, относительной высоты подвеса антенн, типа подстилающей поверхности на линии связи, диэлектрической проницаемости среды, относительной длинной линии связи (для учета или не учета сферичности Земли) и от других параметров.

Необходимо отметить, что тип подстилающей поверхности и диэлектрическая проницаемость среды могут отличаться даже в пределах одной линии связи, что связано прежде всего с многообразием природных условий и факторами техногенного характера. Это определило традиционный «усредненный» подход к учету этих параметров.

Сети абонентского радиодоступа можно представить как совокупность линий связи и средств связи, связывающих абонентов между собой. На рис. 1 буквами A, B, C, D и E обозначены абоненты; n_2 и n_3 представляют собой индивидуальные средства связи, а n_1 — средство связи коллективного пользования.

Радиолиния состоит из следующих частей [9, 10]: тракта передачи; среды, в которой происходит распространение электромагнитных волн (радиоволн); тракта приема и подстилающей по-

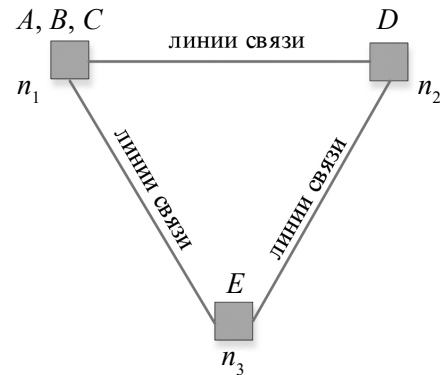


Рис. 1. Обобщенная схема сети абонентского радиодоступа

верхности. На рис. 2 представлены: передающее устройство с выходной мощностью P_1 ; фидер передающего устройства с коэффициентом затухания $\eta_{\phi 1}$; антенна передающего устройства с подводимой мощностью P_{1A} и коэффициентом усиления G_1 , входящие в тракт передачи; приемное устройство, принимающее полезный сигнал с мощностью P_c и помеху с мощностью P_n ; фидер приемного устройства с коэффициентом затухания $\eta_{\phi 2}$; антенна приемного устройства с подводимой мощностью P_{2A} и коэффициентом усиления G_2 . На распространение радиоволн также влияет характер подстилающей поверхности и диэлектрическая проницаемость среды, поглощающие их энергию, вызывая затухание по мере удаления от передающей антенны.

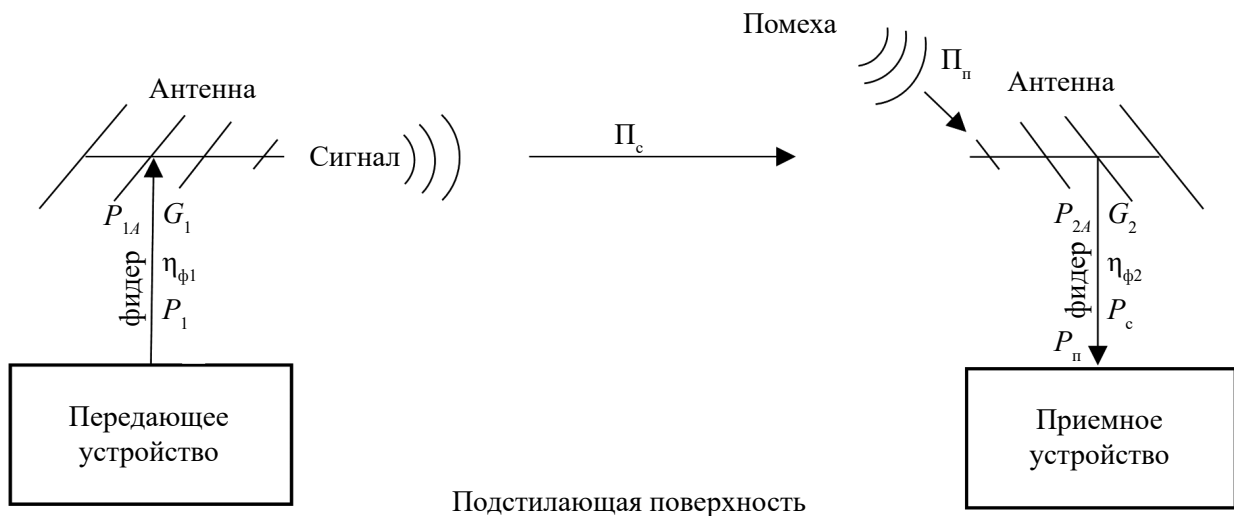


Рис. 2. Обобщенная схема радиолинии

Известные методики расчета радиолинии опираются на допущение об единообразии типа подстилающей поверхности и диэлектрической проницаемости среды на линии связи и известном уровне помех в месте приема. Объективная реальность свидетельствует об обратном: уровень шума в конкретном месте приема всегда уникален, большое разнообразие типов подстилающей поверхности на линии связи может наблюдаться даже на расстоянии в 1 км, а запыленность среды распространения, ее влажность или электромагнитная обстановка (природного и техногенного характера) фактически не поддаются расчету и являются вариативными в зависимости от погодных условий, времени года и суток. Данные обстоятельства снижают точность и достоверность проводимых математических расчетов, необходимых как для создания тактико-технических требований на разработку телекоммуникационных

модулей в составе РТК, так и на планирование применения уже существующих.

На приемную сторону сигнал приходит с измененными характеристиками, что связано с внутренними шумами передатчика, влиянием среды распространения (в том числе электромагнитная обстановка) и внутренними шумами самого приемника. Кроме того, внутренние шумы зависят от условий функционирования приемника или передатчика, и в каждом конкретном случае они могут быть различны (в зависимости от температуры окружающей среды, атмосферного давления, электромагнитной обстановки и других параметров).

Таким образом, задача оценки влияния внешних факторов на ведение радиосвязи и прогнозирование уровня сигнала на выходе приемника имеет большое практическое значение для организации и ведения радиосвязи, а большое



Рис. 3. Обобщенная структура блок-схемы методики оценки функционирования сети абонентского радиодоступа

разнообразие способов ведения радиомониторинга (мониторинга) и методик расчета ослабления радиолинии лишь подтверждает их неточность или ограниченную применимость.

Структура методики включает в себя 4 основных блока (рис. 3):

– в первом блоке осуществляется формирование исходных данных по требованиям к состоянию радиоканала;

– во втором блоке осуществляется ведение радиомониторинга и накопление статистических данных;

– в третьем блоке осуществляется дотраивание системы радиомониторинга до достижения требуемого уровня корреляции исследуемых показателей;

– в четвертом блоке осуществляют вычисление интегрального показателя, учитывающего диэлектрическую проницаемость среды и электрическую проводимость подстилающей поверхности.

Исходными данными являются:

1. Площадь района ведения радиомониторинга S , координатная сетка для привязки средств мониторинга к местности, координаты исследуемой территории (x, y) ;

2. Множество средств радиосвязи, которые являются средством радиомониторинга:

$$\{R\} = \{R_1\} \cup \{R_2\} \cup \{R_i\},$$

и их тактико-технические характеристики

$$\{R_i\} = \{F_i; \Delta F_i; P_i; \Delta P_i; M_i; V_i; \Delta V_i; G_i; \eta_{\text{фи}}; \dots\},$$

где F_i — частотный диапазон работы средства мониторинга, МГц;

ΔF_i — шаг перестройки частоты средства мониторинга, МГц;

P_i — мощность средства связи, Вт;

ΔP_i — шаг перестройки мощности передатчика средства мониторинга, Вт;

M_i — вид модуляции;

V_i — скорость передачи данных;

ΔV_i — шаг изменения скорости передачи данных;

G_i — коэффициент усиления антенны;

$\eta_{\text{фи}}$ — коэффициент затухания фидера и др.;

3. Требуемое значение коэффициента корреляции уровня шума $K_{\text{корр.ур.ш.}}$;

4. Требуемая точность вычисления коэффициента корреляции $\rho_{\text{коэф.бит.ош.тр.}}$;

5. Периодичность измерений уровня шума $\Delta t_{\text{ур.ш.}}$;

6. Содержание и размер тестовых последовательностей;

7. Периодичность отправки тестовых последовательностей $\Delta t_{\text{тест.п.}}$;

8. Требуемое значение коэффициента битовой ошибки $K_{\text{коэф.бит.ош.тр.}}$;

9. Алгоритм задействования средств радиомониторинга;

10. Идентификаторы радиоприемных и радиопередающих устройств средств радиомониторинга;

11. Эталонная кодовая комбинация.

Ограничением является утверждение, что дистанционное управление средствами радиомониторинга реализовано.

На первом этапе осуществляют аппроксимацию формы района ведения радиомониторинга прямоугольной геометрической фигурой, описанной вокруг района радиомониторинга, что позволяет быстро вычислять ее геометрические параметры, такие как длина, ширина, площадь, а также вычислять расстояния между средствами радиомониторинга и определять их местоположение. При ведении радиосвязи земной волной геометрические размеры прямоугольника можно принять равным 25 на 30 км. В случае, если район радиомониторинга превышает эти размеры, то он разбивается на n прямоугольников.

Далее размещают средства радиомониторинга на углах прямоугольной геометрической фигуры и определяют их координаты.

Дистанционно с центра управления радиомониторингом включаются все радиоприемные устройства средств радиомониторинга в сканирующем режиме в заданном диапазоне частот F_i с заданным шагом перестройки ΔF_i и измеряется уровень шума $P_{\text{ш}}$ на заданных частотах, результаты измерений передаются в центр управления радиомониторингом. При этом уровень шума измеряется на выходе демодулятора, что позволяет учесть при планировании трасс радиолиний внутренние шумы приемника, зависящие от условий его функционирования.

Шаг времени Δt выбирается в зависимости от требуемых значений точности или ограни-

чений на размер памяти. Чем меньше значение Δt , тем выше точность прогнозирования уровня шума в конкретный момент времени, но при этом необходимо хранить больше количество данных.

Шаг времени Δt может быть увеличен после статистической обработки уровня шума в заданной точке и выявления периодов его квазистационарности для различных диапазонов частот, что обусловит уменьшение занимаемой данными объема памяти, а также снизит нагрузку на сеть связи, за счет передачи меньшего количества результатов измерений.

Осуществляя статистическую обработку результатов измерений, определяют: функцию распределения; погрешность измерения; математическое ожидание; дисперсию; среднее квадратическое отклонение; моду; медиану, а при необходимости и другие параметры [11].

Проведя статистическую обработку, осуществляется корреляционная обработка статистических данных об уровне шума на сходных интервалах времени, полученных приемными устройствами, для чего вычисляют коэффициент корреляции значения уровня шума для каждой пары средств радиомониторинга.

Для установления наличия корреляционной связи рассчитывается коэффициент корреляции Пирсона r , представляющий собой меру корреляции, подходящую для двух метрических переменных, измеренных на одной и той же выборке [12]:

$$r = \frac{\sum z_x z_y}{n - 1},$$

где $z_x = \frac{X_i - \bar{X}}{S_x}$ — отклонение уровня шума от среднего значения;

$$z_y = \frac{Y_i - \bar{Y}}{S_y} \text{ — отклонение расстояния между}$$

приемным и передающим средством радиомониторинга от среднего значения.

Сравнивая вычисленный коэффициент корреляции с требуемым, при его малом значении принимается решение об увеличении количества радиоприемных устройств средств радиомониторинга, начиная с уменьшения максимальной

дистанции между радиоприемными устройствами средств радиомониторинга, или приступают к оценке качества радиосвязи для каждой пары приемного и передающего устройства средств радиомониторинга при его равном или превышающем значении.

Для чего, для каждого средства радиомониторинга: с шагом времени измерения Δt для диапазона частот F_i ; с шагом перестройки частоты ΔF_i , для диапазона мощности P_i ; с шагом изменения ΔP_i , для всех видов модуляции M_i и диапазона скоростей $V_i \pm$ осуществляется передача тестовой последовательности с заданным алгоритмом. Принимая тестовую последовательность с помощью всех радиоприемных устройств средств радиомониторинга, она сравнивается с эталонной и вычисляется коэффициент битовой ошибки:

$$K_{\text{коэф.бит.ош.}} = \frac{N_{\text{прав.}}}{N_{\text{общ.}}} \quad (1)$$

Осуществив передачу результатов вычисления значения коэффициента битовой ошибки, значения частот, мощности, скорости и алгоритма модуляции, идентификаторов времени и идентификаторов приемного и передающего устройств средств радиомониторинга в центр управления радиомониторингом, сравнивают значение полученного $K_{\text{коэф.бит.ош.}}$ с заданным; при его больших значениях определяются места размещения дополнительных радиоприемных средств (размещают радиоприемные устройства на прямой линии, соединяющей радиопередающие и радиоприемные устройства средств радиомониторинга, пропорционально значению коэффициента битовой ошибки и запоминают их координаты). Причем, чем больше значение коэффициента битовой ошибки, тем больше должен быть уменьшен интервал между радиопередающими и радиоприемными устройствами средств радиомониторинга. Если коэффициент битовой ошибки меньше или равен заданному значению, то его значение запоминается с идентификаторами приемного и передающего устройств средств радиомониторинга и идентификаторами времени, значением частот, мощности, скорости и алгоритма модуляции.

На заключительном этапе вычисляется интегральный показатель влияния среды распрост-

ранения, характеризующий состояние радиоканала. Его суть заключается в объединении значений влияния диэлектрической проницаемости среды ε и электрической проводимости подстилающей поверхности σ для заданной трассы между конкретными приемниками и передатчиками в указанный момент времени.

Для идеальных условий известно уравнение радиопередачи [7]:

$$P_{AR} = \frac{P_{AT} G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} f_T^2 f_R^2,$$

где P_{AR} — мощность на приемной антенне;
 P_{AT} — мощность на передающей антенне;
 G_T — усиление передающей антенны;
 G_R — усиление приемной антенны;
 λ — длина волны;
 f_T — функция диаграммы направленности передающей антенны;
 f_R — функция диаграммы направленности приемной антенны;
 d — расстояние между приемной и передающей антеннами.

Выражение (1) не учитывает влияние диэлектрической проницаемости среды ε и электрической проводимости подстилающей поверхности σ .

Диэлектрическая проницаемость среды ε представляет собой физическую величину, характеризующую свойства вещества, показывающую, во сколько раз сила взаимодействия зарядов в данном веществе меньше силы их взаимодействия в вакууме. Электрическая проводимость подстилающей поверхности σ представляет собой физическую величину, характеризующую свойства подстилающей поверхности, показывающую, во сколько раз происходит ослабление электромагнитной волны над данной средой по сравнению с вакуумом. Трасса про-

хождения радиоволн может пролегать над разными подстилающими поверхностями (болото, песок, вода, лес, камни и другие) в различных погодных условиях (различная влажность, температура и другие), что делает вычисления σ довольно затруднительным процессом с высокой вероятностью ошибки.

Таким образом, выражение (1) принимает вид:

$$P_{AR} = \frac{P_{AT} G_T G_R \lambda^2}{(4\pi d)^2} f_T^2 f_R^2 \varepsilon \sigma.$$

Зная параметры антенн, мощности на передающей и приемной антеннах, можно вычислить совместное влияние ε и σ для данной трассы в заданный момент времени, которое будет представлять собой значение интегрального коэффициента влияния среды распространения I :

$$I = \frac{P_{AR} (4\pi d)^2}{P_{AT} G_T G_R \lambda^2 f_T^2 f_R^2}.$$

Проведя измерения, выбираются все пары приемных и передающих средств радиомониторинга, у которых коэффициент битовой ошибки и интегральный коэффициент влияния среды распространения, характеризующий состояние радиоканала, больше заданного, либо перемещают средства радиомониторинга до удовлетворения условий, когда указанные параметры будут в допустимых пределах.

Определив среднeperесеченную местность размером 30 на 40 км, создается база данных об уровне шума, интегральном показателе, расстоянии от исходного места (или координатах предполагаемого места размещения потребителя услуг связи), мощности передатчика и частотах, на которых проводились измерения, для интервала радиосвязи. Собирая данные, например, с помо-

Таблица

Пример представления измеренных характеристик

	t_1	t_1	t_1	t_1	t_1	t_1	t_1	...
$P_{ш}$, дБ	0,01	0,1	0,021	0,25	0,15	0,36	0,3	...
I	0,01	0,02	0,14	0,42	0,32	0,03	0,23	...
l , м	100	100	100	100	100	100	100	...
F , МГц	433,125	433,25	433,375	433,5	433,625	433,75	433,875	...

щью беспилотного летательного аппарата, с полезной нагрузкой в виде стандартного телекоммуникационного модуля, характерного для планируемого к использованию РТК, сохраняют их в базу данных в виде таблицы.

Проводя анализ таблицы можно сделать вывод, что для расстояния в 100 м наиболее пригодной являются частота 433,125 МГц, имеющая самый низкий уровень шума 0,01 дБ и самый низкий интегральный коэффициент влияния среды распространения 0,01. Подход может быть и другим: например, подбирать места размещения для каждого приемника и передатчика в районе выполнения задачи по заданному уровню шума, исходя из их частотного диапазона. Данные показатели в конечном итоге влияют на коэффициент ошибки, характеризующий достоверность предоставляемых услуг потребителям сети абонентского радиодоступа.

Задав необходимые ограничения по мощности шума в месте приема, значению интегрального коэффициента влияния среды распространения, выбираются частоты наиболее пригодные для предоставления услуг связи потребителям, в качестве которых могут быть, например РТК, потребители сети абонентского радиодоступа и другие.

Таким образом, полученные результаты в ходе радиомониторинга с высокой достоверностью и точностью описывают состояние канала, а статистический набор этих данных за большой промежуток времени позволяет с достаточной вероятностью утверждать о возможности связи между потребителями сети абонентского радиодоступа для конкретных мест их размещения и времени суток или года (периода), что является важным для применения нового класса телекоммуникационных объектов, ограниченных по времени функционирования, энергетике, возможностям и другим показателям.

Разработанная методика оценки функционирования сети абонентского радиодоступа позволяет оценить с высокой точностью и заданным качеством канал связи между потребителями высококачественной сети абонентского радиодоступа, имеющей повышенные требования к ним.

Новизна представленной модели заключается в учете диэлектрической проницаемости среды и электрической проводимости подстилающей поверхности за счет рационального размещения

средств радиомониторинга с заданным коэффициентом корреляции измеряемых параметров.

Разработка представленной методики оценки обусловлена появлением нового класса телекоммуникационных объектов, ограниченных по времени функционирования, энергетике, возможностям и другим показателям, характеризующихся локализованной, высокодинамичной спецификой применения их значений.

Методика является универсальной и позволяет оценивать с высокой точностью измеряемые параметры средств радиосвязи, необходимые для решения оптимизационной задачи по их распределению.

Список источников

1. Контрольно-измерительная система мониторинга: пат. 2662726 Рос. Федерация. № 2017140340; заявл. 20.11.17; опубл. 30.07.18. Бюл. № 22. 2 с.
2. Способ обработки результатов радиомониторинга: пат. 2736329 Рос. Федерация. № 2019139549; заявл. 03.12.19; опубл. 13.11.20. Бюл. № 32. 3 с.
3. Контрольно-измерительная система радиомониторинга: пат. 2459218 Рос. Федерация, № 2011125014/07; заявл. 17.06.11; опубл. 20.08.12. Бюл. № 23. 3 с.
4. Стародубцев Ю.И., Иванов С.А., Закалкин П.В., Вершенник Е.В. Методика определения оптимальной периодичности контроля состояния сложного объекта // Вопросы оборонной техники. Научно-технический журнал. Технические средства противодействия терроризму. Серия 16. 2021. № 3–4. С. 81–89.
5. Иванов В.Г., Лукьянчик В.Н., Поляков Д.Н. Повышение устойчивости управления и связи робототехническими комплексами военного назначения в современных операциях // Телекоммуникации и связь. 2024. № 1. С. 16–28.
6. Соловьев А.Э., Ивутин А.Н., Прохорцов А.В., Чукова О.В. Роевые системы беспилотных объектов: современное состояние и перспективы // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 4 (134). С. 65–70.
7. Иванов С.А., Ефанов А.С., Стародубцев Ю.И. Задачи организации сетей радиосвязи

при использовании разнотипных средств связи // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции «Технологии получения и обработки информации о динамических объектах и системах», 5 октября 2023 г. М.: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Экспертно-аналитический центр». 2023. С. 330–335.

8. Назаров Л.Е. Модели искажений цифровых сигналов при распространении в природных средах спутниковых радиолиний / Акусто-оптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации // Труды XVI Межд. научно-тех. конф. (Суздаль, 9–12 октября 2023 года). Москва, 2023. С. 45–48.

9. Антенны КВ и УКВ. М.: ИП РадиоСофт, 2016. 744 с.

10. Антенны и распространение радиоволн: учебник / В.Т. Еременко [и др.]. Орел: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2017. 329 с.

11. Сара Бослаф. Статистика для всех; пер. с англ. П.А. Волкова, И.М. Флямер, М.В. Либерман, А.А. Галицына. М.: ДМК Пресс, 2015. 586 с.

12. Наследов А.Д. Профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Питер, 2011. 400 с.

References

1. Control and measuring monitoring system: pat. 2662726 Russian Federation. No. 2017140340; application no. 11/20/17; publ. 07/30/18. Bul. No 22. 2 p.

2. Method of processing the results of radio monitoring: pat. 2736329 Russian Federation. No. 2019139549; application no. 03.12.19; publ. 13.11.20. Bul. No 32. 3 p.

3. The control and measuring system of radio monitoring: pat. 2459218 Russian Federation, No. 2011125014/07; application no. 17.06.11; publ. 20.08.12. Bul. No 23. 3 p.

4. Starodubtsev Yu.I., Ivanov S.A., Zakalkin P.V., Vershennik E.V. Methodology for deter-

mining the optimal frequency of monitoring the condition of a complex object // Issues of defense technology. Scientific and technical journal. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2021. No. 3–4. Pp. 81–89.

5. Ivanov V.G., Lukyanchik V.N., Polyakov D.N. Increasing the stability of control and communication of military robotic systems in modern operations // Telecommunications and communications. 2024. No 1. Pp. 16–28.

6. Soloviev A.E., Ivutin A.N., Prokhorov A.V., Chukova O.V. Swarm systems of unmanned objects: current state and prospects // Bulletin of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences. 2024. No 4 (134). Pp. 65–70.

7. Ivanov S.A., Efanov A.S., Starodubtsev Yu.I. Tasks of organizing radio communication networks using various types of communication tools // Collection of materials of the IV All-Russian scientific and practical conference «Technologies for obtaining and processing information about dynamic objects and systems», October 5, 2023, Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution «Expert-Analytical the center». 2023. Pp. 330–335.

8. Nazarov L.E. Models of digital signal distortions during satellite radio link propagation in natural environments / Acousto-optic and radar methods of measurement and information processing // Proceedings of the XVI Int. scientific-technical conf. (Suzdal, October 9–12, 2023). Moscow, 2023. Pp. 45–48.

9. HF and VHF antennas. Moscow: IP RadioSoft, 2016. 744 p.

10. Antennas and radio wave propagation: textbook / V.T. Eremenko [et al]. Ore: OSU named after I.S. Turgenev, 2017. 329 p.

11. Sarah Boslough. Statistics for everyone. Translated from English by P.A. Volkova, I.M. Flamer, M.V. Liberman, A.A. Galitsyn. M.: DMK Press, 2015. 586 p.

12. Nasledov A.D. Professional statistical data analysis. St. Petersburg: Peter, 2011. 400 p.