

УДК 537.871

Экспериментальная методика и результаты обработки данных об электромагнитной обстановке в ультракоротковолновом диапазоне

Стародубцев Ю. И., Акишин А. В.

Постановка задачи: В настоящее время непрерывно растет число радиоэлектронных средств различного назначения, функционирующих в ультракоротковолновом диапазоне. Для обоснования тактико-технических характеристик передающих и приемных средств, а также антенно-фидерных устройств, необходимы объективные данные об уровне помех и характере их изменения. Однако такие данные, характеризующиеся заданной точностью и достоверностью, практически отсутствуют. В этой связи актуальна задача разработки экспериментальной методики получения объективных данных об электромагнитной обстановке. **Целью работы** является определение времени квазистационарного состояния помеховой обстановки, как функция времени для заданных полос частот. Определение зависимости уровня помех в заданной полосе частот как функцию частотного разнеса между исследуемыми частотными диапазонами, а также зависимость изменения уровня помех от местоположения полосы частот на частотной оси. **Используемые методы:** сравнительный количественный анализ результатов измерения, натурные эксперименты и методы статистической обработки. **Новизна:** показана нецелесообразность применения коэффициента корреляции и обоснована возможность применения модифицированного коэффициента Рассела-Рао. **Результат:** появление возможности сокращения количества и продолжительности мониторинга электромагнитной обстановки, без существенной потери достоверности получаемых данных. **Практическая значимость:** с помощью разработанной методики можно получить количественные данные о электромагнитной обстановке на заданной территории с требуемой точностью и достоверностью.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, программноопределяемое радиоприемное устройство, радиослужба, таблица распределения полос частот, помехи, мониторинг.

Актуальность

Качество и даже сама возможность успешного функционирования средств связи, предопределяется отношением спектральной мощности сигнала к мощности помехи. Это отношение является основным отношением статистической теории связи. В настоящее время разработаны методы расчета уровней сигнала в заданной области пространства при известных тактико-технических характеристиках передатчика и приемника, а также прогнозных данных о среде распространения электромагнитного сигнала, которые обеспечивают приемлемую для практики, точность расчета оценки уровня мощности сигнала.

Существенно меньшая точность расчета уровней сигнала обеспечивается для ситуации характерной для исследования побочных электромагнитных из-

Библиографическая ссылка на статью:

Стародубцев Ю. И., Акишин А. В. Экспериментальная методика и результаты обработки данных об электромагнитной обстановке в ультракоротковолновом диапазоне // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 226-248. URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/12-Starodubtsev.pdf>.

Reference for citation:

Starodubtsev Yu. I., Akishin A. V. The Experimental Technique and Results of Data Processing about an Electromagnetic Situation on Very High Frequency. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 4, pp. 226-248. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2018-04/12-Starodubtsev.pdf> (in Russian).

лучений. Так как значительно труднее определить эффективную мощность излучения источника сигнала, характеристики его антенно-фидерного тракта и случайных антенн, а также характеристик радиоприемных устройств, которые могут применяться нарушителем в целях сбора информации [1].

Для этих существенно различающихся, по прогнозируемым уровням сигналов, ситуаций требуются существенно различающиеся по точности данные о уровне помех. Ситуация усугубляется тем, что появилась потребность в данных об уровне помех не только на заданной несущей частоте и (или) в узкой полосе частот (единицы-сотни кГц), но и в более широких полосах при использовании широкополосных сигналов (ШПС), а для оценки побочных каналов излучения в любом случае в широкой полосе частот (единицы-сотни МГц).

Электромагнитная обстановка – это совокупность электромагнитных явлений, существующих в данном месте и в любой области пространства, которая в общем случае зависит от времени и характеризуется уровнем электромагнитного шума, который является изменяющимся во времени электромагнитным явлением, которое не содержит информации и может налагаться на полезный сигнал или объединяться с полезным сигналом [2].

Уровень мощности регистрируемого электромагнитного сигнала определяется как состоянием среды распространения этих сигналов, так и количеством их источников, с соответствующими параметрами, функционирующих в заданный момент времени.

Совокупность электромагнитных помех в любой области пространства, создается работающими радиоисточниками, природными явлениями (грозовые разряды, электролизация, и т. д.), источниками побочных электромагнитных излучений. В этой связи выделяют: электромагнитные помехи, естественный и индустриальный шумы [2].

Графическое представление факторов влияющих на уровень электромагнитных помех представлены на рис. 1.

Уровень сигнала $x(t)$ в заданной области, или в заданной полосе частот, в конкретный момент времени, принятый от одного источника, представляется в виде [3]:

$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \phi_0), \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; ω – круговая частота; $-\infty < t < \infty$; ϕ_0 – начальная фаза.

Применительно к форме представления помех необходимо учитывать, что они являются результатом совокупность отдельных, как правило, независимых воздействий.

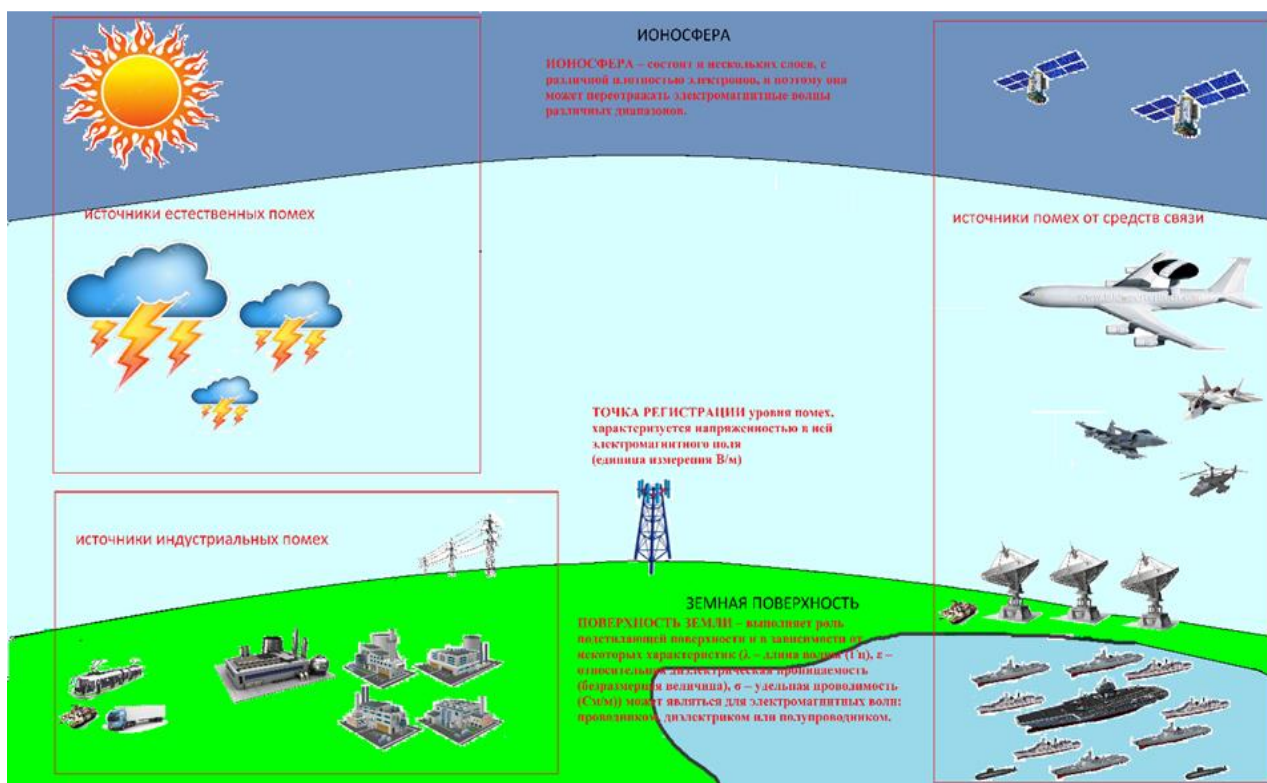


Рис. 1. Графическое представление факторов влияющих на уровень электромагнитных помех

Мощность помехи на любой выбранной частоте, в каждой области приема, представляет собой сложный случайный процесс, поэтому существует необходимость формализации, аналогичной для дециметровых волн, но при этом обязательно учитывать особенности распространения волн ультракоротковолнового (УКВ) диапазона. Таким образом, в точке приема напряжение помех представляет собой сумму мешающих сигналов, приходящих от значительного и, чаще всего, непредсказуемого числа разнородных источников различными путями с кратковременными и длительными изменениями. При этом [4]

$$U_{\Pi}(t) = \sum_{i=1}^{V_{\Pi}} \sum_{j=1}^{n_i} U_{\Pi ij}(t), \quad (2)$$

где $U_{\Pi ij}(t)$ – напряженность электромагнитного поля созданное i -м лучом, j -ой помехи; V_{Π} – число всех типов источников, излучающих в заданной полосе частот; n_i – количество источников побочного излучения, попавших в заданную полосу частот, заданной области пространства.

Уровни случайных помех в конкретные моменты времени непредсказуемы с теоретической точки зрения, но могут быть измерены с заданной точностью, периодичностью на любой частоте в заданной полосе частот в заданных областях пространства, а результаты измерений обработаны и использованы для решения практических задач в области связи, разведки и защиты информации.

В настоящее время известен ряд результатов измерения уровней электромагнитных помех [4]. Анализ показал, что большая часть полученных результатов потеряла актуальность в связи с существенным изменением электромагнит-

ной обстановки, произошедшим за длительный период времени, прошедший с момента получения этих результатов.

Известные результаты, в преобладающем большинстве случаев не распространяются на активно используемые в настоящее время участки ультракоротковолнового диапазона (УКВ) [4].

При этом в известных работах не приводятся ряд важных параметров, в том числе данные о географическом положении областей пространства на которое распространяются полученные результаты. Методики измерений [5, 6] могут ограничено использоваться для решения актуальных практических задач, так как оперируют с ограниченным числом источников помех, результаты измерений характеризуют отдельные частоты или узкие диапазоны частот. Необходимые средства измерения [7], как правило относительно редки и дороги.

В этой связи актуальна задача разработки экспериментальной методики, позволяющей получать массивы данных характеризующих уровень электромагнитных помех в заданных областях пространства в широких полосах частот за время, не превышающее среднего времени квазистационарности уровня помех.

Последующая обработка полученных данных может осуществляться, с целью определения отдельных параметров и законов распределения уровня помех в зависимости от частоты, времени, местоположения и т. п.

В настоящее время существует необходимость контроля состояния окружающей электромагнитной обстановки в заданных местах и в диапазонах электромагнитных волн.

Уровень помех в ультракоротковолновом диапазоне, предопределяется количеством разнородных источников электромагнитных сигналов, тактико-технических характеристик средств связи, параметрами природных явлений, свойств среды распространения и их взаимным расположением по отношению к участку (точке) измерения уровня помех. Кроме того, уровень помех зависит от принятого порядка распределения и интенсивности использования частотного ресурса.

В Российской Федерации каждый диапазон частот закрепляется за конкретным пользователем, что отражается в Таблице распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации, которая утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 декабря 2011 г. № 1049-34 [8].

Таблица распределения полос радиочастот между радиослужбами Российской Федерации разработана во исполнение статьи 23 Федерального закона «О связи» [9], является документом, регламентирующим распределение и условия использования полос радиочастот в Российской Федерации гражданами Российской Федерации и российскими юридическими лицами, которые заказывают, разрабатывают или ввозят на территорию Российской Федерации радиоэлектронные средства, а также осуществляют планирование использования и эксплуатацию радиоэлектронных средств.

В настоящее время появились эффективные технические средства для исследования загрузки УКВ диапазона. Это связано с появлением программно-

определяемых цифровых радиоприемных устройств, позволяющих сканировать диапазон в широкой полосе частот. При этом они позволяют производить измерения уровней помех и регистрировать их в базе данных. Результаты первичных измерений обрабатываются на основе методов статистической теории [10].

Обобщенные технические характеристики доступных программноопределяемых радиоприемных устройств, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщенные технические характеристики программноопределяемых радиоприемных устройств

Наименование РПУ	Диапазон измерения	Время сканирования	Диапазон полос пропускания	Масса, габариты	Примерная стоимость (руб)
SDRplay RSP2 Pro	0,1-2000 МГц	1 с-10 мин	8-20 кГц	0,112 кг (98×86×32 мм)	21 000
Rohde&Schwarz FSC6	0,9-6000 МГц	-	0,01-3000 кГц	4,5 кг (233×158×350 мм)	980 000
АКИП-4210/2	0,01-400 кГц	0,05 с	0,001-0,1 кГц	0,4 кг (250×86×27 мм)	85 000
АКИП-4205/1	0,009-2100 МГц	0,024-1 с	0,01-3200 кГц	4,6 кг (393×207×116 мм)	250 000
Protek A734	0,1-4400 МГц	0,01-2 с	0,0001-5000 кГц	1,6 кг (160×263×61 мм)	450 000
ASA-2332	0,009-3000 МГц	0,01-3 с	0,001-1000 кГц	6 кг (364×155×330 мм)	500 000
Arinst SSA LC	36-5999 МГц	0,3-40 с	120 кГц (фиксированная)	0,2 кг (122×67×16 мм)	13 000
Rohde&Schwarz FSL18	0,9-18000 МГц	-	0,3-10000 кГц	8 кг (233×158×350 мм)	2 700 000

Для определения своевременности, достоверности и точности результатов измерений, получаемых с помощью программноопределяемых радиоприемных устройств из таблицы 1 и устройствами, прошедшими метрологическую экспертизу, было проведено сравнение полученных результатов измерений.

На первом этапе осуществляется сравнительный количественный анализ результатов измерения эталонного и испытуемого РПУ, в диапазоне от 200 до 2000 МГц, подключенных к тестовому генератору, по типовой методике [11], суть которой заключается в формировании тестового сигнала с генератора Agilent N5181A MXG, при этом в ходе эксперимента к генератору поочередно напрямую подключались приемники R&S FSL18 и испытуемый. Результаты измерений уровня напряжения на выходах приемных устройств, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений уровня мощности
на выходах приемных устройств

Частота сигнала на выходе генератора Agilent N5181A MXG, МГц	Напряжение сигнала на выходе генератора Agilent N5181A MXG, дБм	Напряжение из- меренного сигнала, на выходе испы- туемого при- емника, дБм	Напряжение изме- ренного сигнала, на выходе приемника R&S FSL18, дБм
200	-60,0	-62,3	-65,0
300	-60,0	-60,3	-66,1
400	-60,0	-61,0	-66,0
500	-60,0	-66,0	-64,0
600	-60,0	-63,4	-66,0
700	-60,0	-64,5	-64,0
800	-60,0	-63,7	-64,8
1000	-60,0	-62,5	-64,6
1200	-60,0	-62,6	-64,6
1400	-60,0	-65,2	-64,2
1600	-60,0	-63,5	-64,3
1800	-60,0	-65,0	-64,2
2000	-60,0	-64,0	-64,2

На основе полученных данных, вычислено математическое ожидание [12] уровня мощности сигналов на выходах испытуемого и рекомендованного приемника, по формуле:

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i, \quad (3)$$

где n – количество частот на которых производится измерение; x_i – значение частоты на которой происходит измерение; p_i – вероятность значений уровня мощности сигнала.

Вычислено значение дисперсии мощности сигнала [12] по формуле:

$$D(x) = \sum_{i=1}^n [x_i - M(x)]^2 p_i, \quad (4)$$

а также произведен расчет среднеквадратических отклонений по формуле [12]:

$$\sigma = \sqrt{D(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (5)$$

Полученные результаты оценки значений дисперсии и среднеквадратического отклонения уровней мощности сигналов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты оценки значений дисперсии
и среднеквадратического отклонения уровней мощности сигналов

Вычисленная величина	Испытуемого при- емника	Приемника R&S FSL18
Математическое ожидание	-63,38 дБм	-64,77 дБм
Дисперсия	2,69 дБм ²	0,61 дБм ²
Среднеквадратическое отклонение	1,64 дБм	0,78 дБм

Анализ результатов работы испытуемого и рекомендованного приемного устройств, можно сделать вывод, что существует возможность применения испытуемого приемного устройства, с учетом полученных результатов.

На втором этапе, осуществляется сравнительный количественный анализ результатов измерения уровня сигналов в диапазоне 250-1800 МГц, в экранированной безэховой камере по типовой методике [11], суть которой заключается в формировании тестового сигнала с генератора Agilent N5181A MXG, при этом в ходе эксперимента испытывалось пять типов рекомендованных и одна испытуемая антенна. Применялись биконические, дипольные и широкополосные антенны (ШПА).

Результаты измерений в графической и табличной форме представлены на рис. 2 и в таблице 4, соответственно.

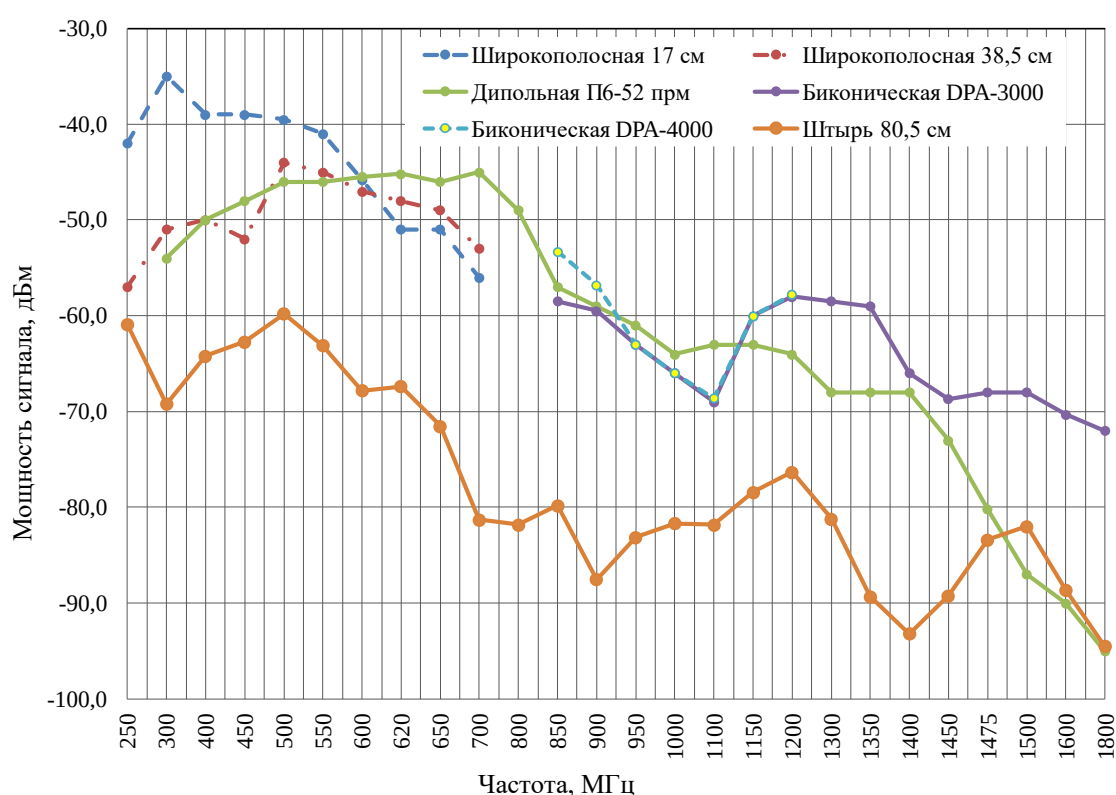


Рис. 2. Графическое представление результатов измерений

Результаты измерений в таблице 4 (колонки с 2 по 7) обработаны методами математической статистики, при этом в качестве показателя использован нормированный коэффициент корреляции [4], который вычисляется по формуле:

$$R_t(m) = \frac{1}{(n-m)\sigma_{x,T}^2} \sum_{i=1}^{n-m} [x(i) - x_T][x(i+m) - \bar{x}_T]. \quad (6)$$

где m – число не меняющихся во времени шагов дискретизации процесса с интервалами T ; остальные параметры имеют то же физический смысл что и для формул (4, 5).

Таблица 4 – Результаты измерений уровня с помощью различных антенн

Частота измерения, МГц	Значение уровня мощности сигнала, дБм					
	Испытуемая антенна	Рекомендованные антенны				
		Штырь 80,5 см	ШПА 17 см	ШПА 38 см	Дипольная П6-52	Биконическая DPA 3000
250	-60,9	-42,0	-57,0			
300	-69,2	-35,0	-51,0	-54,0		
400	-64,2	-39,0	-50,0	-50,0		
450	-62,7	-39,0	-52,0	-48,0		
500	-59,8	-39,5	-44,0	-46,0		
550	-63,1	-41,0	-45,0	-46,0		
600	-67,8	-45,8	-47,0	-45,5		
620	-67,4	-51,0	-48,0	-45,2		
650	-71,5	-51,0	-49,0	-46,0		
700	-81,3	-56,0	-53,0	-45,0		
800	-81,8			-49,0		
850	-79,8			-57,0	-58,5	-53,3
900	-87,5			-59,0	-59,5	-56,8
950	-83,1			-61,0	-63,0	-63,0
1000	-81,7			-64,0	-66,0	-66,0
1100	-81,8			-63,0	-69,0	-68,6
1150	-78,4			-63,0	-60,0	-60,0
1200	-76,3			-64,0	-58,0	-57,8
1300	-81,2			-68,0	-58,5	
1350	-89,3			-68,0	-59,0	
1400	-93,2			-68,0	-66,0	
1450	-89,2			-73,0	-68,7	
1475	-83,4			-80,2	-68,0	
1500	-82,0			-87,0	-68,0	
1600	-88,6			-90,0	-70,3	
1800	-94,5			-95,0	-72,0	

Были получены пять значений коэффициентов корреляции, между испытуемой и соответственно каждой из пяти рекомендованных антенн в предписанных частотных диапазонах, показанные в таблице 5.

А также произведено вычисление среднеквадратических отклонений, для каждой рекомендуемой и испытуемой антенной, по формуле (5) и результаты представлены в таблице 6.

Таблица 5 – Значение коэффициента корреляции между испытуемой антенной и каждой из рекомендованных

ШПА 17см	ШПА 38см	Дипольная П6-52	Биконическая DPA 3000	Биконическая DPA 4000
0,7267	0,2163	0,7391	0,5108	0,1176

Таблица 6. – Среднеквадратическое отклонение между
испытуемой антенной и каждой из рекомендованных

ШПА 17см	ШПА 38см	Дипольная П6-52	Биконическая DPA 3000	Биконическая DPA 4000
13,34 дБм	10,19 дБм	15,17 дБм	11,55 дБм	11,49 дБм

Анализ результатов измерений, представленных на рис. 2 и в таблице 4 показал, что штатные метрологически поверенные антенны в диапазоне 500-1400 МГц, систематически превышают результаты измерений исследуемой антенны, в среднем на 22,8 дБм.

Это позволяет сделать вывод, что существует возможность использовать испытуемую антенну с учетом полученных результатов и сформировать экспериментальную установку в составе: одно устройство из таблицы 1, с подключенной штыревой антенной (0,85 м), антенно-фидерное устройство (АФУ) и одна персональная электронная вычислительная машина (ПЭВМ), с установленным специальным программным обеспечением, входящим в комплект радиоприемного устройства (РПУ).

Структурная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

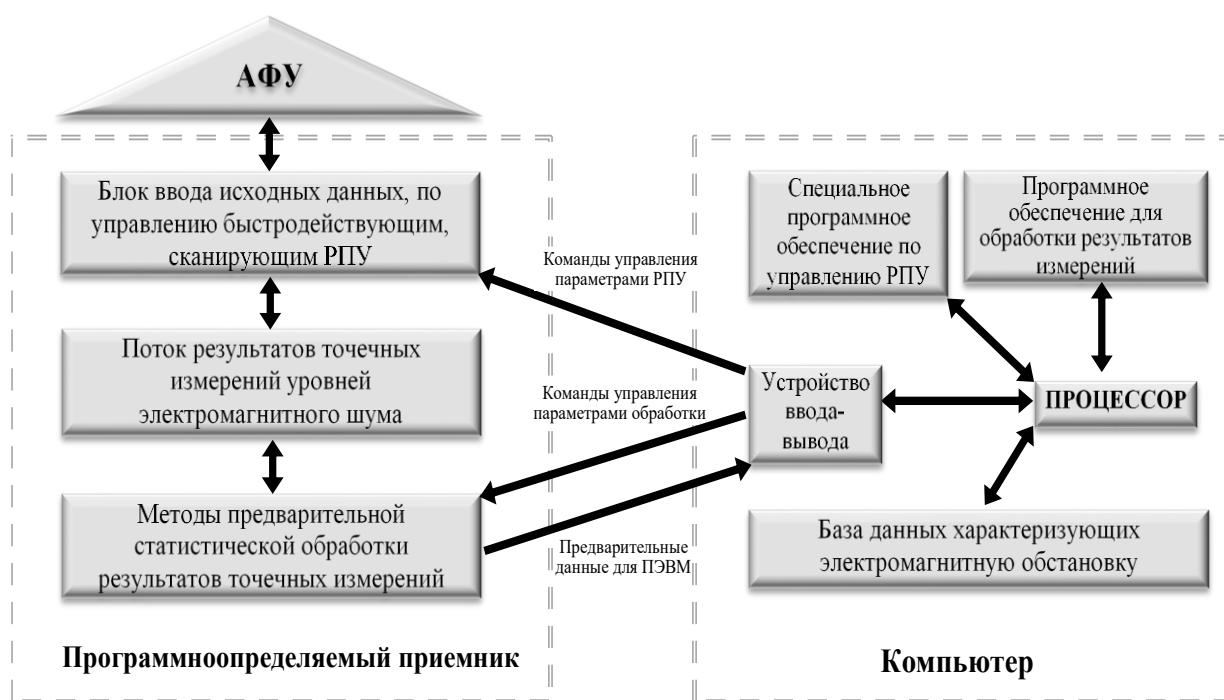


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

Целью измерений уровня помех является:

- оценка математического ожидания и дисперсии мощности электромагнитных помех для исследуемых диапазонов частот;
- оценка стабильности параметров электромагнитной обстановки в зависимости от времени, местоположения и стационарности уровней сигналов на соседних частотах.

Алгоритм сбора и фиксации данных об уровне помех предопределяется сформулированными целями, техническими характеристиками РПУ, вычислительных средств и программного обеспечения.

В условиях априорной неопределенности первоначальный сбор данных осуществляется следующим образом:

- производится измерение мощности сигнала в полосе 30-2000 МГц;
- шаг изменения номинала измеряемой частоты 1 МГц;
- полоса измерения на каждой несущей частоте 20 кГц с шагом 1 кГц, при этом фиксируется усредненный результат 20 измерений.

Технические параметры экспериментальной установки позволяют осуществлять измерения в выбранном диапазоне за время менее 60 мин.

Пример формы фиксации и фрагмент результатов измерений представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Форма фиксации и фрагмент результатов измерений

Частота, МГц	Время измерения, ч:мин и результат, дБм										
	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00
30	-83,30	-72,50	-71,27	-78,20	-77,95	-71,45	-80,13	-67,30	-75,40	-81,03	-82,07
40	-92,25	-96,20	-98,30	-94,60	-97,65	-94,65	-96,50	-93,50	-93,50	-97,05	-96,50
50	-62,70	-79,63	-63,55	-82,83	-79,23	-75,63	-72,23	-58,95	-58,10	-70,47	-78,17
60	-83,75	-83,25	-84,37	-83,50	-83,70	-80,50	-82,30	-80,77	-81,50	-84,40	-87,40
70	-88,15	-88,33	-88,75	-91,80	-91,80	-90,23	-89,73	-88,25	-88,65	-88,17	-91,20
80	-84,80	-85,65	-85,43	-83,85	-87,37	-84,10	-85,45	-85,63	-86,43	-84,15	-85,55
90	-84,40	-86,40	-83,50	-83,05	-83,40	-81,60	-85,07	-84,55	-85,20	-81,95	-79,95
100	-86,13	-86,85	-85,77	-85,67	-85,70	-85,50	-86,35	-85,85	-86,67	-84,83	-84,90

В результате измерения, были получены 24 реализации реальных данных об уровне мощности помех в исследуемом диапазоне через каждый час, начиная с 22:00 по 21:59 следующего дня (рис. 4).

На графике (рис. 4) показано значение мощности электромагнитных помех в заданном диапазоне с интервалом 1 ч.

Анализ этих данных, позволяет ставить задачу выявления полос частот с устойчивыми математическим ожиданием и заданной дисперсией уровня помех.

По результатам измерений было вычислено математическое ожидание и дисперсия, уровня мощности электромагнитных помех на каждой частоте в течении одних суток – выражения (3, 4).

Результаты оценки математического ожидания мощности помех $M(x)$ представлены на рис. 5.

Результаты количественной оценки математического ожидания и дисперсии, позволяют утверждать, что объективно можно выделить последовательно следующие поддиапазоны с квазиоднородными характеристиками значения уровня электромагнитных помех. При этом дисперсия не превышает некоторого порога.

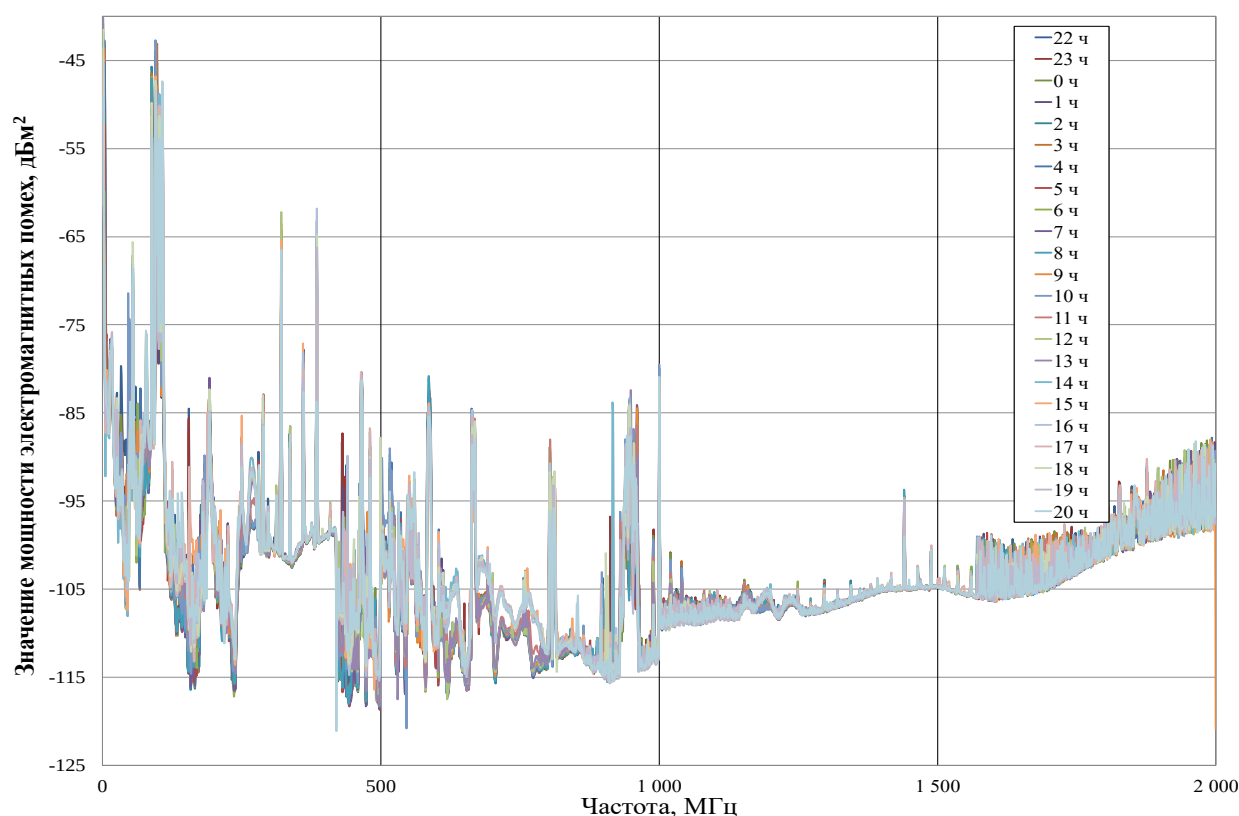


Рис. 4. Графическое представление почасовых реализаций значений уровня мощности электромагнитных помех в течении одних суток

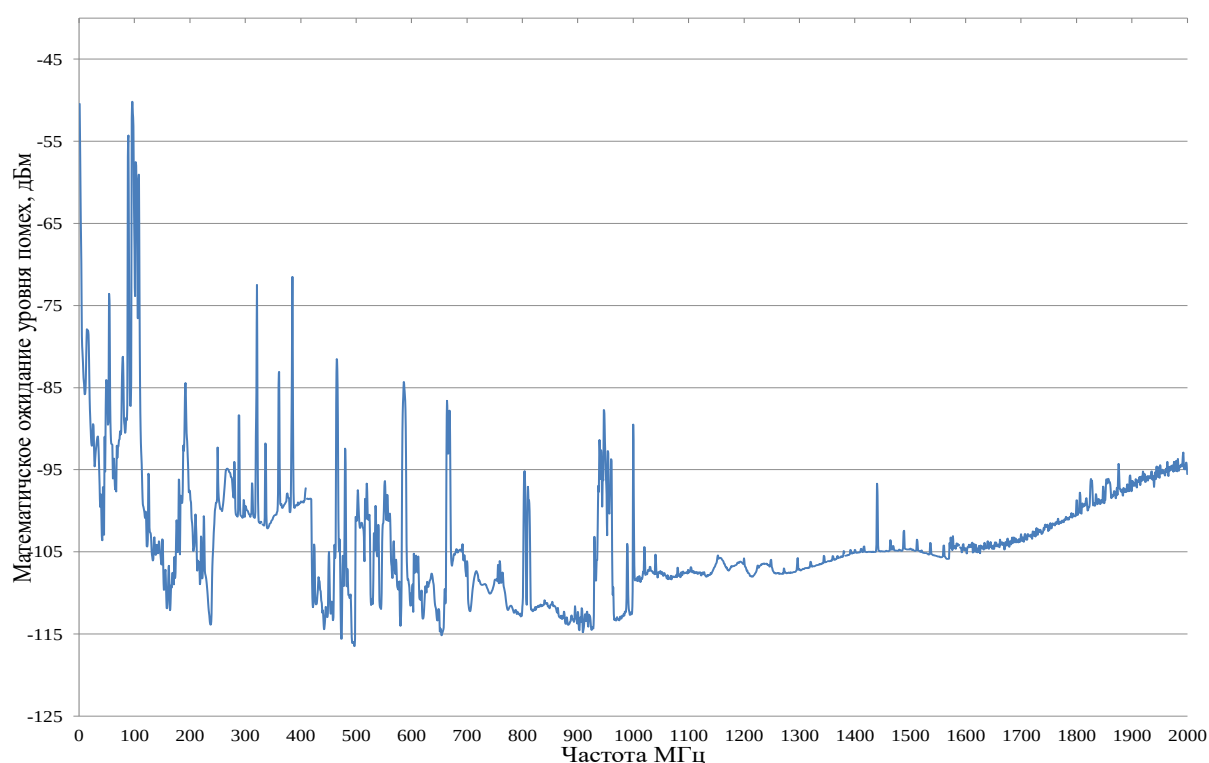


Рис. 5. Результаты оценки математического ожидания мощности помех

Так, на в интервале от 30 МГц до 1000 МГц среднее значение дисперсии уровня помехи составляет $6,27 \text{ дБм}^2$, начиная с 1000 МГц до 1571 МГц среднее значение дисперсии составляет $0,50 \text{ дБм}^2$, а начиная с 1571 МГц по 2000 МГц

среднее значение дисперсии равно $2,7 \text{ дБм}^2$. Таким образом, весь исследуемый УКВ диапазон можно декомпозировать на три поддиапазона, со сходными сигнально-помеховыми характеристиками:

- 1) поддиапазон 30-1000 МГц, со средним значением дисперсии мощности помехи $6,27 \text{ дБм}^2$;
- 2) поддиапазон 1000-1571 МГц, со средним значением дисперсии мощности помехи $0,50 \text{ дБм}^2$;
- 3) поддиапазон 1571-2000 МГц, со средним значением дисперсии мощности помехи $2,7 \text{ дБм}^2$.

Результаты расчета дисперсии мощности помех $D(x)$ представлены на рис. 6.

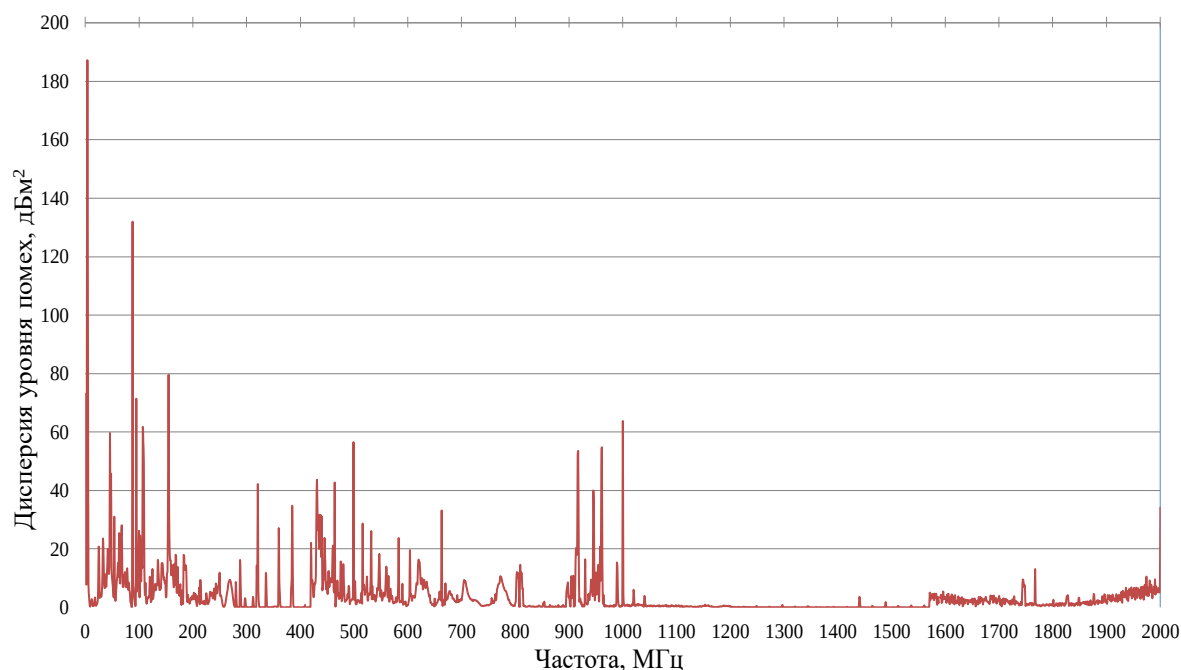


Рис. 6. Результаты оценки дисперсии мощности помех

Предложенная экспериментальная методика и полученные результаты, являются основой для дальнейших экспериментальных исследований свойств УКВ диапазона.

В ходе исследований решены задачи определения:

- времени квазистационарного состояния помеховой обстановки, как функция времени для заданных полос частот;
- зависимость уровня помех в заданной полосе частот как функции частотного разнеса между исследуемыми частотными диапазонами;
- зависимость изменения уровня помех от местоположения полосы частот на частотной оси.

Решение этих задач может существенно сократить число необходимых измерений без существенного снижения достоверности, при периодическом контроле уровня помех.

В качестве показателя, на первом этапе использовался нормированный коэффициент корреляции для случайных величин – выражение (6).

Коэффициент корреляции принадлежит интервалу от -1 до +1. При этом считается, что две случайные величины коррелированы, если совпадает характер изменения. Попытка его использования для решения задачи по определению полосы частот относительно заданного значения, в которой уровни помех отличаются не более чем на заданную величину, показала, что коэффициент корреляции зависит от характера взаимного изменения величин уровня мощности сигнала и фактически не чувствителен к уровням сравниваемых случайных величин. Применительно к решаемой задаче принципиально важен уровень сравниваемых случайных величин, а характер их взаимного изменения практически не имеет значения. В этой связи был сделан вывод о неприменимости коэффициента корреляции для решения задачи.

В классическом случае коэффициент сходства Рассела-Рао применим для сравнения бинарных величин. В рамках решаемой задачи, уровни мощности помех изменяются в значительных пределах.

Для решения поставленной задачи, классический коэффициент сходства Рассела-Рао [13], был модифицирован, применительно к решаемым задачам.

В дальнейшем, при исследовании был использован модифицированный коэффициент сходства Рассела-Рао:

$$K_{cx} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i, \quad (7)$$

где N – количество сравниваемых значений уровня мощности помех; K_i – коэффициент сходства между значениями уровней мощности помех характеризующийся отношением меньшего значения уровня мощности помехи к большему, в различные моменты времени на одной частоте.

Суть модификации классического коэффициента сходства Рассела-Рао, заключается в переходе от попарного бинарного сопоставления элементарных признаков к использованию нормированного коэффициента сравниваемых значений уровня мощности.

В рамках решаемой задачи, количество сравниваемых значений уровня мощности помех устанавливается как $N=1$. Уровни мощности помех изменяются в значительных пределах, коэффициент сходства K_{cx} между измеряемым $x(i)$ и заданным x' значениями, характеризующийся отношением меньшего значения к большему и рассчитываемый по формуле:

$$K_{cx} = \frac{l_{\min}}{l_{\max}}, \quad (8)$$

$l_{\max}=x$, если значение $x(i) < x'$, в противном случае $l_{\max}=x(i)$; $l_{\min}=x(i)$; если значение $x(i) < x$, в противном случае $l_{\min}=x$.

Примеры применения методики

Пример 1. В первом примере, для проведения эксперимента по исследованию стационарности уровня помех, в каждом из установленных при предыдущем исследовании диапазонов, выбраны более узкие поддиапазоны 400-600, 1200-1400 и 1700-1900 МГц, внутри которых были взяты за исходные средние значения частотных диапазонов – 500, 1300 и 1800 МГц, соответственно [14].

Экспериментальная методика по оценке стационарности уровня помех, реализована следующим образом:

- в течении суток производится измерение уровня помех в диапазоне от 30 до 2000 МГц с фиксацией результатов через 1 ч;
- с результатами первого измерения производится вычисления коэффициента сходства K_{cx} в течении суток для каждой частоты;
- пороговый коэффициент сходства варьируется для различных частот с целью определения степени чувствительности используемого показателя.

Результаты, полученные в исходный момент времени, сопоставляются с аналогичным результатами, полученными с периодичностью 1 ч;

В качестве показателя стационарности уровня помех использован модифицированный коэффициент сходства Рассела-Рао.

Для проведения последующего анализа полученных результатов зададим, для диапазона 400-600 МГц зададим показательное для этого диапазона, значение порогового уровня коэффициента сходства $\varepsilon=0,9$.

Результаты оценки коэффициента сходства K_{cx} на частоте 500 МГц в диапазоне 400-600 МГц представлены в виде графика. (Рис. 7)

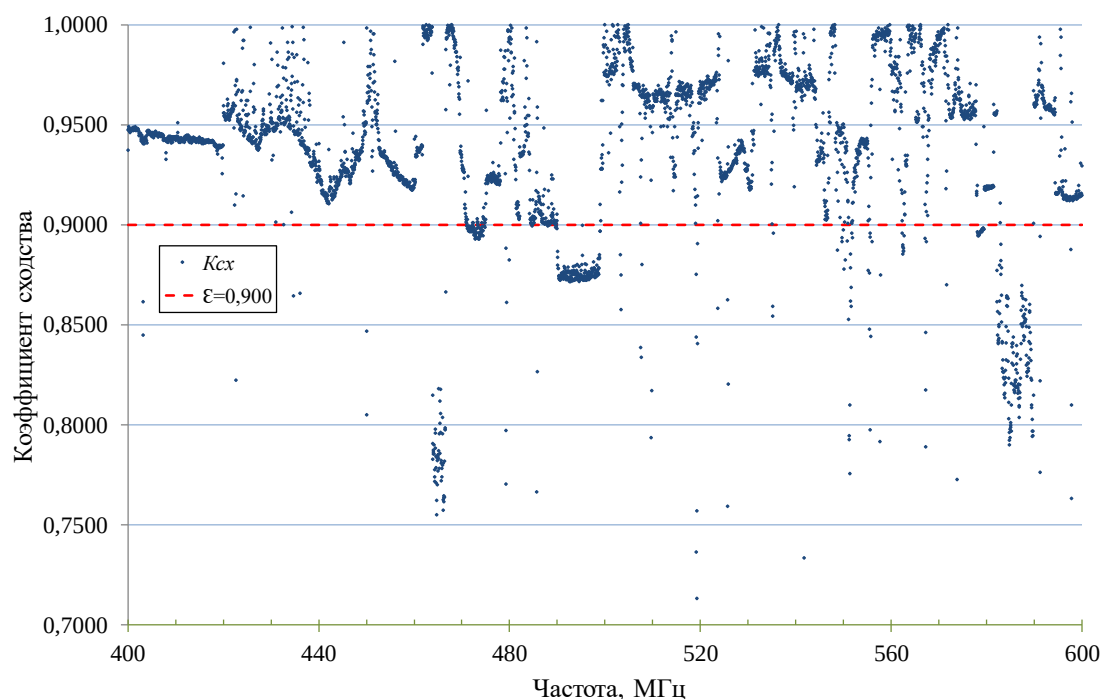


Рис. 7. Значение коэффициента сходства K_{cx} на частоте 500 МГц в диапазоне 400-600 МГц

Из графика (рис. 7) видно, что в диапазоне частот 400-600 МГц значение средней полосы частот, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,9 для любой случайно выбранной пары частот, составляет не менее 2,8 МГц.

Для проведения анализа полученных результатов в диапазоне 1200-1400 МГц зададим показательное для этого диапазона, значение порогового уровня коэффициента сходства $\varepsilon=0,995$.

Результаты вычисления коэффициента сходства K_{cx} на частоте 1300 МГц в диапазоне 1200-1400 МГц представлены в виде графика (рис. 8).

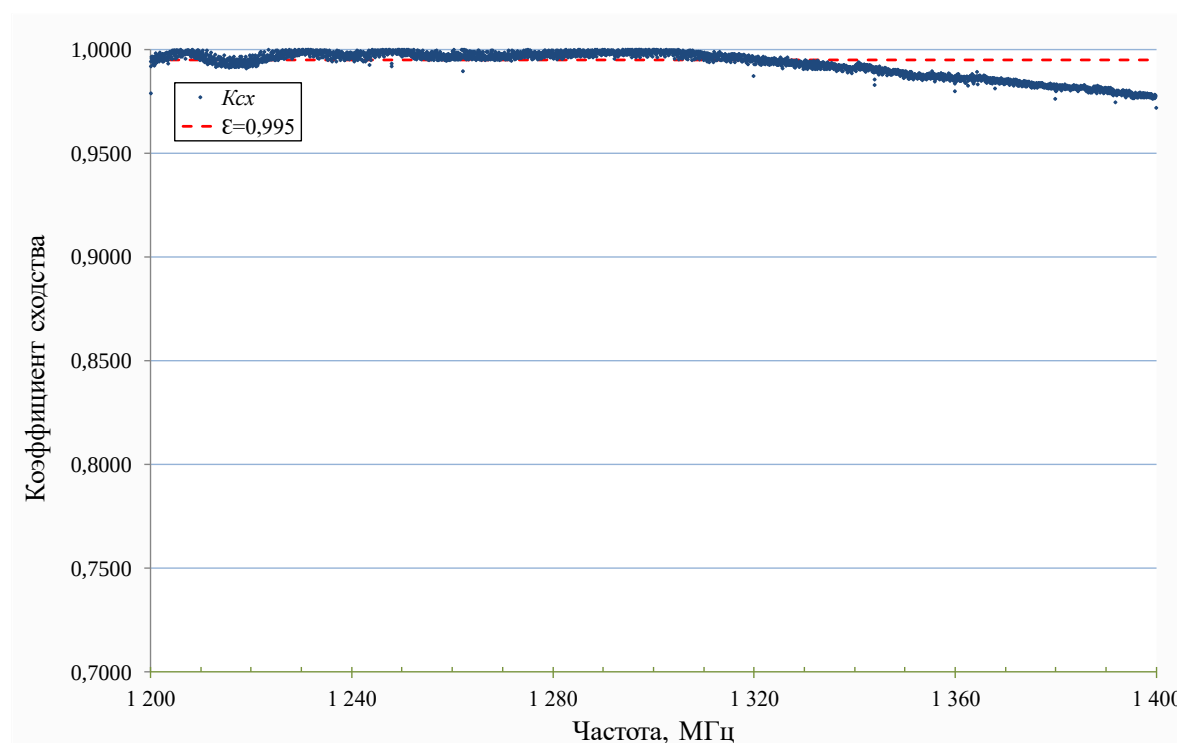


Рис. 8. Значение коэффициента сходства K_{cx} на частоте 1300 МГц в диапазоне 1200-1400 МГц

Из графика (рис. 8) видно, что в диапазоне частот 1200-1400 МГц значение средней полосы частот, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,995 для любой случайно выбранной пары частот, составляет не менее 0,568 МГц.

Для проведения анализа полученных результатов в диапазоне 1700-1900 МГц зададим показательное для этого диапазона, значение порогового уровня коэффициента сходства $\varepsilon=0,98$.

Результаты вычисления коэффициента сходства K_{cx} на частоте 1800 МГц в диапазоне 1700-1900 МГц представлены в виде графика (рис. 9).

Из графика (рис. 9) видно, что в диапазоне частот 1700-1900 МГц значение средней полосы частот, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,98 для любой случайно выбранной пары частот, составляет не менее 0,211 МГц.

Таким образом, без существенной потери достоверности, количество измерений уровней мощности помех можно существенно сократить. Необходимое количество измерений зависит как от помеховой обстановки, в том или ином диапазоне, так и от выбранного значения порогового уровня коэффициента сходства, то есть необходимого уровня достоверности. Например, контроль уровня мощности помех для диапазона 400-600 МГц с пороговым уровнем 0,9 может быть осуществлен всего на 72 частотах.

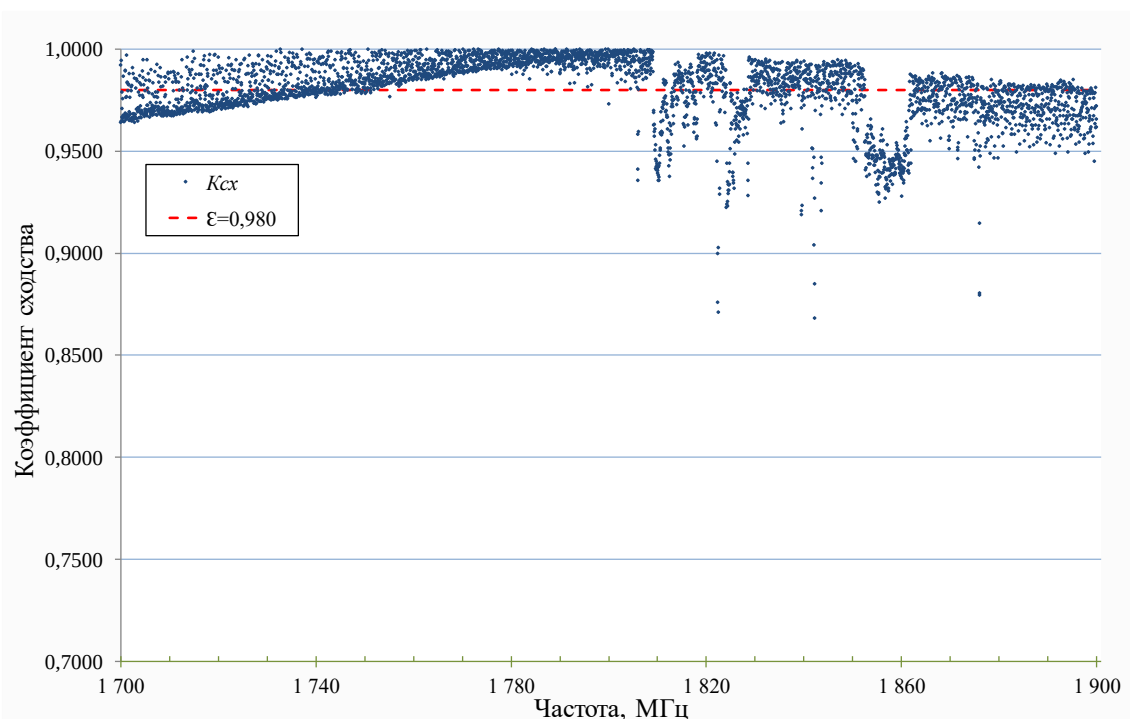


Рис. 9. Значение коэффициента схождения K_{cx} на частоте 1800 МГц в диапазоне 1700-1900 МГц

Можно сделать вывод что, в различных диапазонах частот, с заданным определенным пороговым уровнем схождения, существует возможность существенно сокращения числа измерений при сохранении требуемого уровня достоверности.

Полученные результаты, являются основой для объективных рекомендаций по требуемому количеству частот, на которых необходимо измерять уровень помех в заданном частотном диапазоне.

Пример 2. Также практический интерес представляет задача по определению временных интервалов стационарности уровня мощности помех в УКВ диапазоне. Для получения этих данных, был проведен эксперимент [15].

Эксперимент реализован следующим образом:

- в течении суток производится измерение уровня мощности помех в диапазоне от 30 до 2000 МГц с фиксацией результатов через 1 ч;
- с результатами первого измерения производится вычисления коэффициента схождения K_{cx} в течении суток для каждой частоты результаты, полученные в исходный момент времени, сопоставляются с аналогичными результатами, полученными с периодичностью 1 ч.

В качестве показателя стационарности помех использован модифицированный коэффициент схождения Рассела-Рао – выражения (7, 8).

Решение этой задачи может существенно сократить число необходимых измерений уровня мощности помех для получения достоверных данных об электромагнитной обстановке. Кроме того, результаты исследования могут быть полезны для обоснования выбора полосы частот для средств использующих широкополосную связь с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

В ходе эксперимента измерения уровня мощности помех проводились в диапазоне 30-2000 МГц с шагом 1 МГц, полоса пропускания 20 кГц с шагом через 1 кГц по 10 раз с нахождением и фиксацией среднего значения уровня мощности, каждый час (итого за сутки 24 измерения на каждой частоте), производился замер уровня помех в дБ относительно 1 мВ, на каждой частоте. (всего около 50 тысяч измерений). При этом, технические параметры аппаратуры позволяют осуществлять измерения в заданной полосе от 30 МГц до 2 ГГц каждый час.

Пример формы фиксации результатов измерений уровней помех, представлен в таблице 7. В результате измерения были получены 24 реализации реальных данных об уровне помех через каждый час в определенном месте (рис. 4). Фрагмент оценки коэффициентов сходства представлен в таблице 8. Результаты, отраженные в таблице 8, для лучшего восприятия представлены в визуальной форме на рис. 10.

Таблица 8 – Результаты оценки коэффициентов сходства уровней мощности помех во времени.

Частота, МГц	Время измерения, ч:мин и значение коэффициента сходства										
	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00
30	1,0000	0,8703	0,8555	0,9388	0,9358	0,8577	0,9620	0,8079	0,9052	0,9728	0,9852
40	1,0000	0,9589	0,9385	0,9752	0,9447	0,9746	0,9560	0,9866	0,9866	0,9505	0,9560
50	1,0000	0,7874	0,9866	0,7569	0,7913	0,8290	0,8680	0,9402	0,9266	0,8898	0,8021
60	1,0000	0,9940	0,9927	0,9970	0,9994	0,9612	0,9827	0,9644	0,9731	0,9923	0,9582
70	1,0000	0,9979	0,9932	0,9602	0,9602	0,9769	0,9824	0,9989	0,9944	0,9998	0,9666
80	1,0000	0,9901	0,9926	0,9888	0,9706	0,9917	0,9924	0,9903	0,9811	0,9923	0,9912
90	1,0000	0,9769	0,9893	0,9840	0,9882	0,9668	0,9922	0,9982	0,9906	0,9710	0,9473
100	1,0000	0,9917	0,9957	0,9946	0,9950	0,9926	0,9975	0,9967	0,9938	0,9849	0,9857

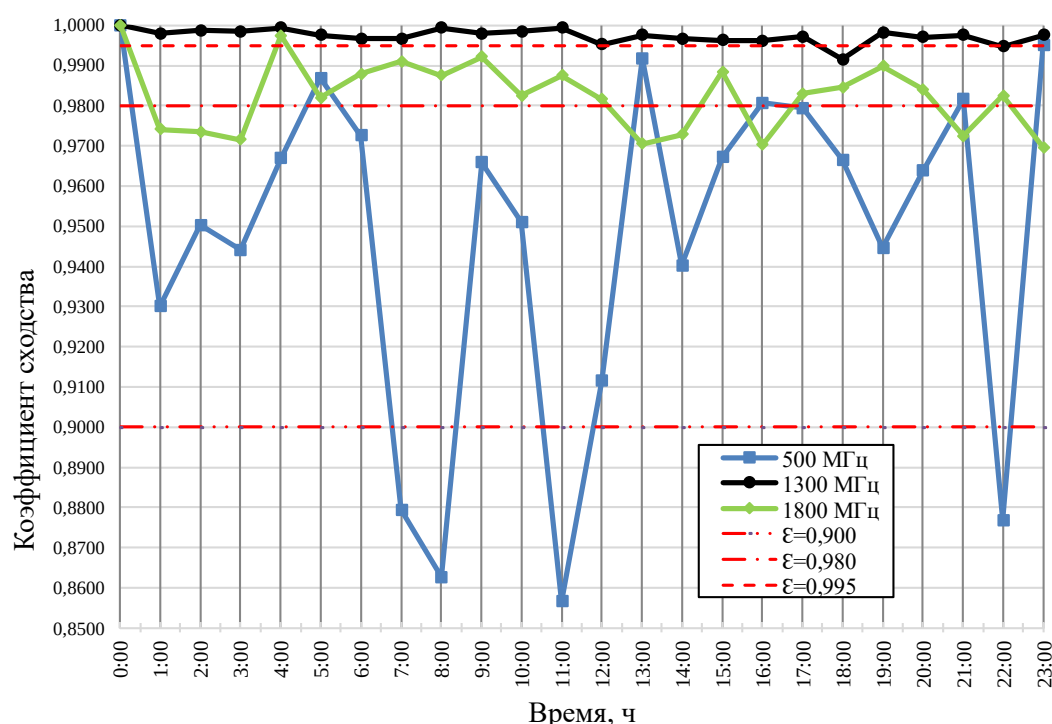


Рис. 10. График значений коэффициента сходства уровня мощности помех в течении суток

После расчета коэффициентов сходства как функции времени $K_{cx}=f(t)$ появляется возможность определения количества измерений квазистационарности уровня помех для исследуемой полосы частот.

Для реализации такого подхода необходимо для каждого диапазона задать пороговым уровнем ε , равным 0,9 для диапазона 400-600 МГц, равным 0,995 для диапазона 1200-1400 МГц и равным 0,98 для диапазона 1700-1900 МГц. Это позволяет сформировать на суточном интервале времени последовательность частных интервалов времени с заданным уровнем стационарности.

Частные интервалы стационарности формируются на основе рассчитанных данных, фрагмент которых представлен на рис. 10.

Из графика (рис. 10) видно, что в диапазоне частот 400-600 МГц значение длительности минимального интервала времени, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,9 для любого случайно выбранного диапазона времени, составляет не менее 0,8 ч.

В диапазоне частот 400-600 МГц значение длительности во времени среднего интервала, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,9 для любого случайно выбранного диапазона времени, составляет не менее 4,95 ч.

В диапазоне частот 1200-1400 МГц значение длительности во времени минимального интервала, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,995 для любого случайно выбранного диапазона времени, составляет не менее 4,5 ч.

В диапазоне частот 1200-1400 МГц значение длительности во времени среднего интервала, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,995 для любого случайно выбранного диапазона времени, составляет не менее 11 ч.

В диапазоне частот 1700-1900 МГц значение длительности во времени минимального интервала, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,98 для любого случайно выбранного диапазона времени, составляет не менее 0,8 ч.

В диапазоне частот 1700-1900 МГц значение длительности во времени среднего интервала, в котором вероятность сходства уровня помех превышает 0,995 для любого случайно выбранного диапазона времени, составляет не менее 2,93 ч.

Таким образом, без существенной потери достоверности, количество моментов времени в которые необходимо проводить измерения уровней мощности помех можно существенно сократить. Длительность между моментами времени, в которых производятся изменения, зависит как от помеховой обстановки, в том или ином диапазоне, так и от выбранного значения порогового уровня. Например, контроль уровня помех для диапазона 400-600 МГц с пороговым уровнем 0,9 может быть осуществлен всего 5 раз за сутки.

Полученные результаты, являются основой для объективных рекомендаций по требуемым временным интервалам контроля электромагнитной обстановки.

В дальнейших экспериментах целесообразно продолжить исследование, путем увеличения времени наблюдения.

Применение описанной методики позволит объективно сформировать системы мониторинга электромагнитной обстановки УКВ диапазона, с заданными качественными параметрами, а также решить эту задачу по контролю за электромагнитной обстановкой за адекватное время, при небольшом количестве персонала и доступными техническими средствами. Кроме того, результаты исследования могут быть полезны для обоснования выбора полосы частот для средств использующих широкополосную связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.

Выводы

1. Полученные результаты позволяют сократить количество измерений при мониторинге электромагнитной обстановки, без потери качества получаемой информации, как по количеству контролируемых полос, так и по периодичности контроля.

2. Существенное различие уровня помех в рамках исследуемого частотного диапазона вызывает необходимость разработки методики оценки стоимости использования тех или иных полос частот.

3. Обобщение результатов исследования позволяет сформулировать гипотезу об уникальности набора параметров, характеризующих помехи в различных областях пространства, но ее подтверждение требует дополнительных экспериментов.

4. Необходимо решать задачу исследования стационарности уровня мощности помех на одних и тех же частотах в одно и тоже время, как функцию расстояния между приемником и источниками помех.

Литература

1. Стародубцев Ю. И., Сухорукова Е. В., Чукариков А. Г. Методика выявления критически важных элементов информационно-телекоммуникационных систем // Проблемы экономики и управления в торговле и промышленности. 2014. № 1 (5). С. 95-101.

2. ГОСТ Р 50397-2011 Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения – М.: Стандартинформ, 2013. – 56 с.

3. Финк Л. М. Сигналы, помехи, ошибки... заметки о некоторых неожиданностях, парадоксах и заблуждениях в теории связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

4. Комарович В. Ф., Сосунов В. Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи. – М.: Связь. 1977. – 136 с.

5. ГОСТ 30805.16.2.3-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Методы измерений параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Измерение излучаемых радиопомех. – М.: Стандартинформ, 2014. – 73 с.

6. ГОСТ 30805.22-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений. – М.: Стандартинформ, 2015. – 63 с.

7. ГОСТ 30805.16.1.1-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. Приборы для измерения промышленных радиопомех. – М.: Стандартинформ, 2014, – 56 с.

8. Постановление Правительства Российской Федерации от 24 декабря 2009 г. N 1085. О внесении изменений в Таблицу распределения полос частот между радиослужбами Российской Федерации // Собрание законодательства Российской Федерации. 2009. N 52. ст. 6608.

9. О связи. Федеральный закон РФ от 07.07.2003 № 126-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации от 14 июля 2003 г. № 28. ст. 2895.

10. Левин Б. Р. Статистическая теория связи и ее практические приложения. – М: Связь. 1979. – 569 с.

11. ГОСТ 16-1-4-2013 Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1-4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения излучаемых помех. – М.: Стандартинформ, 2015. – 43 с.

12. Гмуран В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. – М: Высшая школа, 2003. – 479 с.

13. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия – М.: Финансы и статистика, 1988. 342 с.

14. Стародубцев Ю. И., Акишин А. В., Алашеев В. В., Экспериментальная методика и результаты оценки стационарности уровня помех в ультракоротковолновом диапазоне // Проблемы технического обеспечения войск в современных условиях Труды III Межвузовской научно-практической конференции. – СПб: ВАС, 2018. – С. 62-66.

15. Стародубцев Ю. И., Акишин А. В., Бречко А. А., Экспериментальная методика и результаты оценки временной устойчивости уровня помех в ультракоротковолновом диапазоне до 2 гигагерц // XXIV научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь». Т. 1. – Воронеж: Созвездие, 2018. – С. 397-402.

References

1. Starodubtsev Yu. I., Sukhorukova E. V., Chukarikov A. G. Metodika vyivleniia kriticheski vazhnykh elementov informatsionno-telekommunikatsionnykh sistem [Technique of identification of crucial elements of informational and telecommunication systems]. *Problemy ekonomiki i upravleniia v torgovle i promyshlennosti*, 2014, vol. 5, no. 1, pp. 95-101. (in Russian)

2. State Standard 50397-2011. Compatibility of technical means electromagnetic. Terms and definitions. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 56 p. (in Russian).

3. Fink L. M. *Signaly, pomekhi, oshibki... zametki o nekotorykh neozhidannostiakh, paradoksakh i zabluzhdeniiakh v teorii svyazi* [Signals, hindrances, mistakes ... notes about some surprises, paradoxes and delusions in the theory of communication]. Moscow, Radio i svyaz publ., 1984. 256 p. (in Russian).

4. Komarov V. F., Sosunov V. N. *Sluchainye radiopomekhi i nadezhnost' KV svyazi*. [Random radio interferences and reliability of HF of communication]. Moscow, Svyaz Publ., 1977. 136 p. (in Russian)

5. State Standard 30805.16.2.3-2013. Compatibility of technical means electromagnetic. Requirements to the equipment for measurement of parameters of industrial radio interferences and noise stability and methods of measurements. Methods of measurements of parameters of industrial radio interferences and noise stability. Measurement of emitted radio interferences. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 73 p. (in Russian).

6. State Standard 30805.22-2013. Compatibility of technical means electromagnetic. Inventory of information technologies. Industrial radio interferences. Norms and methods of measurements. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 63 p. (in Russian).

7. State Standard 30805.16.1.1-2013. Compatibility of technical means electromagnetic. Requirements to the equipment for measurement of parameters of industrial radio interferences and noise stability and methods of measurements. The equipment for measurement of parameters of industrial radio interferences and noise stability. Devices for measurement of industrial radio interferences. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 56 p. (in Russian).

8. Resolution of the Government of the Russian Federation of December 24, 2009 no. 1085. «About modification of the Table of distribution of frequency bands between radio services of the Russian Federation». *Rossiiskaia hazeta* [Russian Newspaper], 2009, no. 52, 6608 p. (in Russian).

9. The federal law of the Russian Federation of 07.07.2003 no. 126-FZ «About communication». *Rossiiskaia hazeta* [Russian Newspaper], 2011, no. 28 (in Russian).

10. Levin B. R., *Statisticheskaya teoriya svyazi i ee prakticheskie prilozheniia* [Statistical theory of communication and its practical applications]. Moscow, Svyaz Publ., 1979. 569 p. (in Russian).

11. State Standard 16-1-4-2013 Compatibility of technical means electromagnetic. Requirements to the equipment for measurement of parameters of industrial radio interferences and noise stability and methods of measurements. Part 1-4. The equipment for measurement of radio interferences and noise stability. Antennas and test platforms for measurement of emitted hindrances. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 43 p. (in Russian).

12. Gmuran V. E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie* [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 2003. 479 p. (in Russian).

13. Zhambiu M. *Ierarkhicheskii klaster-analiz i sootvetstviia* [Hierarchical cluster analysis and compliances]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1988. 342 p. (in Russian).

14. Starodubtsev Yu. I., Akishin A. V., Alasheev V. V., *Eksperimental'naia metodika i rezul'taty otsenki statsionarnosti urovnia pomekh v ul'trakorotkovolnovom diapazone* [The experimental technique and results of assessment of a stationarity of an interference level in the VHF wave range]. *Trudy III Mezhvuzovskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Problemy tekhnicheskogo obespecheniia voisk v sovremennykh usloviakh"* [Works III of the Interuniversity scientific and practical conference. Problems of a hardware of troops in the modern conditions]. St Petersburg, Military Academy of Communication, 2018. pp. 62-66. (in Russian).

15. Starodubtsev Yu. I., Akishin A. V., Brechko A. A., *Eksperimental'naia metodika i rezul'taty otsenki vremennoi ustoichivosti urovnia pomekh v ul'trakorotkovolnovom diapazone do 2 gigagerts* [The experimental technique and results of assessment of temporary stability of an interference level in the ultrashort-wave range up to 2 gigacycles] *XXIV nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia «Radiolokatsiia, navigatsiia, sviaz'»*. [XXIV scientific and technical conference]. Voronezh, Sozvezdie Publ., 2018, no. 1, pp. 397-402 (in Russian).

Статья поступила 26 октября 2018 г.

Информация об авторах

Стародубцев Юрий Иванович – доктор военных наук, профессор. Профессор кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения. Военная академия связи. Область научных интересов: информационная безопасность. E-mail: prof.starodubtsev@gmail.com

Акишин Андрей Владимирович – адъюнкт кафедры безопасности инфокоммуникационных систем специального назначения. Военная академия связи. Область научных интересов: информационная безопасность. E-mail: akishin1977@mail.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

The Experimental Technique and Results of Data Processing about an Electromagnetic Situation on Very High Frequency

Yu. I. Starodubtsev, A. V. Akishin

Problem Statement. Now the number of the radio-electronic equipment of different function operating in the very high frequency (VHF) continuously grows. It is necessary to possess objective to data on an interference level and the nature of their change for justification of performance characteristics of the transmitting and receiving devices and also antenna-feeder arrangement. However such data which are characterized by the given accuracy and reliability are practically absent. In this regard the problem of development of the experimental technique of obtaining objective data on an electromagnetic situation is relevant. **The objective** of this paper is to determine the time of a quasi-stationary condition of an interfering situation as function of time for the given frequency bands. Determination of dependence of an interference level in the given frequency band as function of the frequency rating between the investigated frequency

ranges and also dependence of an interference level change on location of a frequency band on the frequency axis. **Methods.** Comparative quantitative analysis of measurement results, natural experiments and methods of statistical processing. **Novelty.** The perversity of application of a coefficient of correlation is shown and the possibility of application of the modified coefficient of Russell-Rao is proved. **Results.** Occurrence of opportunity of reduction of quantity and duration of monitoring of an electromagnetic situation without significant loss of reliability of the received data. **Practical relevance.** The developed technique allows to obtain the quantitative data on an electromagnetic situation in the given territory with the required accuracy and reliability.

Key words: electromagnetic situation, software defined radio receiver, radio service, table of frequency bands allocations, interference, monitoring.

Information about Authors

Yury Ivanovich Starodubtsev – Dr. of Military Sciences, Full professor. Professor at the Department of infocommunication systems of special purpose. Military academy of communication. Field of research: information security. E-mail: prof.starodubtsev@gmail.com

Andrey Vladimirovich Akishin – postgraduate student at Department of infocommunication systems of special purpose. Military academy of communication. Field of research: information security. E-mail: akishin1977@mail.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.