

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

Научная статья

УДК 621.371

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.4.6>

Метод одновременного многочастотного тестирования ионосферных КВ-радиоканалов при дистанционном управлении обработкой и анализом данных

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, А. А. Елсуков[✉], Н. А. Конкин

Поволжский государственный технологический университет,
Российская Федерация, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3
ElsukovAA@volgatech.net[✉]

Аннотация. Рассмотрен подход к созданию интеллектуальной системы диагностики ионосферы, КВ-радиоканала и машинного обучения системы КВ-связи. Разработаны методики и алгоритмы работы системы удалённого управления зондированием ионосферы и одновременным тестированием множества частотных широкополосных КВ-радиоканалов. Представлен созданный протокол сетевого взаимодействия и архитектура программных средств удалённого управления системой диагностики при изменении области решаемых задач. Основной областью применения результатов является когнитивная КВ-связь, поскольку она способствует обеспечению более равномерного использования парциальных каналов связи, повышению её помехоустойчивости, увеличению производительности модемов и снижению излучаемой мощности.

Ключевые слова: ионосфера; вертикальное зондирование; многочастотный сигнал; PSK; OFDM; MCPSK; дистанционное управление

Финансирование: работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований: проект № 20-07-00268.

Введение. В настоящее время наблюдается интерес к расширению области применения шумоподобных составных широкополосных сигналов [1, 2]. Их особенностью является одновременное формирование радиоимпульсов на сетке поднесущих. Такие сигналы относятся к классу частотноразделённых парциалов (FDM – frequency division multiplexing). Увеличение числа парциалов повышает

качество работы систем связи, локации и радиозондирования [3]. Максимальный эффект достигается при компактном спектре группы парциалов [4], когда они ортогональны между собой, т. е. в случае выполнения условия мультиплексирования с ортогональным частотным разделением (OFDM – Orthogonal frequency-division multiplexing). Поскольку парциалы с разными несущими занимают в частотной

© Иванов Д. В., Иванов В. А., Елсуков А. А., Конкин Н. А., 2021.

Для цитирования: Иванов Д. В., Иванов В. А., Елсуков А. А., Конкин Н. А. Метод одновременного многочастотного тестирования ионосферных КВ-радиоканалов при дистанционном управлении обработкой и анализом данных // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 4 (52). С. 6-23. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.4.6>

области радиоканалы, то проблема компактификации за счёт ортогонального уплотнения относится и к анализу перекрывающихся радиоканалов.

В КВ-связи парциальный радиоканал в основном занимает полосу 3 кГц. Увеличивая кратность таких каналов, можно получить кратное увеличение производительности модема. При кратности 16 широкополосный КВ-радиоканал может обеспечивать работу систем IT.

В радиолокации качество работы повышается, благодаря использованию многочастотных сигналов [5] следующих типов: длинноимпульсных с кодированием фаз каждой поднесущей (MCPSK – multicarrier phase shift keying) и (или) короткоимпульсных – без кодирования поднесущих. Длинные многочастотные сигналы используют внутриимпульсную модуляцию фазы парциалов (PSK), переносящих бит информации, с кодированием его чипами, что приводит к прямому расширению их спектра [6] и позволяет повысить помехоустойчивость радиотехнической системы. Аналогичные задачи характерны для систем зондирования ионосферы и тестирования множества КВ-радиоканалов, необходимого для обеспечения работы систем когнитивной связи и тестирования [7]. При этом на интеллектуальную часть тестора каналов возлагается функция анализа экспериментальных данных с позиций автономного регистратора событий, обладающего возможностью автоматически выстраивать взаимные связи между системой диагностики и системой КВ-связи. Критически важным является условие применения технологии клиент-серверного дальнего управления системой полной диагностики и анализом данных тестирования. Однако задача создания метода одновременного тестирования множества КВ-радиоканалов изучена недостаточно. В частности, не рассмотрен вопрос применения клиент-серверных технологий для дистанционного управления параметрами сетевых терминалов системы из пунктов, удалённых

от них на значительные расстояния. Широкое распространение мобильных устройств открывает новые возможности для решения актуальных задач КВ-связи. Примерами таких приложений являются мобильный банкинг, дистанционная диагностика врачом состояния здоровья пациента и др.¹ Важным направлением этого процесса является использование мобильных приложений в научных экспериментальных исследованиях [8], которое практически не разработано.

Целью работы является развитие метода одновременного многочастотного тестирования ионосферных КВ-радиоканалов на квазизенитных (NVIS) линиях КВ-связи при дистанционном управлении обработкой и анализом данных.

Основные задачи зондирования ионосферы и тестирования множества радиоканалов на квазизенитных линиях КВ-связи. Для решения задачи тестирования удобно использовать канальную модель распространения радиоволн. В этой модели спектр $U_R(\omega)$ принимаемого сигнала связан со спектром $U_T(\omega)$ излучаемого сигнала частотной характеристикой $H(\omega)$ канала распространения. При таком подходе в задаче тестирования полезная информация содержится в частотной характеристике. Спектр излучаемого сигнала является помехой и исключается при обработке в приёмнике методом согласованной фильтрации.

Рассмотрим тестирование множества каналов тактической связи, когда радиоволны разных зондирующих частот падают на ионосферу под углами от 90° до 75° (режим квазизенитного распространения – NVIS). Эти условия выполняются для радиотрасс протяжённостью 0...650 км (0...400 миль). В действующих системах зондирования ионосферы применяется последовательное излучение радиоим-

¹ Google – Global Business Map. URL: http://ssl.gstatic.com/think/docs/global-business-map_research-studies.pdf

пульсов на различных парциальных зондирующих (рабочих) частотах f (панорамное зондирование). При этом оценивается частотная зависимость времени распространения $\tau_g(f)$ от высоты отражения и обратно на основе измеренных профилей задержки мощности каждого канала.

Известно [9], что скорость распространения радиоимпульса в ионосфере зависит от характеристик ионосферы и зондирующей частоты. Предполагая, что распространение импульсов происходит со скоростью света и используя формулу $h_v = c\tau_g(f)/2$, по задержке можно получить частотные зависимости виртуальной (действующей) высоты отражения, называемой ионограммой. Для получения полной ионограммы частоты должны меняться в диапазоне от наименьшей применимой (порядка 1,5 – 2 МГц) до максимально применимой. Последняя при вертикальном зондировании называется критической (f_0) плазменной (f_p) частотой ионосферы. Итак, при зондировании выполняется условие $f \rightarrow \max f_p = f_o$. Для критической частоты характерна сильная изменчивость от геофизических факторов. Без их учёта максимально применимая частота (МПЧ = f_o) в случае вертикального зондирования (ВЗ) принимается равной 15...20 МГц. При NVIS связи рабочие частоты обычно назначаются в диапазоне от 2 до 8 МГц.

Виртуальная высота отражения сигналов меняется от геофизических факторов и априори занимает диапазон $90 \text{ км} < h_v < 750...1\,000 \text{ км}$. Для ионограммы важным является: 1) разрешение по высоте отражения, которое отличается от разрешения по модам распространения; 2) разрешение по зондирующей частоте, равное шагу сетки зондирующих частот, и 3) разрешение по времени, равное периоду зондирования. В современных ионозондах добиваются, чтобы разрешение по высоте отражения составляло около 1 км,

разрешение по модам распространения $\sim 6 \text{ км}$. Для разрешения по частоте выбирают следующие значения: низкое – шаг сетки $(f_{k+1} - f_k) \sim 200 \text{ кГц}$; среднее – шаг сетки $\sim 100 \text{ кГц}$; высокое – шаг сетки $\sim 50 \text{ кГц}$.

В настоящее время для повышения электромагнитной совместимости стремятся создавать системы зондирования с минимальной мощностью. Для решения данной задачи необходимо обеспечить зондирование радиоканалов с минимальным уровнем канальных помех, согласованную обработку и когерентное накопление сигналов, поляризационное согласование зондирующей волны посредством чередующегося формирования волн круговой поляризации.

Для повышения выигрыша при согласованной обработке парциала используется PSK. При этом каждый парциал длительностью бита T_b представляет собой M следующих друг за другом элементарных импульсов – чипов длительностью T_{ch} , начальные фазы которых подчиняются закону псевдослучайной последовательности (ПСП). Удлинение сигнала за счёт применения ПСП позволяет увеличить его энергию при неизменной мощности и приводит к росту шумоподобности спектра.

Сложные многочастотные сигналы создают условия: для использования одновременного зондирования ионосферы и тестирования множества радиоканалов в заданной полосе частот; для кодового разделения станций; для оперативного управления парциалами, в том числе, за счёт обнуления отдельных, недоступных из-за сосредоточенных антропогенных канальных помех. Отметим, что кодовое разделение станций является актуальным при создании современных сенсорных сетей зондирования ионосферы. Зондирование только доступных подканалов позволяет повысить отношение сигнал/шум и способствует значительному снижению

излучаемой мощности, а также создаёт возможность увеличения разрешения ионограммы по времени. В задаче повышения эффективности NVIS связи эффективно использовать поднесущие только из диапазона частот с верхней границей f_0 , которая может быть оценена по результатам зондирования.

Современные телекоммуникационные сети позволяют решать широкий круг задач, связанных с передачей данных. Одна из таких задач – удалённый мониторинг и управление оборудованием как со стационарных, так и с мобильных устройств с использованием сети интернет. Это позволяет более эффективно организовывать удалённый контроль системы зондирования ионосферы или тестирования КВ-радиоканалов. Часто при изменении области решаемых задач требуется корректировка параметров обработки и анализа данных зондирования. Данная задача может быть решена с использованием клиент-серверных приложений для стационарных или мобильных устройств. Особо стоит отметить распространение мобильных приложений, позволяющих не привязывать оператора к конкретному рабочему месту.

Метод спектральной компактификации многочастотных сигналов без взаимных помех между парциалами. Рассмотрим длинный сложный многочастотный импульс из N ортогональных парциалов (с индексами поднесущих $k \in [0, N-1]$), содержащий M чипов с натуральными индексами $m \in [1, M]$. Используем математический анализ задачи, ориентируясь на применение дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Для этого зададим чип многочастотного сигнала с помощью N временных отсчётов, поэтому длинный многочастотный сигнал будет однозначно задаваться $(N^2 \times M)$ отсчётами. Такой сигнал удобно представить в виде матрицы, которая состоит из субматриц – строк $V_{k,m}$, размером $(1 \times N)$ (первый индекс относится к индексу поднесущей – k , а второй – к индексу бита – m), с элементами u_{kn} , где k и n – индексы поднесущей и времени принадлежат множеству натуральных чисел (с добавлением нуля) из интервала $[0, N-1]$.

В данном случае матрицу отсчётов схематично можно изобразить в виде, представленном на рис 1.

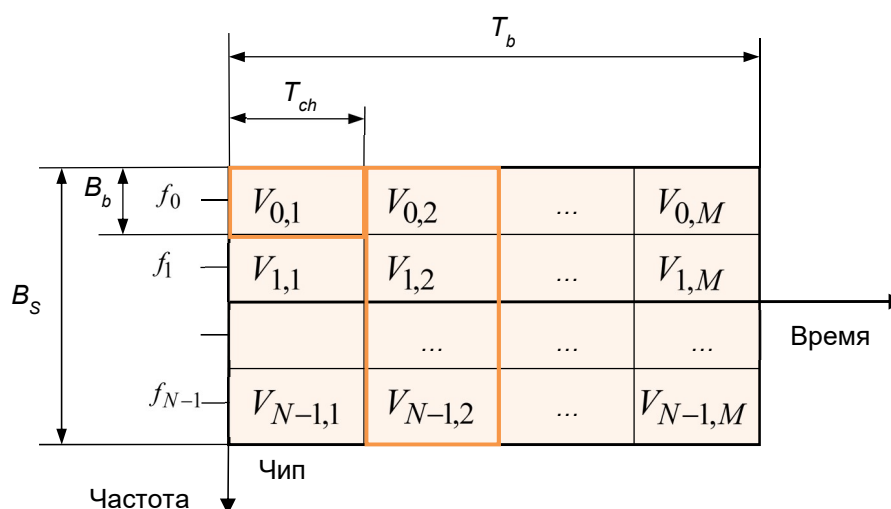


Рис. 1. Матрица отсчётов длинного многочастотного импульса в частотно-временной области
Fig. 1. Matrix of samples of a long multi-carrier pulse in the frequency-time domain

Рассмотрим вначале задачу синтеза парциалов, определив условия отсутствия взаимных помех между ними. Пусть имеем два чипа парциалов длительностью T_{ch} каждый, один на поднесущей $\omega_k = 2\pi \cdot f_k$, а другой на $\omega_{k+1} = 2\pi \cdot f_{k+1}$. Эти парциалы допускают для себя индивидуальную фазовую манипуляцию с амплитудой θ_k . Их амплитуда отлична от нуля на интервале времени $0 \leq \tau < T_{ch}$, поэтому чип аналитически можно представить в виде:

$$u_k(\tau) = u_k \cdot \exp(j\theta_k) \cdot \exp(j\omega_k \tau) = \hat{u}_k \cdot \exp(j\omega_k \tau), \quad (1)$$

где $\hat{u}_k = u_k \cdot \exp(j\theta_k)$ – комплексная амплитуда.

Спектр прямоугольного чипа парциала имеет вид:

$$U_k(j\omega) = T_{ch} \cdot u_k \exp(j\theta_k) \times \sin c \left[\frac{(\omega - \omega_k) T_{ch}}{2} \right] \cdot \exp \left[-j \frac{(\omega - \omega_k) T_{ch}}{2} \right]. \quad (2)$$

Формула (2) представляет собой известный результат [10], показывающий, что амплитудный спектр прямоугольного импульса определяется синусом Котельникова ($\text{sinc}[\dots]$) и носит лепестковый характер.

Из формулы (2) видно, что комплексная амплитуда чипа парциала (комплексный информационный модулирующий символ) $\hat{u}_k = u_k \cdot \exp(j\theta_k)$ является отсчётом его спектра с центром на поднесущей, поэтому она может быть записана в виде:

$$\hat{u}_k = u_k \exp(j\theta_k) = U_k(j\omega_k) / T_{ch}. \quad (3)$$

Ортогональность чипов двух парциалов определяется условием равенства нулю корреляционного интеграла на их длительности T_{ch} :

$$\int_0^{T_{ch}} u_k^*(\tau) \cdot u_{k+1}(\tau) d\tau = \int_0^\infty U_k^*(j\omega) \cdot U_{k+1}(j\omega) \frac{d\omega}{2\pi} = 0. \quad (4)$$

Несложные вычисления приводят выражение (4) к формуле:

$$\begin{aligned} & \int_0^{T_{ch}} u_k^*(\tau) \cdot u_{k+1}(\tau) d\tau = \\ & = u_{k+1} \cdot u_k \cdot \exp[j(\theta_{k+1} - \theta_k)] \times \\ & \times \int_0^{T_{ch}} \exp[j(\omega_{k+1} - \omega_k) \tau] d\tau = \\ & = T_{ch} \cdot u_{k+1} \cdot u_k \cdot \exp[j(\theta_{k+1} - \theta_k)] \times \\ & \times \exp[j(\omega_{k+1} - \omega_k) \frac{T_{ch}}{2}] \cdot \sin c(\omega_{k+1} - \omega_k) \frac{T_{ch}}{2} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Поскольку комплексные амплитуды выносятся за знак интеграла (длительность парциала амплитуды и начальные фазы не зависят от времени), то ортогональность определяется только параметрами несущих. Исключая в (5) случай равенства частот, получим, что ортогональность имеет место, когда синус Котельникова в формуле (5) равен нулю, т. е. когда её аргумент равен π . Таким образом, частоты ортогональных поднесущих $f_k = \omega_k / 2\pi$; $f_{k+1} = \omega_{k+1} / 2\pi$ должны отличаться на величину $1/T_b$, равную шагу сетки $df = f_{k+1} - f_k = 1/T_{ch}$ ортогональных частот, поэтому выражения для частот ортогональных поднесущих имеют вид:

$$f_{k+1} = f_k + \frac{1}{T_{ch}}. \quad (6)$$

Важным является факт, что для выполнения условия ортогональности чипов парциалов требуется строгое соблюдение соотношения между длительностью чипа и шагом сетки частот поднесущих. Поскольку длительность всех чипов одинакова, то ортогональность выполняется и для всех других чипов, составляющих парциал. Отметим, что ортогональными будут также парциальные сигналы, спектры которых представляют собой примыкающие прямоугольники (см. рис. 2). Этот результат позволяет применить для оценок энергетики многочастотного сигнала кусочно-постоянную модель, хотя спектры, описываемые синусами Котельникова, частично перекрываются. Кусочно-прямоугольная модель означает, что перекрывающиеся части спектров из-за амплитудно-фазовых соотношений в них

компенсируются, а эффективно действующие части спектров парциалов расположены в соответствующих им примыкающих прямоугольниках. При такой модели спектр поднесущей полностью определяется одним отсчётом, отмеченным на рисунке точкой. Фактически каждый комплексный отсчёт задаёт амплитуду и фазу парциального импульса.

Кусочно-постоянная модель спектра позволяет оценивать практическую ширину спектра суммы чипов для N парциальных частот. Согласно кусочно-постоянной модели границами спектра являются точки пересечения функций, описываемых

синусами Котельникова. Легко видеть (см. рис. 3), что пересечение графиков синуса Котельникова происходит на уровне $2/\pi \approx 0,64 \approx 0,7$, поэтому эффективная (практическая) полоса частот чипа парциала определяется отрезком $[\omega_k - \frac{\pi}{T_{ch}}, \omega_k + \frac{\pi}{T_{ch}}]$. Известно [11], что бит информации, переносимой парциалом, имеет полосу чипа $[B_b = b_{ch} = 1/T_{ch}]$. Это иллюстрирует рис. 3, где представлены результаты: численные расчёты спектров чипа парциала (синий) и бита (красный) при $M=13$ для PSK с ПСП Баркера.

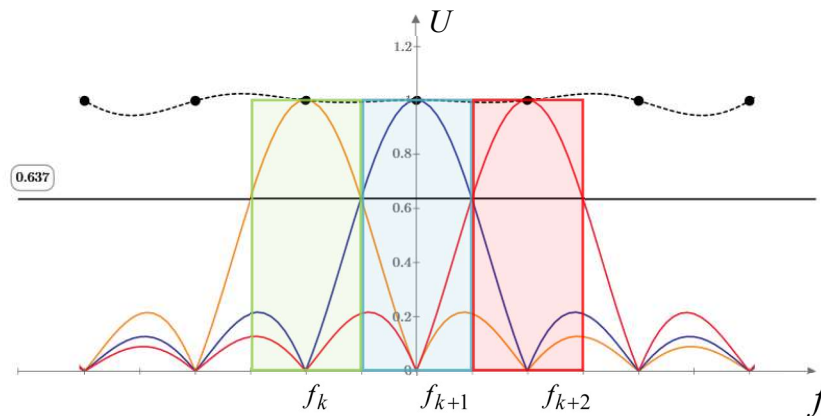


Рис. 2. Фрагмент амплитудного спектра чипов трёх ортогональных парциалов со спектрами, описываемыми синусами Котельникова, и их кусочно-постоянная модель

Fig. 2. Fragment of the amplitude spectrum of chips of three orthogonal partials with spectra described by the Kotelnikov sines, and their piecewise constant model

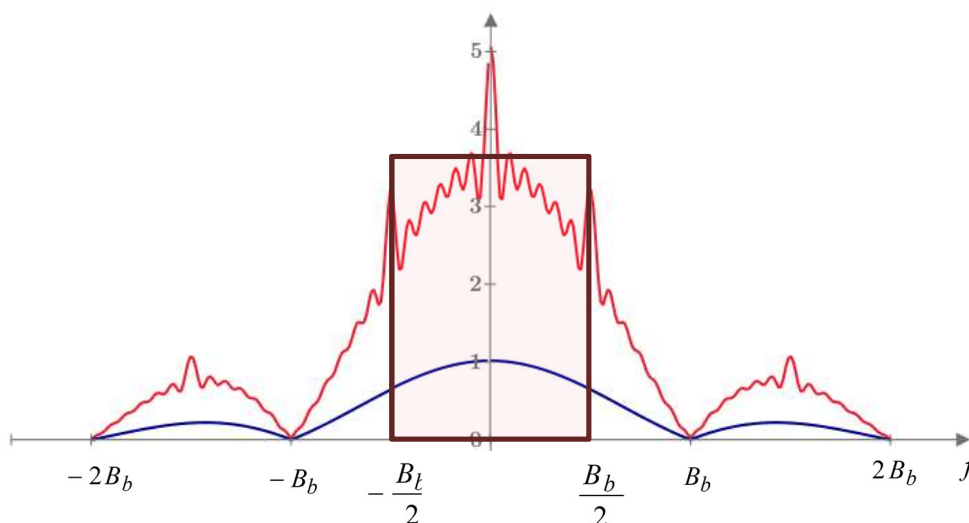


Рис. 3. Спектральная плотность амплитуды многочипового парциала ($M=13$ – PSK с ПСП Баркера) и одночипового (синий)

Fig. 3. Spectral amplitude density of the multi-chip partial ($M=13$ – PSK with Barker code) and single-chip (blue plot)

Видно, что максимальные значения амплитуд отличаются в $3,6=\sqrt{M}$ раза. Следовательно, для энергетического спектра они будут отличаться в $M=13$ раз. При этом полоса частот элемента группового сигнала длительностью T_{ch} равна $B_s = N \cdot B_b = N / T_{ch}$.

Итак, для вычисления спектра много-частотного элемента с N поднесущими необходимо задать N комплексных отсчётов. При использовании для синтеза многочастотного чипа ДПФ необходимо учитывать нюансы обработки, обусловленные спецификой интерпретации его спектра по результатам вычислений. В этой связи рассмотрим наиболее важные для практики вопросы. Учтём, что много-частотный чип в частотной и временной областях однозначно задаётся кусочно-постоянной моделью, т. е. N комплексными отсчётами на сетке времени и (или) частоты:

$$t = t_n = n \cdot dt = \frac{n}{B_b N} = T_{ch} \frac{n}{N}; \quad (7)$$

$$f = f_k = k \cdot df = k \cdot \frac{B_s}{N} = k \cdot B_b = \frac{k}{T_{ch}}. \quad (8)$$

Поскольку $n=[0, N-1]$, $k=[0, N-1]$, а $\omega_k = 2\pi \cdot f_k$, то фазу чипа парциала можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \omega_k \cdot \tau_n &= \frac{2\pi}{N} (k \cdot n) = \\ &= \frac{2\pi}{N} (k \cdot n) \frac{T_{ch}}{T_{ch}} = 2\pi \left(\frac{k}{T_{ch}} \right) \cdot \left(\frac{n \cdot T_{ch}}{N} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Обратим внимание на то, что данная фаза является безразмерной величиной и поэтому путём преобразований её удастся записать через безразмерные величины – номера (индексы) отсчётов во временной и частотной областях, которые с помощью обратных преобразований, умножением и делением на величину T_{ch} приводятся к размерным величинам (частота – время). При этом частота является положительной величиной и определяется номером отсчёта k . Переход к отрицательным ча-

стотам возможен путём частотного сдвига спектра на p отсчётов влево, т. е. путём перехода в частоте к индексам $(k-p)$. Аналогично сдвиг индекса времени будет приводить к временному сдвигу импульсного сигнала.

MCPSK-сигнал и влияние на него среды распространения. Рассмотрим влияние радиоканала на многочастотный M -элементный сигнал с ортогональными поднесущими. Поскольку сигнал получается путём линейной операции (суммирования), то возможно рассмотреть влияние среды на одну произвольную поднесущую с M -битовой модуляцией фазы (на один парциал).

Пусть произвольный чип имеет индекс $m=[1, M]$. Амплитуду, фазу и запаздывание бита с индексом m относительно начала отсчёта обозначим соответственно:

$$u_{km} = u_0(\tau - \tau_m), \mathcal{G}_{km}, \tau_m = (m-1) \cdot T_{ch}. \quad \text{Итак,}$$

для такого чипа будем иметь выражение:

$$u_k(\tau) = u_{km} \cdot \exp(j\mathcal{G}_{km}) \cdot \exp[j\omega_k \cdot (\tau - \tau_m)] = u_0(\tau - \tau_m) \cdot \exp(j\mathcal{G}_{km}) \cdot \exp[j\omega_k \cdot (\tau - \tau_m)], \quad (10)$$

где Ω_k – поднесущая m -го чипа на парциальной частоте ω_k , с начальной фазой $\mathcal{G}_{km} = \theta_{km} + \xi_k$, действительной амплитудой $u_{km} = u_0(\tau - \tau_m)$, которая отлична от нуля на отрезке $\tau \in [(m-1)T_b, mT_b]$, где она равна единице.

Парциал, состоящий из M чипов на поднесущей, будет иметь вид:

$$u(\omega_k, \tau) = \sum_{m=1}^M u_0(\tau - \tau_m) \cdot \exp(j\mathcal{G}_{km}) \times \exp[j\omega_k \cdot (\tau - \tau_m)]. \quad (11)$$

Обозначим его спектр символом $U_T(\omega_k, j\Omega)$. Используя канальную модель распространения сигнала в ионосфере от передатчика к приёмнику, для спектра принимаемого сигнала будем иметь выражение:

$$U_R(\omega_k, t, j\Omega) = H(\omega_k, t, j\Omega) \cdot U_T(\omega_k, j\Omega), \quad (12)$$

где $H(\omega_k, t, j\Omega)$ – частотная характеристика канала с полосой частот, заданной

излучаемым сигналом, t – геофизическое (медленное время).

В задаче зондирования ионосферы и тестирования радиоканалов КВ-связи полезная информация сосредоточена в его частотной характеристике. Она выделяется умножением правой и левой частей уравнения (12) на функцию $U_T^*(\omega_k, j\Omega)$, т. е. методом согласованной фильтрации:

$$\begin{aligned} U_R(\omega_k, t, j\Omega) \cdot U_T^*(\omega_k, j\Omega) = \\ = H(\omega_k, t, j\Omega) \cdot |U_T(\omega_k, j\Omega)|^2. \end{aligned} \quad (13)$$

Функция $|U_T(\omega_k, j\Omega)|^2 = W_b(\omega_k, \Omega)$ является спектральной плотностью энергии (СПЭ) излучаемого на парциальной частоте PSK-сигнала (бита). Подобие СПЭ чипа и бита позволяет принять для СПЭ бита также прямоугольную модель внешнего вида, для которой имеют место соотношения:

$$\begin{aligned} |U_T(\omega_k, j\Omega)|^2 \approx \text{const} = k_s; \\ \forall \Omega \in [\omega_k - \pi/T_{ch}, \omega_k + \pi/T_{ch}] = \\ = [\omega_k - \omega_{ch}/2, \omega_k + \omega_{ch}/2], \end{aligned} \quad (14)$$

где $\omega_{ch} = 2\pi \cdot b_{ch}$, ω_k – средняя (рабочая) частота подканала с индексом k .

Аналитические преобразования показывают, что в рамках данной модели отношение СПЭ бита к СПЭ чипа равно длине кода:

$$\frac{W_b}{W_{ch}} = \frac{W_b \cdot b_{ch}}{W_{ch} \cdot b_{ch}} \approx \frac{E_b}{E_{ch}} \approx \frac{P \cdot T_{ch} \cdot M}{P \cdot T_{ch}} = M, \quad (15)$$

где $P_b = P_{ch} = P$ – мощность чипа и бита сигнала.

В таком случае уравнение (13) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} U_R(\omega_k, t, j\Omega) \cdot U_T^*(\omega_k, j\Omega) = \\ = k_s \cdot H(\omega_k, t, j\Omega). \end{aligned} \quad (16)$$

Далее переведем (15) во временную область и получим:

$$CCF(\omega_k, \tau, T) = k_s \cdot h(\omega_k, \tau, T). \quad (17)$$

Здесь CCF – взаимно корреляционная функция (ВКФ – Cross-Correlation Function CCF) принимаемого и изучаемого парциалов, которая равна:

$$\begin{aligned} CCF(\omega_k, \tau, T) = \\ = 1/2\pi \int_{-\infty}^{\infty} U_R(\omega_k, t, j\Omega) \cdot U_T^*(\omega_k, j\Omega) \times \\ \times \exp j\omega\tau \cdot d\omega = \\ = 1/2\pi \int_{\omega_k - \omega_{ch}/2}^{\omega_k + \omega_{ch}/2} U_R(\omega_k, t, j\Omega) \cdot U_T^*(\omega_k, j\Omega) \times \\ \times \exp j\omega\tau \cdot d\omega. \end{aligned} \quad (18)$$

Из (18) следует, что ВКФ прямо пропорциональна импульсной характеристике (ИХ) парциального канала с полосой ω_{ch} на поднесущей ω_k .

Влияние среды распространения на сигнал можно учесть, задав модель частотной характеристики (ЧХ) или импульсной характеристики (ИХ). При этом, исходя из формулы (16), частотную характеристику канала можно выразить через спектры принимаемого и излучаемого сигналов:

$$\begin{aligned} H(\omega_k, t, j\Omega) = \\ = \begin{cases} \frac{1}{k_s} U_R(\omega_k, t, j\Omega) \cdot U_T^*(\omega_k, j\Omega) \\ \forall \Omega \in [\omega_k - \pi/T_{ch}, \omega_k + \pi/T_{ch}]. \\ 0 \\ \forall \Omega \notin [\omega_k - \pi/T_{ch}, \omega_k + \pi/T_{ch}] \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

Здесь мы приняли, что полоса частот Ω_{ch} радиоканала на поднесущей ω_k равна полосе частот СПЭ парциала $\omega_{ch} = \omega_b = 2\pi/T_{ch}$.

Рассмотрим модель ЧХ радиоканала на поднесущей ω_k . В случае приёма P мод (например, $1E, 1F, 2E, 2F$ и т.д.) ЧХ канала можно записать в виде суммы по различным модам с индексами p :

$$\begin{aligned} H(\omega_k, t, j\Omega) = \\ = H(\omega_k, t, \Omega) \cdot \exp \{-j\varphi(\omega_k, t, \Omega)\} = \\ = \sum_{p=1}^P H_p(\omega_k, t, \Omega) \cdot \exp \{-j\varphi_p(\omega_k, t, \Omega)\}, \end{aligned} \quad (20)$$

где $\Omega = \omega - \omega_k$ – разностная частота.

Учтём, что из-за изменений космической погоды электронная концентрация, а следовательно, амплитуда и фаза ЧХ становятся медленными функциями геофи-

зического времени t . Кроме того, полоса частот канала и время зондирования ограничены. Это позволяет амплитуду и фазу ЧХ разложить в ряд Тейлора по переменным $T = t - \bar{t}, \Omega$:

$$\begin{aligned} H_p(\omega_k, \bar{t}, \Omega, T) &= H_p(\omega_k, \bar{t}, 0, 0) \approx \text{const}, \\ \varphi_p(\omega_k, \bar{t}, \Omega, T) &\approx \\ &\approx \varphi_p(\omega_k, \bar{t}) + \frac{d\varphi_p}{dt} \Big|_{t=\bar{t}} T + \frac{d\varphi_p}{d\Omega} \Big|_{\omega=\omega_k} \cdot \Omega. \end{aligned} \quad (21)$$

Известно [9], что производные по времени и частоте являются доплеровским смещением циклической частоты и групповой задержкой:

$$\Omega_{dp} = -\frac{d\varphi_p}{dt}, \quad \tau_{gp} = \frac{d\varphi_p}{d\omega}. \quad (22)$$

Поэтому моделью фазы ЧХ будет функция:

$$\begin{aligned} \varphi_p(\omega_k, \bar{t}, \Omega, T) &\approx \\ &\approx \varphi_p(\omega_k, \bar{t}) - \Omega_{dp} T + \tau_{gp} \cdot \Omega. \end{aligned} \quad (23)$$

Несложные вычисления дают для ИХ моды следующий результат:

$$\begin{aligned} h_p(\omega_k, \bar{t}, \tau, T) &\approx H(\omega_k, \bar{t}, 0, 0) \times \\ &\times \exp[j\varphi_p(\omega_k, \bar{t})] \cdot \exp[j\Omega_{dp} T] \times \\ &\times \int_{-b_{ch}/2}^{b_{ch}/2} \exp[j2\pi(\tau - \tau_{gp})F] dF = \\ &= b_{ch} H(\omega_k, \bar{t}, 0, 0) \cdot \exp[j\varphi_p(\omega_k, \bar{t})] \times \\ &\times \exp[j\Omega_{dp} T] \cdot \sin c[\pi b_{ch}(\tau - \tau_{gp})]. \end{aligned} \quad (24)$$

Для многомодового канала ИХ имеет вид:

$$h(\omega_k, \bar{t}, \tau, T) = \sum_p h_p(\omega_k, \bar{t}, \tau, T). \quad (25)$$

Время τ и T называются соответственно быстрым и медленным (геофизическим). Квадрат модуля ИХ многомодового канала называется мгновенным профилем задержки мощности (ПЗМ или по международной классификации RDP – Power Delay Profile) [10], поэтому для мгновенного ПЗМ имеем:

$$\begin{aligned} \tilde{P}_\tau(f_k, \tau, T) &= \frac{1}{k_s^2} |u_{cR}(f_k, \tau, T)|^2 = \\ &= |h(f_k, \tau, T)|^2. \end{aligned} \quad (26)$$

Мгновенный ПЗМ является испытывающей случайные замирания функцией медленного времени. Усреднение по этому времени позволяет получить статистически устойчивую оценку, называемую просто ПЗМ:

$$\begin{aligned} P_\tau(f_k, \tau) &= E_T[\tilde{P}_\tau(f_k, \tau, T)] = \\ &= E_T[|h(f_k, \tau, T)|^2], \end{aligned} \quad (27)$$

где $E_T[\psi(T)] = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} \psi(T) \cdot dT$ – среднее значение функции $\psi(T)$ по медленному времени, T_a – время анализа функции, отсчитываемое от начала его излучения.

Другой характеристикой канала является выборочный спектр замираний ИХ. Его формула для периодической выборки отсчётов ИХ длительностью T_a имеет вид:

$$\begin{aligned} s(f_k, \tau, F) &\approx \\ &\approx \int_0^{T_a} h(f_k, \tau, T) \exp[-j2\pi FT] dT = \\ &= T_a b_{ch} \sum_p H_p(f_k, 0) \times \\ &\times \exp[-j2\pi(F - F_{dp})T_a] \times \\ &\times \sin c[\pi b_{ch}(\tau - \tau_{gp})] \cdot \sin c[\pi T_a(F - F_{dp})], \end{aligned} \quad (28)$$

где $b_{ch} = B_{ch}$ – полоса частот чипа, равная полосе канала.

Видно, что модуль спектра пропорционален времени анализа T_a (длительности выборки), что эквивалентно эффекту когерентного накопления за это время:

$$\begin{aligned} \max_F |s(f_k, \tau, F)| &\approx \\ &\approx T_a \cdot B_{ch} H_k(f_k, T) \cdot \sin c \times \\ &\times [\pi B_{ch}(\tau - \max \tau_{gk})] = \\ &= T_a \cdot |h(f_k, \tau, T)|. \end{aligned} \quad (29)$$

При цифровой обработке выборка набирается из N_a отсчётов ИХ в медленном времени, полученных с шагом $\Delta T = T_a / N_a$, поэтому спектральный анализ приводит к увеличению спектральной амплитуды в N_a раз, а мощности в N_a^2 раз. Не трудно показать, что мощность шума при таком накоплении увеличивается в

N_a раз. Итак, при когерентном накоплении с использованием БПФ сигнал/шум увеличивается в N_a и выигрыш от накопления составляет $10 \lg N_a$ [дБ].

Представленный алгоритм позволяет путём одновременного тестирования множества КВ-радиоканалов измерять функцию рассеяния канала для каждого из них и выбирать для радиоканалов параметры модемов с максимальной производительностью.

Алгоритм и система удалённого управления обработкой и анализом данных. Система зондирования ионосферы и одновременного тестирования множества КВ-каналов, созданная в ПГТУ [6, 12], представляет собой программно-конфигурируемое устройство, созданное на основе универсальной платформы USRP N210. Управляет данной системой персональный компьютер, на котором могут выполняться функции удалённого управления.

Метод удалённого управления предполагает использование клиентского и

серверного приложения для терминала аппаратно-программного комплекса. Серверная часть приложения реализует следующие функции:

- поддержка авторизации пользователей;
- поддержка взаимодействия с клиентами по настраиваемому протоколу;
- обработка запросов клиентов;
- возможность изменения расписания работы ионозонда и передачи результатов клиенту.

Функциональность клиентского приложения включает в себя:

- отображения графического интерфейса для авторизации, управления аппаратно-программным комплексом и отображения результатов работы зондирования и тестирования;
- отображение ионограммы в виде изображения и обработанных данных в виде графиков.

Алгоритм работы системы удалённого управления представлен на рис. 4.

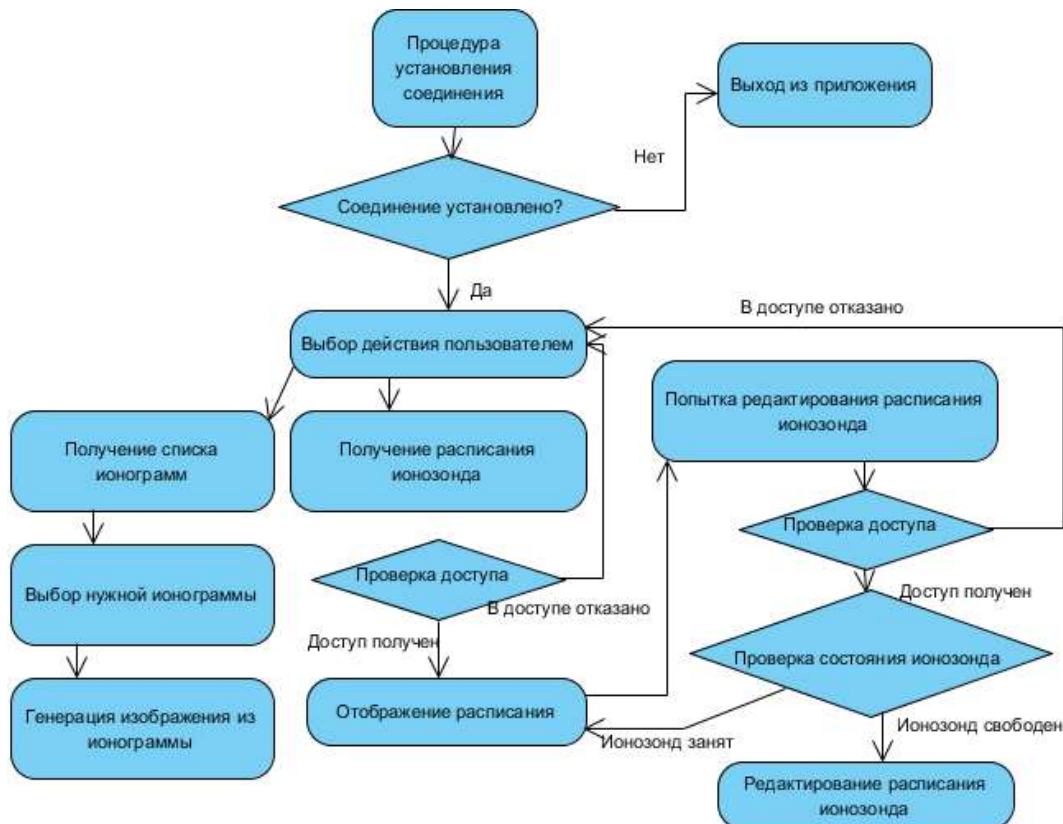


Рис. 4. Алгоритм работы системы удалённого управления

Fig. 4. The algorithm of the remote control system

На терминале устройства работает приложение, обеспечивающее непосредственное управление. На сервере обработки функционирует приложение, обеспечивающее вторичную обработку ионограмм и обработку запросов клиентов. В качестве приложения выступает база данных PostgreSQL², которая аккумулирует рассчитанные по ионограммам наклонного зондирования ионосферы значения минимальной и максимальной применимых частот, оптимальной рабочей частоты и других ключевых данных. Сетевая архитектура используемой базы данных работает по протоколу TCP/IP и состоит из этапов аутентификации, обмена параметрами, выбором конкретной базы данных, запросом к базе данных и закрытием соединения. PostgreSQL использует принцип «процесс на пользователя», так как конечное количество пользователей неизвестно, специальный «мастер-процесс» postgres отслеживает новые запросы с TCP/IP порта, закреплённого за БД и создаёт соответствующие процессы (со-

единения). При одновременном подключении нескольких пользователей система использует семафоры и расширенную память для обеспечения целостности данных. Инициализировать подключение к базе данных со стороны клиента возможно при помощи вспомогательной библиотеки libqt языка программирования C, которая является базовым интерфейсом для интерфейсов других языков программирования. Клиент формирует текстовый запрос, который анализируется и выполняется сервером, затем запрашиваемые строки таблиц передаются обратно клиенту через созданное соединение. Для реализации системы была выбрана архитектура клиент-сервер с использованием тонкого клиента, поскольку в этом случае большая часть вычислений переносится на сервер.

Апробация системы и верификация метода. Разработанные алгоритмы были верифицированы с использованием устройства, схематично представленного на рис. 5.

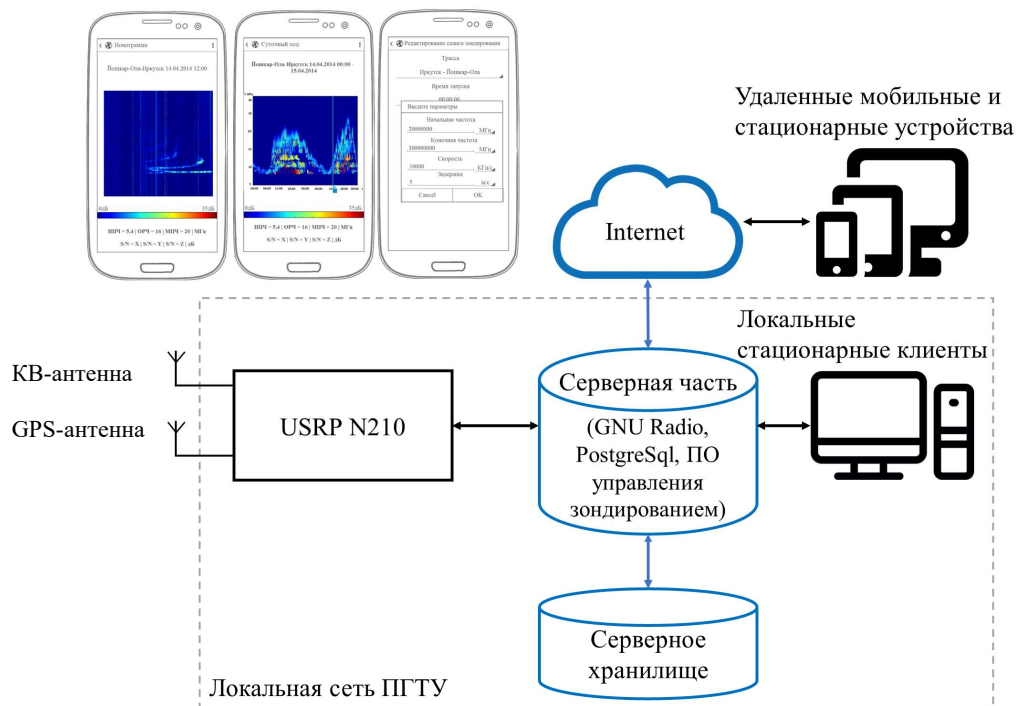


Рис. 5. Структура системы зондирования, интегрированной в сеть удалённого управления
Fig. 5. Structure of the sounding system integrated into the remote control network

² PostgreSQL: Документация. URL: <https://postgrespro.ru/docs/postgresql>

Управление работой программно-аппаратного комплекса осуществляется аналогично средствами БД PostgreSQL путём запросов клиента на изменения состояния таблицы-конфигуратора, которая хранит переменные настройки зонда. При запросе обработок сначала проверяется наличие обработки в кэше. Если обработка найдена, она передаётся клиенту. Если нет, сервер проводит вторичную обработку данных, передаёт результат клиенту и заносит его в кэш. Терминал ионозонда копирует полученные данные в хранилище и добавляет запись о новых данных в БД сервера обработок. Библиотека сетевого взаимодействия реализована на языке программирования Java. Её основными особенностями являются: кроссплатформенность (ОС Android, Windows, Linux, Mac OS X); настраиваемый протокол взаимодействия; асинхронное получение, передача и обработка сообщений; шифрование канала по алгоритмам AES, DES и RSA.

Устройство зондирования ионосферы и тестирования радиоканалов основано на использовании OFDM-технологии. Его структурная схема представлена на рис. 6.

Основные технические характеристики устройства:

- тип сигнала: MCPSK;
- диапазон частот: 2–16 МГц;

- количество (поднесущих) в полосе 200 кГц: $N = 8$;
- тип ПСП: Код Баркера $M = 13$;
- разрешение по высоте: 1 км;
- разрешение по модам распространения: 6 км;
- длительность бита: 520 мкс;
- длительность чипа: 40 мкс;
- когерентное накопление импульсов: до 16 384;
- диапазон высот: 80–800 км;
- мощность излучения: 10 Вт.

При зондировании ионосферы получаем информацию в виде ионограммы, представленной на рис. 7.

Удалённый доступ позволяет управлять параметрами зонда и вторичной обработкой экспериментальных данных. Соответствующие эксперименты были проведены на радиолинии тактической связи п. Яльчик – г. Йошкар-Ола, протяжённостью 80 км. На рис. 8 и рис. 9 представлены графики суточного хода максимально применимой (МПЧ) и оптимальной рабочей (ОРЧ) частот, полученные по удалённому запросу. Графики отличаются параметром шага по времени. На рис. 8 шаг составляет 15 минут, на рис. 9 шаг по времени составляет 1 час. Изменение шага связано с усреднением суточных ходов.

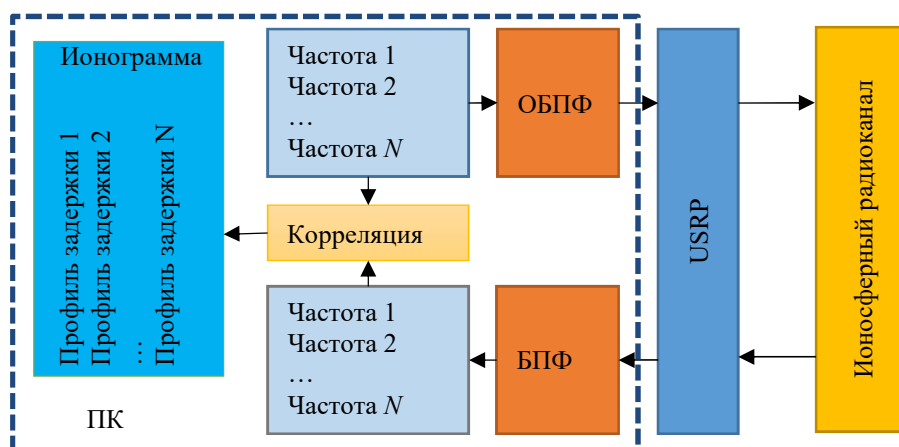


Рис. 6. Структурная схема программно-аппаратного комплекса
Fig. 6. Block diagram of the software hardware complex

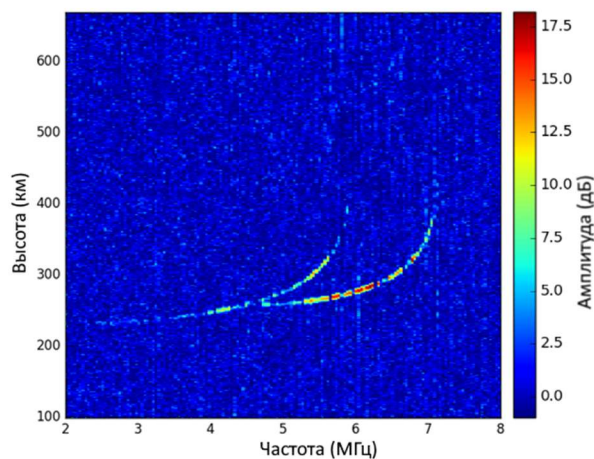


Рис. 7. Ионограмма одновременного многочастотного зондирования ионосферы в г. Йошкар-Ола (ПГТУ) малоомощным MCPSK сигналом с полосой 200 кГц

Fig. 7. Ionogram of simultaneous multi-frequency sounding of the ionosphere in Yoshkar-Ola (Volga State University of Technology) with a low-power MCPSK signal with a bandwidth of 200 kHz

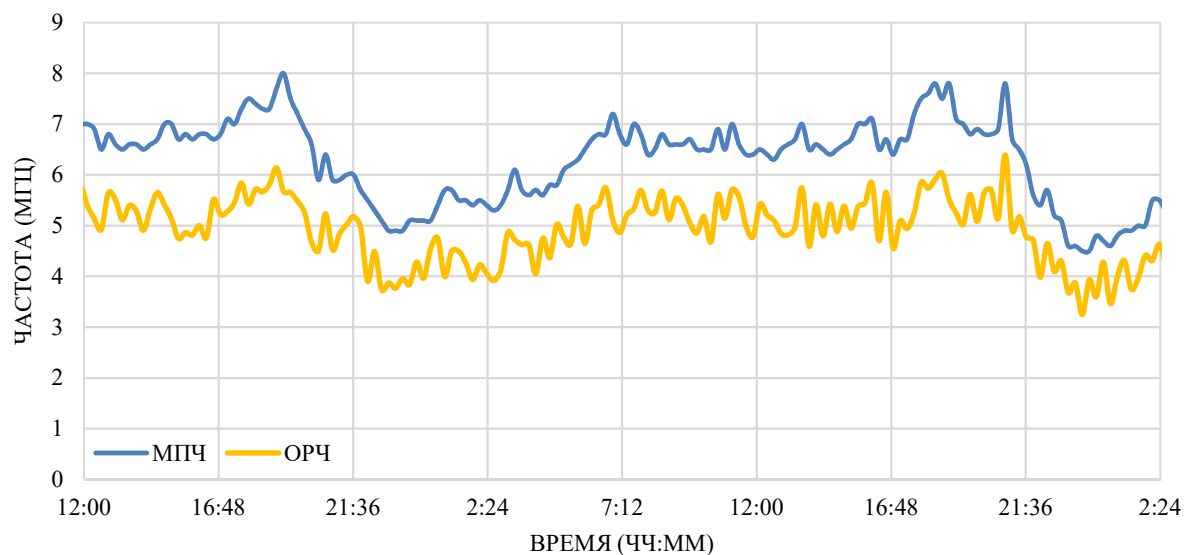


Рис. 8. Суточный ход с шагом 15 мин для МПЧ и ОРЧ трассы п. Яльчик – г. Йошкар-Ола

Fig. 8. Diurnal variations of MUF and OOF with a step of 15 min for Yalchik-to-Yoshkar-Ola path

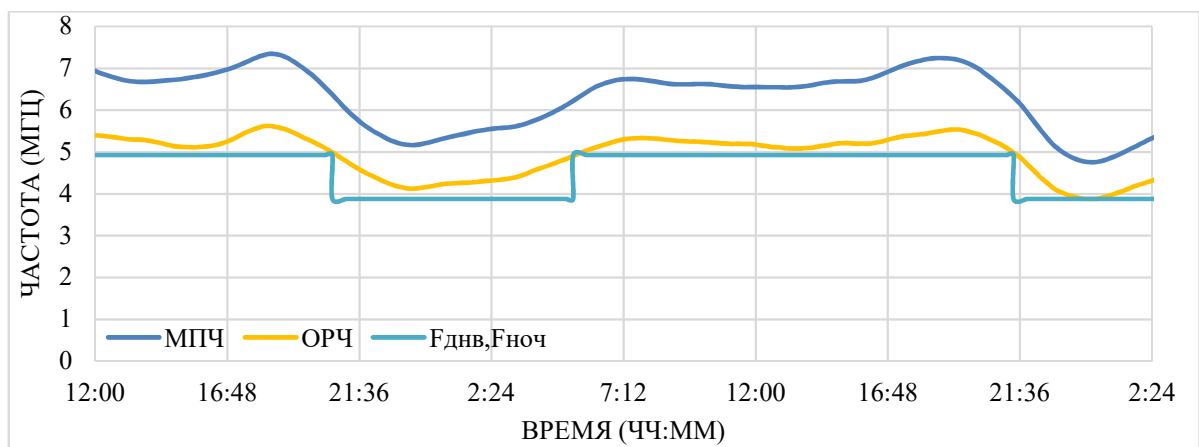


Рис. 9. Суточный ход с шагом 1 час для МПЧ и ОРЧ трассы п. Яльчик – г. Йошкар-Ола

Fig. 9. Diurnal variations of MUF and OOF with a step of 1 hour for Yalchik-to-Yoshkar-Ola path

Сглаживание позволяет оценить время перехода при работе на ОРЧ при смене времени суток. Установлено, что рекомендованными рабочими частотами для NVIS трассы п.Яльчик – г.Йошкар-Ола являются 3,877 и 5 МГц для ночи и дня соответственно. Время перехода составило 21 ч 07 м; 05 ч 22 м; 21 ч 52 м. Достоверность результата подтверждается расчётами с использованием международной модели ионосферы.

Выводы. Разработан метод одновременного многочастотного зондирования ионосферы и тестирования множества КВ-радиоканалов при дистанционном управлении обработкой и анализом данных. Решаемая задача лежит в рамках подхода по созданию интеллектуальной системы диагностики КВ-радиоканала и машинного обучения системы КВ-связи.

Разработаны: методики и алгоритмы удалённого управления системой зондирования при изменении области решаемых задач; протокол сетевого взаимодействия, архитектура программных средств удалённого управления системой диагностики ионосферы и радиоканалов. Значимость для науки обусловлена развиваемым подходом применения технологии клиент-серверного удалённого управления системой и обработкой данных. Практическая значимость определяется сферой применения метода в перспективных системах когнитивной КВ-связи для решения главной на сегодняшний день задачи обеспечения более равномерного использования парциальных каналов, повышения помехоустойчивости связи, производительности модемов и снижения излучаемой мощности.

Список источников

1. Проблемы вертикального зондирования ионосферы сложными сигналами минимальной мощности / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 2 (50). С. 6-20. DOI: 10.25686/2306-2819.2021.2.6
2. Universal ionosonde for diagnostics of ionospheric HF radio channels and its application in estimation of channel availability / D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova et al. // IET Conference Publications. 12. 2018. DOI:10.1049/cp.2018.0473
3. *Levanon N.* Multifrequency radar signals / Record of the IEEE 2000 International Radar Conference [Cat. No. 00CH37037]. Alexandria. VA, USA, 2000. Pp. 683-688.
4. *Родович А.А., Серяков А.А., Захаров П.Н.* Реализация радиолокационной системы на основе сигналов с ортогональным мультиплексированием и частотным разделением // Ученые записки физического факультета Московского университета. 2016. № 5. С. 165508.
5. *Levanon N., Mozeson E.* Radar Signals. John Wiley & Sons, Inc., New York, 2004. 432 p.
6. *Иванов Д. В., Иванов В. А., Елсуков А. А.* Разработка и испытание аппаратно-программного комплекса для наземного мониторинга ионосферы с применением SDR-технологии, сложных зондирующих фазо-кодо-манипулированных сигналов и квадратурной обработки // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 2 (42). С. 71-85. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.2.71
7. Одновременное многочастотное зондирование ионосферы маломощным сигналом с ортогональным уплотнением поднесущих / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Н.В. Рябова и др. // Радиотехника, электроника и связь: тезисы докладов VI международной научно-технической конференции, Омск, 06–08 октября 2021 года. Омск: Омский научно-исследовательский институт приборостроения, 2021. С. 86-88.
8. Дальнее управление экспериментом по наклонному зондированию ионосферных каналов КВ-связи / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, Е.В. Катков и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2016. № 3(31). С. 18-30. DOI 10.15350/2306-2819.2016.3.18.
9. *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Физматгиз, 1960. 552 с.
10. *Salous S.* Radio propagation measurement and channel modelling. John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom, 2013. 424 p.
11. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2017. 1100 с.

12. Интегрируемый в систему КВ-связи комплекс пассивного зондирования упорядоченного по частоте множества узкополосных каналов / Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова и др. //

Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2019. № 3 (43). С. 71-82. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.3.71

Статья поступила в редакцию 10.11.2021; одобрена после рецензирования 30.11.2021; принята к публикации 15.12.2021

Информация об авторах

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор 295 научных публикаций. ORCID: 0000-0002-3609-1157.

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы. Автор 385 научных публикаций.

ЕЛСУКОВ Алексей Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – дистанционное зондирование ионосферы. Автор 68 научных публикаций.

КОНКИН Никита Александрович – аспирант кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет. Область научных интересов – анализ данных дистанционного зондирования ионосферы. Автор девяти научных публикаций. ORCID: 0000-0001-7052-748X

Вклад авторов:

Иванов Д. В. – концепция работы; интерпретация данных; окончательное утверждение версии для публикации, новые методы и математические модели.

Иванов В. А. – дизайн работы, интерпретация данных; составление статьи и её итоговая переработка, окончательное утверждение версии для публикации.

Елсуков А. А. – техническое и программное обеспечение работы в части созданных в ней новых методов, сбор и анализ данных, сбор экспериментальных данных, составление статьи.

Конкин Н. А. – разработка и программная реализация алгоритмов работы удалённого управления системой зондирования, сбор данных и их анализ, составление статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 621.371

<https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.4.6>

Method for Simultaneous Multi-Carrier Testing of Ionospheric HF Radio Channels with Remote Data Processing and Analysis

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, A. A. Elsukov✉, N. A. Konkin

Volga State University of Technology,

3, Lenin sqr., Yoshkar-Ola, 424000, Russian Federation

ElsukovAA@volgatech.net✉

Keywords: ionosphere; vertical sounding; multi-carrier signal; PSK; OFDM; MCPSK; remote control

ABSTRACT

Introduction. Currently, the focus has significantly moved in spreading the scope of noise-like composite wideband signals. Their feature is the simultaneous formation of radio pulses on a grid of subcarriers. Such signals belong to the class of frequency division multiplexing (FDM) and use intra-pulse phase modulation of partials (PSK), which carry a bit of information. The data is coded by chips, which results in a direct spectrum spreading and improves the noise resistance of the radio system. Since partials with different carriers occupy radio channels in the frequency domain, the problem of their close spacing by orthogonal multiplexing also applies to the analysis of overlapping radio channels. A requirement of the application of the technology of client-server remote control of the system of test data diagnosis and analysis is topical. The widespread use of mobile devices opens up new perspectives for solving topical problems of HF communications. An important trend in this process is the use of mobile applications in experimental research, which is almost not developed. **The aim** of the research is to develop a method for simultaneous multi-carrier testing of ionospheric HF radio channels over NVIS communication links with remote data processing and analysis. **Methods.** The solution of posed tasks and obtaining the main research and practical results are based on the methods of mathematical analysis, computational mathematics, the theory of radio wave propagation in the ionosphere. The main theoretical outcomes were verified by numerical and full-scale experiments. **Findings.** A method for simultaneous multi-carrier sounding of the ionosphere and testing of multiple HF radio channels with remote data processing and analysis was developed. The task is related to the approach of creating an intelligent system for diagnosing a HF radio channel and machine learning of a HF communication system. There were developed: methods and algorithms for remote control of the sounding system for different area of tasks; network interaction protocol, software architecture for remote control of the system of diagnosing ionosphere and radio channels. The significance for science is manifested in the developed approach of the use of client-server remote control technology for the system and data processing. **The practical significance** is defined by the scope of the method in state-of-the-art cognitive HF communication systems for solving the currently topical problems of ensuring an equal use of partial channels, increasing noise resistance, modem performance and reducing radiated power.

Funding: this work was supported by the grant № 20-07-00268 from the Russian Foundation for Basic Research.

REFERENCES

1. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ryabova N. V. et al. Problemy vertikal'nogo zondirovaniya ionosfery slozhnymi signalami minimal'noj moshchnosti [The Challenges of Vertical-Incidence Ionospheric Sounding by Low-Power Spread Spectrum Signals]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy»* [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: «Radio Engineering and Infocommunication Systems»]. 2021. No 2 (50). Pp. 6–20. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.2.6> (In Russ.).
2. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V. et al. Universal ionosonde for diagnostics of ionospheric HF radio channels and its application in estimation of channel availability. *IET Conference Publications*. 12. 2018. DOI:10.1049/cp.2018.0473
3. Levanon N. Multifrequency radar signals. *Record of the IEEE 2000 International Radar Confer-*

ence [Cat. No. 00CH37037]. Alexandria, VA, USA, 2000. Pp. 683-688.

4. Rodovich A.A., Serjakov A.A., Zaharov P.N. Realizacija radiolokacionnoj sistemy na osnove signalov s ortogonal'nym mul'tipleksirovaniem i chastotnym razdeleniem [Implementation of radiolocation system based on signals with orthogonal frequency division multiplexing]. Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta [Memoirs of the Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University]. 2016. No 5. P. 165508 (In Russ.).

5. Levanon N., Mozeson E. Radar Signals, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2004. 432 p.

6. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Elsukov A. A. Razrabotka i ispytanie apparatno-programmnogo kompleksa dlya nazemnogo monitoringa ionosfery s primeneniem SDR-tehnologii, slozhnyh zondiruyushchih fazo-kodo-manipulirovannyh signalov i kvadraturnoj obrabotki [Development and Verification of a Hardware Software System for Ground-Based Monitoring of the Ionosphere Using SDR Technology, Spread Spectrum Sounding Signals with Phase-Shift Keying and Quadrature Processing]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy» [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2019. No 2 (42). Pp. 71-85. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.2.71 (In Russ.).

7. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Rjabova N.V., Elsukov A.A., Katkov V.V. Odnovremennoe mnogochastotnoe zondirovanie ionosfery malomoshhnyh signalom s ortogonal'nym uplotneniem podnesushhih [Simultaneous multi-carrier sounding of the ionosphere by a low-power signal with orthogonal subcarriers]. Radiotekhnika, jelektronika i svjaz': tezisy dokladov VI mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii, Omsk, 06-08 oktyabrja 2021 goda [Radio Engineering, Electronics and Communications: proceedings of the VI International Scientific and Tech-

nical Conference, Omsk, 06-08 October 2021]. Omsk: Omsk Scientific-Research Institute of Instrument Engineering, 2021. P. 86-88. (In Russ.).

8. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Katkov E. V. et al. Dal'nee upravlenie eksperimentom po naklonnomu zondirovaniyu ionosfernyh kanalov KV-svyazi [Remote Control of the Experiment on the Oblique Sounding of Ionospheric Channels of Short-Wave Communication]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy» [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2016. № 3(31). C. 18-30. DOI 10.15350/2306-2819.2016.3.18. (In Russ.).

9. Ginzburg V.L. Rasprostranenie jelektromagnitnyh voln v plazme [Propagation of electromagnetic waves in plasma]. Moscow, Fizmatgiz, 1960. 552 p. (In Russ.).

10. Salous S. Radio propagation measurement and channel modelling. John Wiley and Sons Ltd, United Kingdom, 2013. 424 p.

11. Skljar B. Cifrovaja svjaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie: per. s angl. [Digital communications: fundamentals and applications: trans. eng.]. Moscow, «Viljams» publishing house, 2017. 1100 p. (In Russ.).

12. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ryabova N. V., Belgibaev R. R. Integriruemyj v sistemu KV-svyazi kompleks passivnogo zondirovaniya uporyadochennogo po chastote mnozhestva uzkopolosnyh kanalov [Multiple Narrowband Channels Passive Sounding Complex Integratable with HF Communication System]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya «Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy» [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2019. No 3 (43). Pp. 71-82. DOI: 10.25686/2306-2819.2019.3.71 (In Russ.).

The article was submitted 10.11.2021; approved after reviewing 30.11.2021; accepted for publication 15.12.2021

For citation: Ivanov D. V., Ivanov V. A., Elsukov A. A., Konkin N. A. Method for Simultaneous Multi-Carrier Testing of Ionospheric HF Radio Channels with Remote Data Processing and Analysis. Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems. 2021. No 4 (52). Pp. 6-23. DOI: <https://doi.org/10.25686/2306-2819.2021.4.6>

Information about the authors

Dmitry V. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of RAS, Vice-Rector for Research at Volga State University of Technology. Research interests – modeling of technical systems, wideband signals and the propagation of radio waves. The author of 295 scientific publications. ORCID: 0000-0002-3609-1157.

Vladimir A. Ivanov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, the Head of the Chair of Higher Mathematics, Volga State University of Technology. Research interests – ionosphere, the propagation of radio waves, modeling and broadband signals. The author of 385 scientific publications.

Aleksey A. Elsukov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Radio Engineering and Communication Department, Volga State University of Technology. Research interests – remote ionospheric sounding. The author of 68 scientific publications.

Nikita A. Konkin – PhD student at the Department of Radio Engineering and Communications of Volga State University of Technology. Research interests – the analysis of ionospheric sounding data. The author of 9 scientific publications. ORCID 0000-0001-7052-748X

Contribution of authors:

Ivanov D. V. – concept; data interpretation; final approval for publication, new methods and mathematical models.

Ivanov V. A. – design, data interpretation; preparing the paper and its final revision, final approval for publication

Elsukov A. A. – technical and software support in terms of implementing new methods, data gathering and analysis, gathering experimental data.

Konkin N. A. – development and software implementation of algorithms for remote control of the sounding system, data gathering and analysis.

Authors declare that they have no conflict of interest.

All authors read and approved the final manuscript.