

Исследование функции рассеяния КВ радиоканалов на основе зондирования квазизенитных радиолиний шумоподобными ФКМ сигналами

В.А. Иванов, А.А. Елсуков, М.И. Рябова

ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»
424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, дом 3
E-mail: IvanovVA@volgatech.net

Рассмотрены возможности применения шумоподобного ФКМ сигнала для вертикального зондирования NVIS радиолиний. Получены алгоритмы обработки ФКМ сигнала для оценки функции рассеяния упорядоченного по частоте множества каналов тактической КВ связи и ее параметров: отношения сигнал-шум, рассеяния во временной и частотной областях. Представлен разработанный для зондирования программно-аппаратный комплекс и обобщенные результаты экспериментальных исследований функции рассеяния радиоканалов с полосой 24 кГц на различных рабочих частотах.

The possibilities of using a noise-like PSK signal for vertical sensing of NVIS radio links are considered. Algorithms for processing a PSK signal are obtained for estimating the scattering function of a plurality of channels of tactical HF communication ordered by frequency and its parameters: signal-to-noise ratios, time and frequency scattering. A hardware-software complex developed for sensing and generalized results of experimental studies of the scattering function of radio channels with a band of 24 kHz at various operating frequencies are presented.

Введение

Квазизенитные радиолинии используются для тактической КВ связи (связи на расстояния до 400 км). В данном случае условия распространения характеризуются большими углами падения луча на ионосферу Земли, поэтому данная технология получила название NVIS (Near vertical incidence skywave). Технология NVIS особенно эффективна для организации связи в условиях сложного рельефа местности (например, в гористой местности (рис 1)).

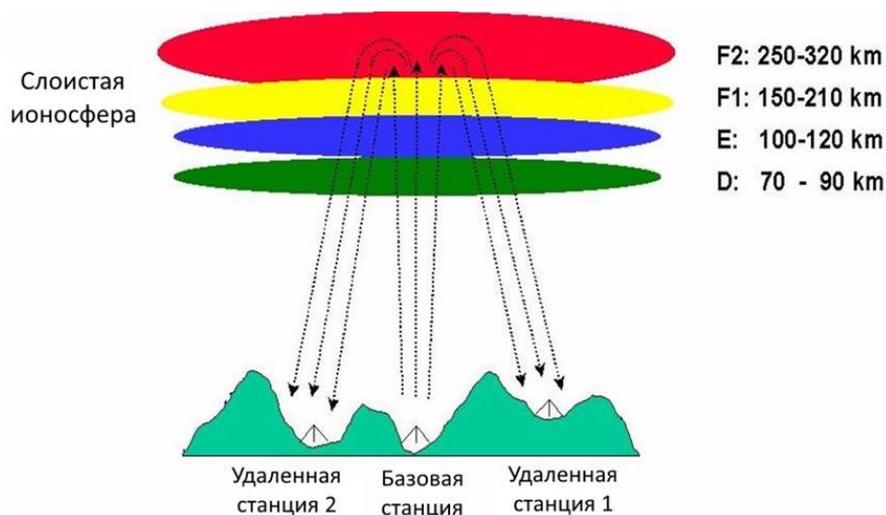


Рис. 1 – Квазизенитный радиоканал (NVIS) тактической КВ связи

Как видно из рисунка, отраженный сигнал приходит почти с зенита, поэтому неровности поверхности земли не оказывают негативного влияния на связь.

Для КВ связи характерно частотное разделение каналов, поэтому пригодный для связи частотный диапазон представляет собой многомерный радиоканал, компонентами которого служат парциальные частотные каналы [1].

В настоящее время ведутся активные работы по увеличению пропускной способности каналов КВ связи. Для этого решаются проблемы расширения полосы каналов до 24 кГц. Широкополосная КВ связь ставит задачи создания когнитивного радио, включающего когнитивное зондирование, когнитивный спектральный мониторинг помеховой обстановки и оценку на основе получаемых данных доступности каналов и условий распространения связных сигналов в них. Для когнитивного зондирования разрабатываются современные устройства, базирующиеся на *SDR* технологии и создающие минимальные внеполосные излучения, благодаря использованию сложных шумоподобных сигналов предельно малой мощности. При этом важной задачей становится разработка методик и алгоритмов обработки зондирующих сигналов для получения ключевых характеристик каналов. Одной из них является функция рассеяния канала (ФРК). Данная работа посвящена исследованиям возможностей использования для указанных целей шумоподобных ФКМ сигналов. Сигналы внутриимпульсной фазокодовой манипуляцией (ФКМ) относятся к классу сложных сигналов, база которых много больше единицы [2]. Такие сигналы широко используются в радиолокации и широкополосных системах связи, а в последнее время они стали использоваться для зондирования ионосферы [3, 4].

Функция рассеяния канала.

Теория ионосферного распространения радиоволн позволяет свести задачу распространения сигнала в среде к эквивалентной задаче прохождения им некоторой линейной системы с частотной характеристикой $H(j\omega, T)$. При этом каждому парциальному частотному каналу на рабочей угловой частоте $\bar{\omega}$ можно поставить в соответствие импульсную характеристику (ИХ) $h(\bar{\omega}, \tau, T)$, где τ - быстрое время (задержка в канале), T - медленное геофизическое время.

Импульсная характеристика для ионосферных каналов является стохастической функцией. Поэтому для статистически устойчивых оценок состояния канала используется функция рассеяния канала (ФРК):

$$G(\tau, F_d) = \frac{1}{T_a} \left| \int_0^{T_a} h(\tau, T) \exp(-i2\pi F_d T) dT \right|^2, \quad (1)$$

где T_a - время анализа импульсной характеристики, F_d - доплеровское смещение частоты в канале.

В случае многолучевого (из K лучей) приема ФРК будет представлять собой сумму слагаемых вида (1) по лучам. Для гауссовой модели ФРК ее можно записать в виде формулы:

$$G(\bar{\omega}, \tau, F_d) = \sum_{k=1}^K \left(\frac{S}{N} \right)_k \exp \left[-\frac{(\tau - \bar{\tau}_k)^2}{2\sigma_{k\tau}^2} - \frac{(F_d - \bar{F}_{kd})^2}{2\sigma_{kF}^2} \right], \quad (2)$$

где k - номер луча, $\frac{S}{N}$ - параметр, являющийся отношением сигнал-шум в канале,

σ_τ - параметр рассеяния импульсной характеристики по задержке, σ_F - параметр рассеяния импульсной характеристики по частоте (доплеровской).

Если параметры рассеяния канала не превышают предельных значений и отношение сигнал-шум не опускается ниже заданного уровня, то канал считается пригодным для связи. Предельные значения параметров ФРК задаются характеристической функцией модема (ХФМ) [1]. Это функция трех переменных: отношение сигнал/шум, рассеяние по задержке и рассеяние по Доплеру $\left(\frac{S}{N}, \sigma_F, \sigma_\tau\right)$.

Обычно задается поверхность уровня ХФМ, показывающая при каких значениях параметров ошибка передачи бита не превышает 10^{-3} . Ее аппроксимируют прямоугольным параллелепипедом (рис.2).

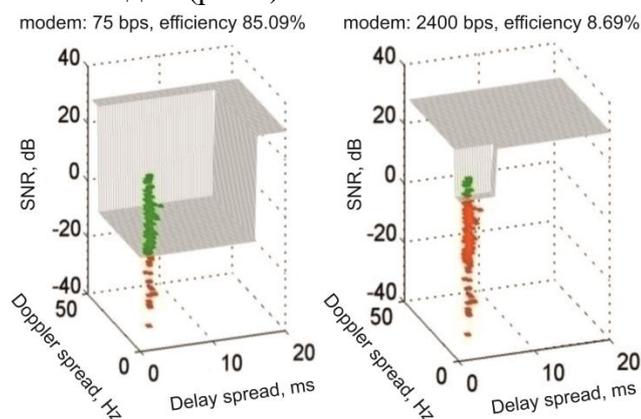


Рис.2- Характеристические функции модемов для разных скоростей передачи данных и параметры ФРК, характеризующие изменение состояния канала с течением времени

Если состояние канала таково, что точка с координатами, равными параметрам ФРК, попадает в прямоугольный параллелепипед, то канал является кондиционным для данного модема связи, а если она находится вне его, то - некондиционным. На рис. 2 некондиционные каналы отмечены красным цветом.

Для определения текущего состояния канала используется его зондирование радиосигналом соответствующей формы. Сигнал должен удовлетворять техническим возможностям аппаратуры, обладать достаточной разрешающей способностью и необходимыми энергетическими характеристиками. Учитывая современные возможности обработки сигналов, для зондирования и локации применяют сигналы сложной формы с внутриимпульсной модуляцией называемые также шумоподобными. Применительно к зондированию и локации эти сигналы позволяют добиваться повышенной помехоустойчивости и разрешающей способности. Такими возможностями обладает сигнал с двоичной фазокодовой манипуляцией (ФКМ) [3,4].

ФКМ сигнал для вертикального зондирования ионосферы

Сигналы ФКМ представляют собой примыкающие равные по длине отрезки (чипы) гармонического колебания, общей длительностью $T_s = L \cdot \delta T$ и количеством L . При переходе от одного чипа к другому начальная фаза колебания может скачком меняться на π . Математическая модель чипа импульсного ФКМ сигнала при условии $\omega_c \delta T = 2\pi$ имеет вид:

$$u_T(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^L \exp j\vartheta_i \cdot \exp j\omega_c t & \forall t \in [0, L \cdot \delta T] \\ 0 & \forall t \notin [0, L \cdot \delta T] \end{cases}, \quad (3)$$

где δT - длительность чипа, ϑ_i - начальная фаза колебания в чипе, принимающая значения $0, \pi$ в зависимости от применяемого в ФКМ сигнале кода, ω_c - угловая несущая.

Его спектр равен $U_T(j\omega)$. Известно, что амплитудный спектр ФКМ сигнала с кодом Баркера можно представить формулой:

$$|U_T(j\omega)| = \delta T \cdot |\sin c(\omega\delta T/2)| \cdot \left| \left[N \pm \frac{\sin L\omega\delta T}{\sin \omega\delta T} \right]^{\frac{1}{2}} \right|. \quad (4)$$

Знак "+" соответствует $N = 5, 13$ а "-" $N = 3, 7, 11$.

При вертикальном зондировании длительность группового ФКМ сигнала ограничена требованием его приема с минимальной высоты отражения, которая определяется высотой менее 90 км (слой E (рис 1)). В этом случае она должна быть меньше 0,6 мс. При зондировании излучение сигнала повторяется. Частота повторения обусловлена диапазоном зондируемых высот, который должен быть не менее 750 км. Поэтому период повторения T_r будет не меньше 5 мс (рис 3б). В этот диапазон попадают односкачковые отражения от всех слоев ионосферы и 2-х скачковые отражения от F-слоя. Диапазон повторения зондирования на выбранной несущей определяется временем когерентности канала, которое в среднем составляет примерно 10с.

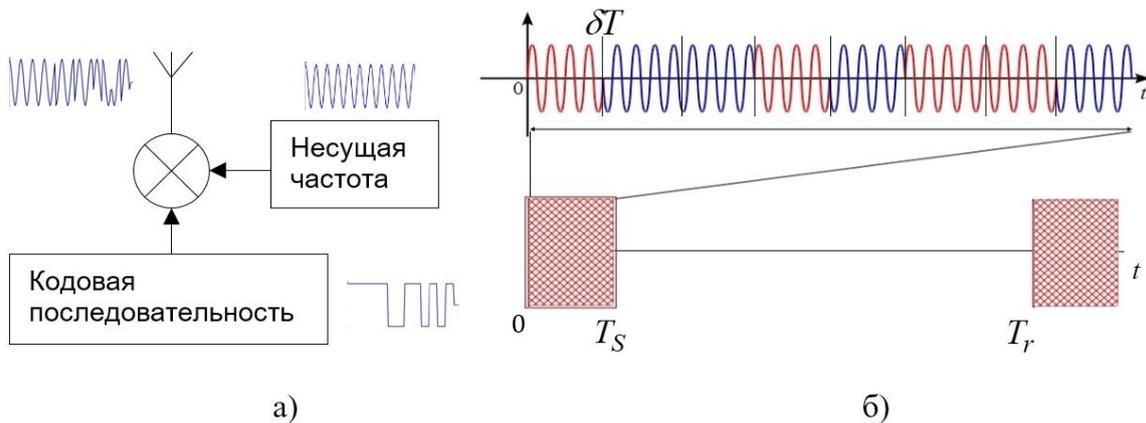


Рис. 3а – Схема формирования ФКМ сигнала, б - ФКМ импульс

Длительность чипа определяет длительность главного лепестка автокорреляционной функции сжатого ФКМ сигнала, равной разрешающей способности метода по задержке. Она не может быть больше полосы когерентности зондируемого канала, составляющая при вертикальном зондировании (ВЗ) около 30кГц [5]. Поэтому $\delta T < 33$ мкс и число чипов в групповом сигнале не должно превышать $L \leq$

18.Этому условию удовлетворяет код Баркера с $L = 13$. В случае его использования при $\delta T = 40$ мкс длительность импульса будет составлять $T_S = 520$ мкс.

Энергетическая эффективность импульсного зондирующего сигнала, влияющая на отношение сигнал – шум при приеме, определяется его энергией $E = P_s \cdot T_s$. Измерение при зондировании доплеровского смещения частоты эквивалентно когерентному накоплению сжатого ФКМ сигнала. Поэтому энергия сигнала увеличивается за счет длительности группового сигнала, отнесенной к длительности чипа, а также за счет роста отношения времени его анализа к периоду повторения.

Алгоритмы определения ФРК и основных параметров парциальных каналов

Согласованная обработка зондирующего ФКМ сигнала предполагает определение по результатам зондирования взаимной корреляционной функции (ВКФ). Для теоретического обоснования метода определения по результатам зондирования ФРК произвольного канала воспользуемся теоремой Рэлея и теоремой сдвига для преобразования Фурье. Получим:

$$B_{TR}(\tau, T) = \int_{-\infty}^{\infty} u_R(t) \cdot u_T^*(t - \tau) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} U_R(j\omega, T) \cdot U_T^*(j\omega) \exp j\omega\tau \cdot d\omega. \quad (5)$$

Рассмотрим спектр принимаемого сигнала, который своей полосой частот B_{ch} на частоте $\bar{\omega}$ задает в среде узкополосный (в математическом смысле) радиоканал $B_{ch} \ll \bar{\omega}$. С учетом этого спектр принимаемого сигнала можно записать в виде:

$$U_R(j\omega, T) = U_T(j\omega) \cdot H(j\omega, T). \quad (6)$$

Произведение спектров можно записать в следующем виде:

$$U_R(j\omega, T) \cdot U_T^*(j\omega) = |U_T(j\omega)|^2 \cdot H(j\omega, T) \approx const \cdot H(j\omega, T). \quad (7)$$

Итак, формула(5) преобразуется к виду:

$$h(\bar{\omega}, \tau, T) = \frac{B_{TR}(\tau, T)}{const}. \quad (8)$$

Формула (8) задает алгоритм определения по результатам зондирования комплексной импульсной характеристики канала. Используя формулу (2) и полученные об импульсной характеристике данные, можно вычислить ФРК.

Упрощенная схема алгоритма вычисления ФРК, представлена на рис. 4. Несколько импульсных характеристик, полученных друг за другом, объединяются в матрицу по столбцам. Затем по строкам вычисляется дискретное преобразование Фурье.

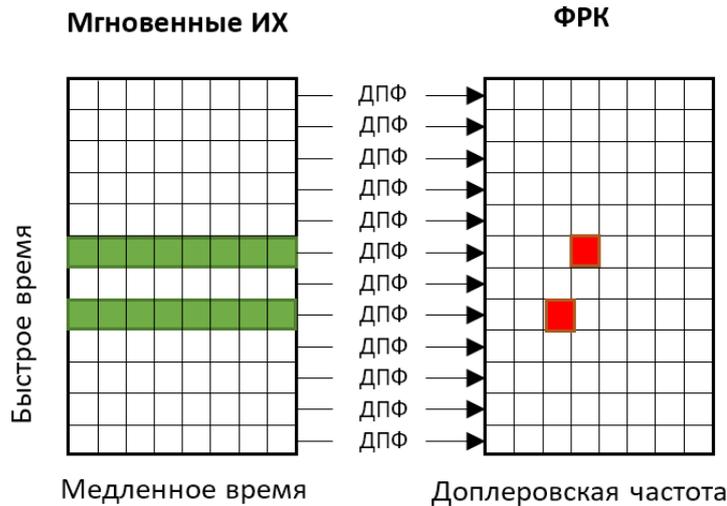


Рис. 4. Алгоритм вычисления ФРК.

«Ширина» ФРК по быстрому времени и доплеровскому смещению являются параметрами рассеяния парциального канала σ_τ и σ_d .

Для оценки параметров по полученной ФРК применяются пороговые методы разделения отсчетов шума и отсчетов сигнал+шум. Для задания порога нами применяются современные методы: медианной фильтрации и CFAR [6, 7].

Экспериментальные результаты

Экспериментальные данные получены с помощью разработанного нами ФКМ ионозонда [8-10]. Он реализован на платформе USRPN210 по SDR-технологии. Поэтому разработка сводилась к созданию алгоритмов и программного обеспечения. В устройстве использовалась антенна АН – 710 типа T2FD, расположенная на высоте 17 м над землей. Мощность зондирующего ФКМ сигнала составляла около 19 Вт. Эксперименты проводились в г. Йошкар-Ола.

На рис. 5 представлены характерные примеры полученных при зондировании на разных рабочих частотах ФРК соответствующих им каналов.

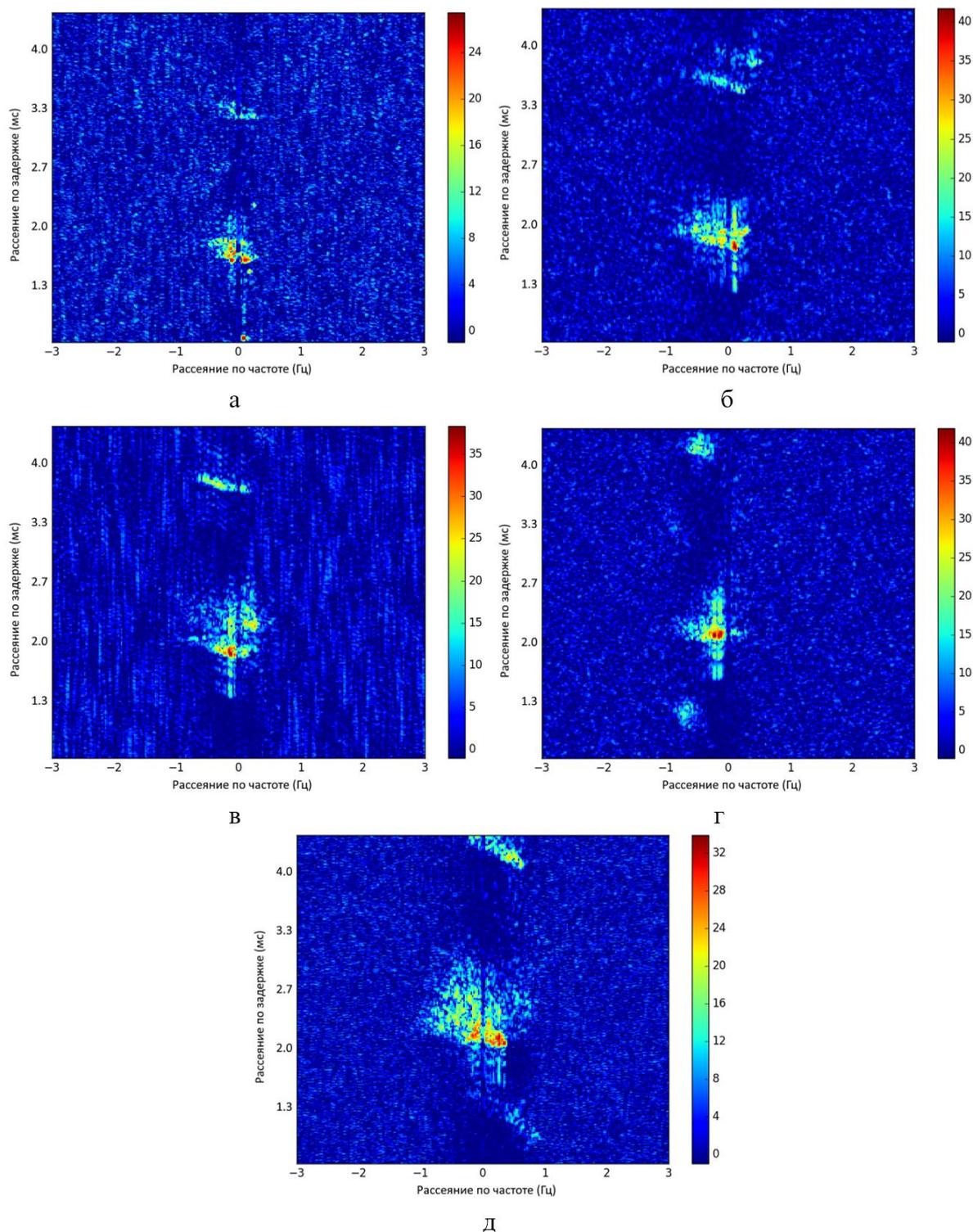


Рис. 5 Экспериментальные ФРК, полученные днем на рабочих частотах: а) 3,6 МГц; б) 4,8 МГц; в) 5,1 МГц; г) 5,5 МГц; д) 5,8 МГц

Проведенные эксперименты показали, что рассеяние во временной и частотной областях увеличивается с ростом рабочей частоты канала.

Полученные о параметрах рассеяния данные 100 сеансов зондирования обобщены на рис. 6. Линиями и цветом выделены области значений параметров для характерных состояний (в соответствии с классификацией МСЭ [11]) канала.

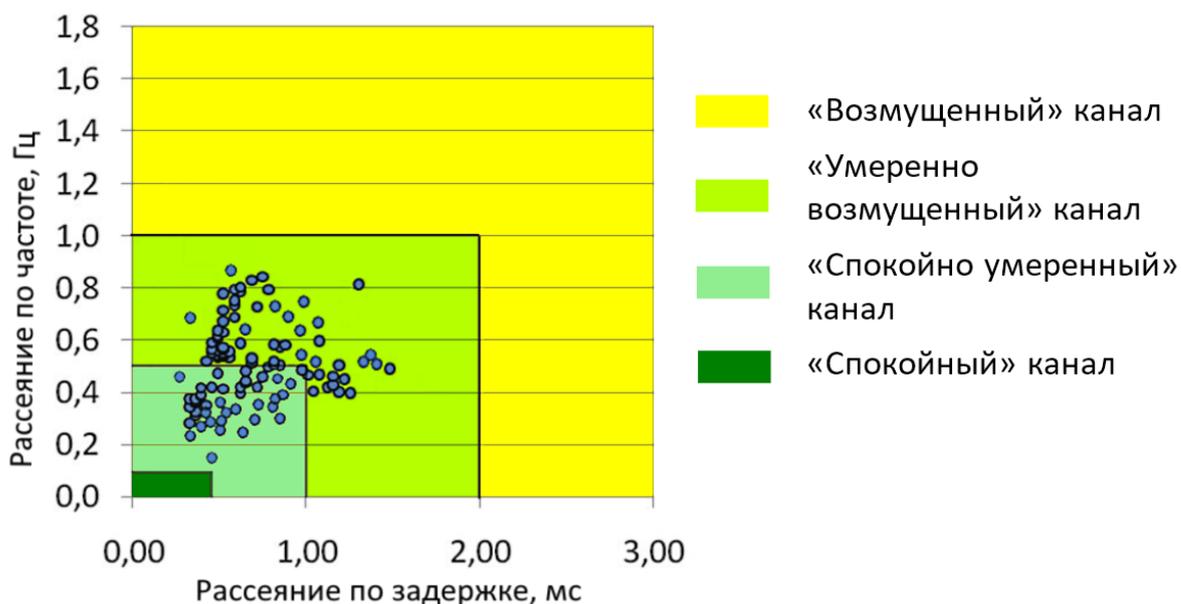


Рис 6. Результаты измерения ФРК по задержке и доплеровской частоте.

Видно, что большинство (70 %) полученных значений параметров рассеяния соответствуют «умеренно возмущенным» каналам, а остальные - «спокойно умеренным».

Выводы

Рассмотрены особенности применения ФКМ сигнала в задаче определения параметров ФРК каналов *NVIS* связи. Установлено, что в 70% случаев каналы на разных рабочих частотах находились в умеренно возмущенном состоянии. Остальные 30% в спокойно умеренном состоянии. Экспериментально получено, что параметры рассеяния во временной и частотной областях увеличиваются с ростом рабочей частоты канала.

Предложенные подходы могут найти применение в перспективных системах ближней когнитивной КВ связи, предназначенной, в том числе, для работы в регионах со сложным рельефом местности.

Работа выполнена при поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований: № 19-07-00629; № 18-07-01377.

Литература

1. Иванов Д.В., Иванов В.А., Рябова Н.В., Бельгибаев Р.Р., Елсуков А.А., Рябова М.И., Чернов А.А. Многомерный ионосферный радиоканал и связанные с ним проблемы работы модемов высокочастотной связи // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2014. № 4 (23). С. 6-22.
2. Кук Ч., Бернфельд М.М. Радиолокационные сигналы. Теория и применение // М.: Советское радио, 1971. – 567 с.
3. Bianchi, C.; Sciacca, U.; Zirizzotti, A.; Zuccheretti, E.; Arokiasamy, B.J. Signal processing techniques for phase-coded HF-VHF radars. Ann. Geophys. 2003, Vol 46
4. V.A. Ivanov, D.V. Ivanov, A.A. Elsuikov, V.V. Ovchinnikov, N.V. Ryabova and M.I. Ryabova, BPSK signal shaping and processing for digital SDR ionosonde // 2018

Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2018-January, pp. 1-5.

5. Иванов, Д.В. Оптимальные полосы частот сложных сигналов для декаметровых радиолоний // Радиотехника и электроника. – 2006. – Т. 51, № 4. – С. 389-396.
6. Иванов В.А., Иванов Д.В. Рябова Н.В. Рябова М.И. Овчинников В.В., Елсуков А.А. Алгоритмы обнаружения полезного сигнала на фоне помех и их верификация для универсального цифрового ионозонда, созданного по SDR-технологии // Взаимодействие полей и излучения с веществом: XV Конференция молодых ученых, Иркутск, 11-16 сентября 2017 г. – Иркутск 2017. – С. 181-183.
7. Елсуков А.А., Иванов Д. В. Адаптивный алгоритм CFAR для обнаружения радиосигнала в задачах зондирования ионосферы и каналов КВ связи // Распространение Радиоволн. Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции. - 2019, - Т. 2 - С. 139-142
8. D.V. Ivanov, V.A. Ivanov, N.V. Ryabova, A.A. Elsukov, R.R. Belgibaev and V.V. Ovchinnikov, Universal ionosonde for diagnostics of ionospheric HF radio channels and its application in estimation of channel availability // IET Conference Publications, 2018 (CP741).
9. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Elsukov A.A., Ryabova M.I., Chernov A.A. Software-defined radio technology in the problem concerning with the successive sounding of HF ionospheric communication channels // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. 7(61). P. 767-775. DOI: 10.1134/S1064226916070068
10. Ivanov D.V., Ivanov V.A., Ryabova N.V., Elsukov A.A., Ryabova M.I., Chernov A.A. Software-defined radio technology in the problem concerning with the successive sounding of HF ionospheric communication channels // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. 7(61). P. 767-775. DOI: 10.1134/S1064226916070068
11. ITU-R Recommendation F.1487. Testing of HF Modems with Bandwidths of Up to about 12 kHz Using Ionospheric Channel Simulators – 2000. - 13p.