

# Моделирующий комплекс для радиосетей КВ-диапазона

А. Ю. Дорогов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
vaksa2006@yandex.ru

**Аннотация.** Рассмотрен моделирующий комплекс для радиосетей КВ-диапазона. Программная модель соответствует рекомендации МСЭ-R P.533-13 Международного Союза Электросвязи (ITU). Приведено описание моделей для режимов «Точка-точка» и «Зона». Комплекс позволяет прогнозировать характеристики радиолиний и зонового радио-покрытия в зависимости от географических координат, времени, месяца, солнечной активности и выбранных системных параметров.

**Ключевые слова:** ионосфера; радиолиния; радиозона; радиосеть; применимые частоты; отношение сигнал/шум

## I. ВВЕДЕНИЕ

Ионосферная радиосвязь в КВ диапазоне (3÷30 МГц) является экономически эффективной средой для многих видов телекоммуникационных услуг, требующих передачи данных за пределы линии прямой видимости. Высоконадёжная сеть КВ-диапазона масштаба страны является недорогой альтернативой спутниковым системам связи при предоставлении телекоммуникационных услуг службам МЧС, РЖД, силовым ведомствам, а также региональным администрациям и многочисленным хозяйственно-экономическим структурам.

Для КВ-диапазона определяющим фактором распространения радиоволн является наличие околосферной ионосферы. Структура и свойства ионосферы сильно изменяются с высотой. Процессы, протекающие в ионосфере тесно связаны с волновым и корпускулярным излучением Солнца, с процессами в магнитосфере и вариациями магнитного поля Земли, с движением верхней атмосферы и т.д. Этим обусловлена сильная изменчивость свойств ионосферы во времени (в зависимости от времени суток, времени года, циклов солнечной активности), а также в зависимости от высоты, географической широты и долготы.

Сложность и постоянная изменчивость структуры ионосферы, наличие множества факторов оказывающих влияние на распространения радиоволн в такой среде, а также сложная топология сетей связи приводят к необходимости компьютерного моделирования передачи данных в сетях КВ-диапазона.

Следующие физические явления КВ-диапазона, оказывают существенное влияние на построение протокола передачи данных [1]:

- нестационарная помеховая обстановка, вызванная работой изменяющимися условиями распространения радиоволн и сторонних систем радиосвязи;
- неселективные замирания длительностью 4...20 секунд;
- многолучевое распространение сигнала с временем многолучёвости до 5...6 мс, и доплеровским размытием между лучами до 2 Герц;
- сосредоточенные помехи в канале с уровнем до + 60 Дб от уровня сигнала.

Международным Союзом Электросвязи (ITU) разработана математическая модель для прогнозирования рабочих характеристик ВЧ-линий. Модель оформлена в виде рекомендации МСЭ-R P.533-13 (07/2015) и программных средств для ОС Windows на языке Fortran [2]. Модель позволяет производить расчёт характеристик КВ-радиолиний с протяжённостью до 9000 км (в режиме «Точка-точка») и радиозон покрытия (в режиме «Зона»). Программные средства доступны в виде исполняемых программ моделирующего комплекса и исходных кодов отдельных подпрограмм. В состав комплекса входит база данных антенн и редактор для изменения их характеристик.

Следует отметить, что исходные коды написаны на языке Fortran старой версии и поэтому требуют адаптации к современным компиляторам. В составе исходных кодов отсутствует пользовательский интерфейс для моделирующего комплекса в целом. Для отдельных подпрограмм представлен управляющий интерфейс, реализованный на основе устаревшей библиотеки ClearWin+. Исходные коды представляют собой набор подпрограмм и статических библиотек из программных модулей. Программный интерфейс к модулям не стандартизован. Указанные обстоятельства потребовали модификации исходного программного обеспечения и разработки собственного программного и пользовательского интерфейса для моделирующего комплекса. В новом варианте программный и пользовательский интерфейсы были реализованы средствами программной среды Матлаб. Новый моделирующий комплекс использует структуру директориев исходного комплекса, и полностью совместим с ним по форматам хранения данных.

## II. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ «ТОЧКА-ТОЧКА»

Программная модель предназначена для прогнозирования характеристик радиолинии между приёмником и передатчиком. Для сетевой поддержки реализован режим расчёта характеристик для набора радиолиний. Исходными данными программы являются:

- координаты размещения приёмника и передатчика;
- характеристики приёмной и передающей антенны;
- мощность передатчика;
- время (1-24 час);
- месяц (1-12);
- год;
- расчётные частоты (до 10);
- солнечная активность.

Расчёт характеристик выполняется по всем частотам, по всем месяцам для каждого часа суток. Объем расчётов можно ограничить, конкретно указав желаемые частоты, часы и месяцы. Солнечная активность определяется числом солнечных пятен и устанавливается по номеру года из хранимого файла данных.

Радиоволны в КВ-диапазоне распространяются за счет отражения от ионизированных слоев ионосферы. Закон секанса устанавливает связь между частотами радиоволн, отражающихся от ионосферы при вертикально направленном излучении  $f_v$ , и частотами радиоволн, отражающихся от той же области ионизации в случае наклонного излучения. Закон секанса описывается выражением:

$$f_{\text{накл}} = f_v \sec \varphi_0$$

где  $\varphi_0$  – это угол между нормалью к ионосферному слою и направлением падающего на него луча.

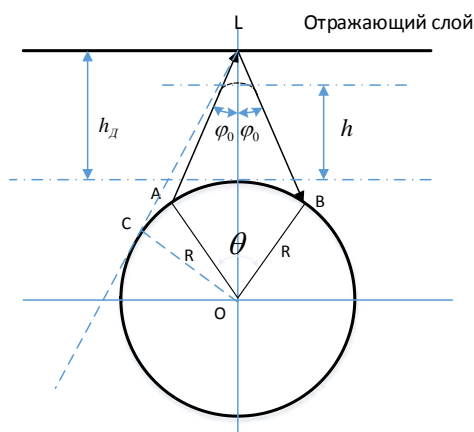


Рис. 1. Схема отражения радиоволны от ионизированного слоя

Отражающими слоями ионосферы могут быть F1, F2 и E. Слои находятся на разной высоте, наличие слоев в ионосфере зависит от времени суток и солнечной

активности. Отражение возможно от всех слоев, слой, который обеспечивает максимальный сигнал в точке приёма, называется модой. На рис. 1 показана схема односкачковой трассы распространения, дальность односкачковой связи ограничена геометрией Земли (точка C – на рисунке). Предельное значение угла отражения определяется выражением:

$$\sin \varphi_0 = \frac{R}{R + h_D},$$

где  $R$  – средний радиус Земли ( $R = 6371.0$  км),  $h_D$  – действующая высота отражающего слоя,  $h$  – фактическая высота слоя, Ограничение угла  $\varphi_0$  ведёт к ограничению возможного расстояния односкачковых трасс ( $2000 \div 4000$  км). На рис. 2 показаны моды распространения по расчетным частотам на июнь 2018 г. для трассы Улан-Уде – Екатеринбург (расстояние 3036 км).

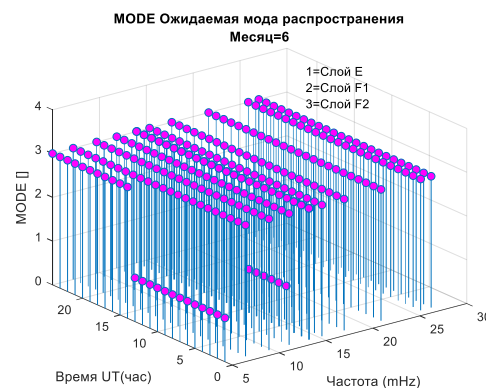


Рис. 2. Ожидаемые моды распространения по расчетным частотам

Возможны также много скачковые трассы, позволяющие радиоволне обогнуть земной шар. В программе есть возможность выбора расчёта для «короткого» или «длинного» пути. На рис. 3 для этой же трассы показаны количество скачков для расчетных мод «короткого» пути.

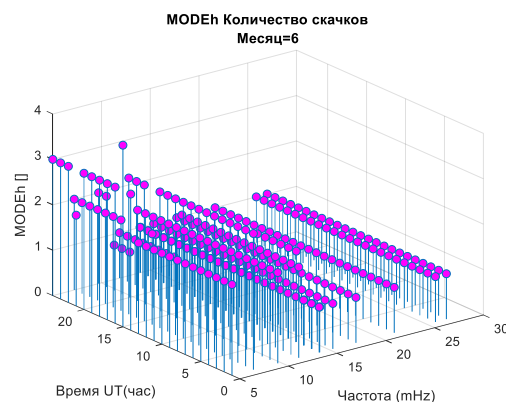


Рис. 3. Количество скачков для расчетных мод

Программа вычисляет азимуты направления антенн и углы возвышения антенн для расчетных частот. В

соответствии с рекомендацией МСЭ-R P.533-13 программа позволяет вычислить медианные оценки следующих характеристик:

'DBU' – dB(1uV/m)) – медиана напряженности поля, ожидаемая в месте приема взятая по выборке для всех дней месяца (в дицибелах относительно микровольта на метр).

dBrpW' – (dBrpW) Медиана мощности сигнала взятая по выборке для всех дней месяца ожидаемая в месте приема (в дицибелах относительно пиковатта).

'S/N' – (dB) – месячная медиана отношения сигнал/шум (S/N) для ожидаемой моды в полосе частот BandWidth (REC533-13 п.7).

'FS/N' – расчетная надежность. Диапазон [0 – 0.99]. Вероятность того, что отношение сигнал/шум (SNR) превысит требуемое значение (Req. SNR).

'SNxx' – (dB) – отношение сигнал/шум для требуемой надежности.

На рис 4. показана медиана мощности сигнала в точке приёма трассы Улан-Уде – Екатеринбург.

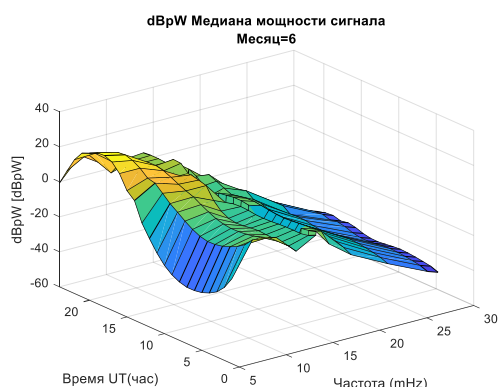


Рис. 4. Мощность сигнала в точке приема по расчетным частотам

На рис. 5 показано отношение сигнал/шум для этой же радиолнии. В процессе расчета строятся графики для максимальной, минимальной и оптимальной применимых частот (рис. 6).

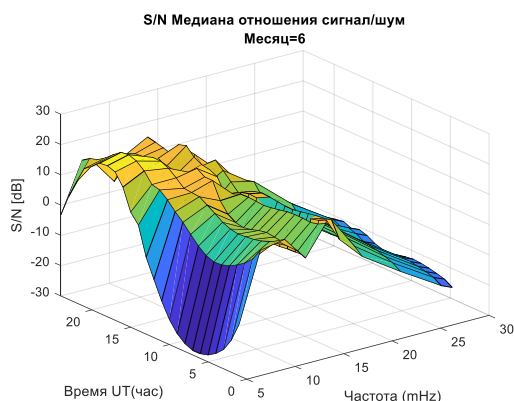


Рис. 5. Отношение сигнал/шум

На этапе проектирования радиолнии задаются требуемые системные параметры, которые учитываются при расчетах, к ним относятся:

Req. Rel. (%) – требуемая надежность радиолнии, оценивается процентом дней в течение месяца, когда сигнал имеет допустимое качество. Диапазон значений [1÷99]%, по умолчанию 90%.

Req. SNR (dB) – требуемое отношение медианы почасовой выборки сигнальной мощности к медиане почасовой выборки шума в полосе 1 Гц, которую необходимо обеспечить для требуемого типа и качества обслуживания. Диапазон значений [-30 – 9 dB], по умолчанию 73 dB.

Noise (dBW) – определяет уровень техногенного шума в приемнике в dBW (децибел на Ватт) в полосе 1 Гц на частоте 3 MHz, значение по умолчанию -145 dBW.

BandWidth (Гц) – полоса приема. Расчетная ширина полосы шума на приемнике.

Для цифровой модуляции дополнительно задаются частотное и временное окно кодовых посылок.

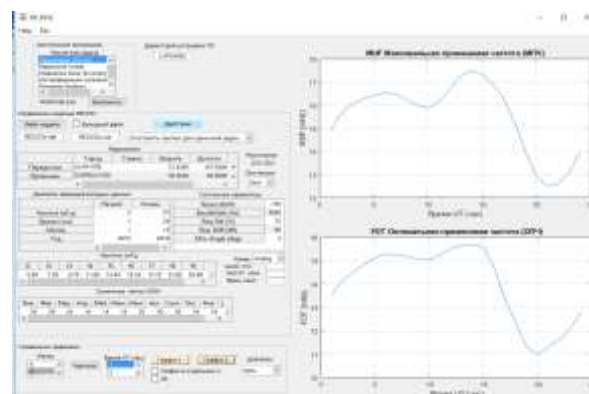


Рис. 6. Пользовательский интерфейс программы

На рис. 6 показан пользовательский интерфейс программы. В поле управления размещены два окна графического отображения расчётных характеристик. Любое число графиков можно показать в дополнительных окнах. Результаты расчетов могут быть сохранены в виде таблицы в формате csv.

### III. ПРОГРАММНАЯ МОДЕЛЬ «ЗОНА»

Программная модель предназначена для прогнозирования распространения сигнала в радиозоне. Зона задается относительно выбранного центра зоны в градусах или в километрах по направлениям «на Восток», «на Запад», «на Север», «на Юг». Отдельно указывает место размещения передатчика, мощность передатчика и характеристики передающей антенны. Зона покрывается равномерной сеткой, в узлах которой находятся приемники. Минимальный размер сетки 5×5, максимальный 999×999. Все приемники имеют совпадающие характеристики антенн. Расчет производится для 1÷9 возможных вариантов. Варианты отличаются по частоте, номеру месяца, часу суток и солнечной

активности. Солнечная активность определяется числом солнечных пятен и устанавливается по номеру года.

На рис. 7 показан 3D график изменения отношения сигнал/шум в зоне размером 1000×1000 км., центром которой является Москва.

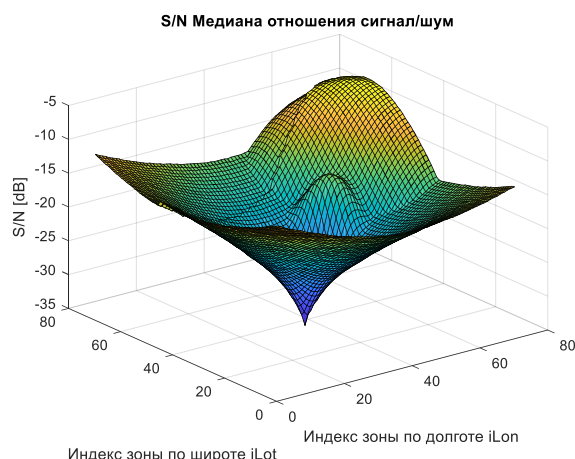


Рис. 7. Функция изменения сигнал/шум в радиозоне 3D представлении

Передатчик размещен в центре зоны. Зона покрыта сеткой размером 71×71. При отображении характеристик зоны в режиме 2D используется цветовая палитра. В плоскости графика можно интерактивно выбрать точку с желаемой интенсивностью, которая отображается маркером, и сохраняется по географическим координатам и уровню в таблице маркеров.

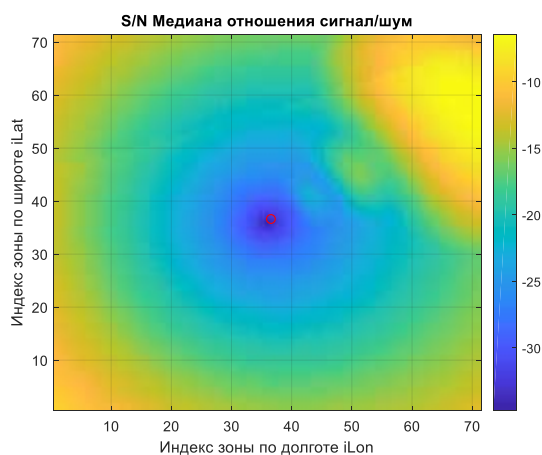


Рис. 8. Функция изменения сигнал/шум в 2D представлении

Программа позволяет вычислить в зоне медианные оценки следующих характеристик:

- ожидаемую моду распространения для каждого узла сетки зоны;
- угол возвышения приемной антенны в узлах зоны;
- 'DBU' dB(1uV/m) – медиана напряженности поля, ожидаемая в узлах приема для всех вариантов (в дицибелах относительно микровольта на метр);

- 'S/N' (dB) – месячная медиана отношения сигнал/шум (S/N) в узлах сетки для ожидаемой моды в полосе частот BandWidth для всех расчетных вариантов;
- 'FS/N' – расчетная надежность радиолоний в узлах сетки. Диапазон [0 ÷ 0.99]. Вероятность того, что отношение сигнал/шум (SNR) превысит требуемое значение (Req. SNR) для всех расчетных вариантов;
- 'SNxx' (dB) – отношение сигнал/шум в узлах сетки для требуемой надежности для всех расчетных вариантов.

Радиозона может быть отображена на географической карте в цветовой палитре. Интерактивный маркер позволяет определить координаты желаемой точки на карте (рис. 9).

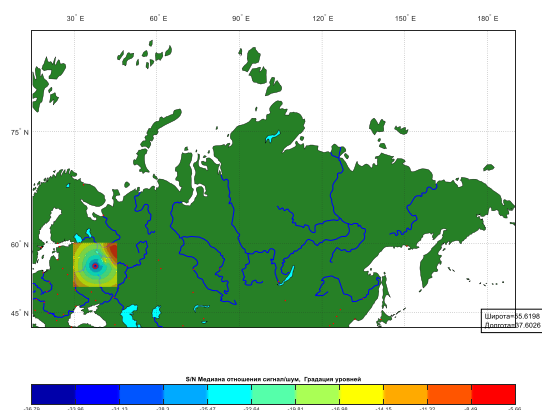


Рис. 9. Отображение радиозоны на географической карте

При расчете радиозоны используются системные параметры, которые задаются также как для программной модели «Точка-точка».

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирующий комплекс обеспечивает проектировщиков расчётными данными достаточными для оценки характеристик радиоканалов сетей КВ-диапазона. В расширенном варианте комплекс будет содержать возможность выбора типа цифровой модуляции и расчета битовых ошибок передаваемых сообщений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Побережский Е.С. Характеристики типичных коротковолновых трасс. Техника средств связи. Серия Техника радиосвязи 1978 г. Выпуск 9. стр. 88-92
- [2] Institute for Telecommunication Sciences / Resources / Radio Propagation Software / High Frequency / REC533 Propagation Model, <https://its.bldrdoc.gov/resources>