



С ПРОМЫШЛЕННОСТЬЮ НА ОДНОЙ ВОЛНЕ

Моделирование ДКМВ-радиосети Арктического региона

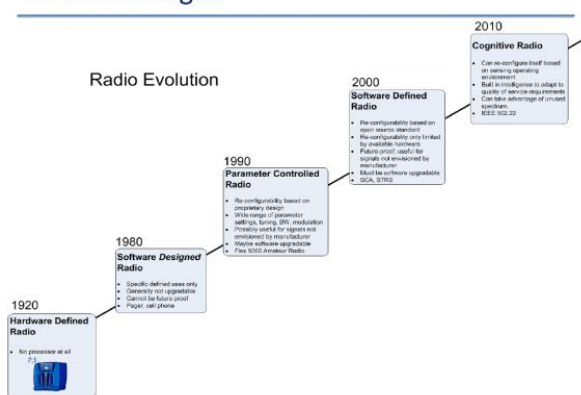
Ашаева Полина Александровна, техник ИРФЭ ОНЦ СО РАН,
Зачатейский Дмитрий Евгеньевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ИРФЭ ОНЦ СО РАН, заместитель начальника отдела АО «ОНИИП»,
Кривальцевич Сергей Викторович, к.ф.-м.н., доцент, и.о. директора ИРФЭ ОНЦ СО РАН, заместитель генерального директора по науке АО «ОНИИП», зав. кафедрой МРС ОмГУ им. Ф.М. Достоевского,
Степанова Елизавета Андреевна, к.т.н., с.н.с. ИРФЭ ОНЦ СО РАН.

ИНСТИТУТ РАДИОФИЗИКИ И ФИЗИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ ОНЦ СО РАН
Лаборатория когнитивных систем связи, навигации, локации и мониторинга

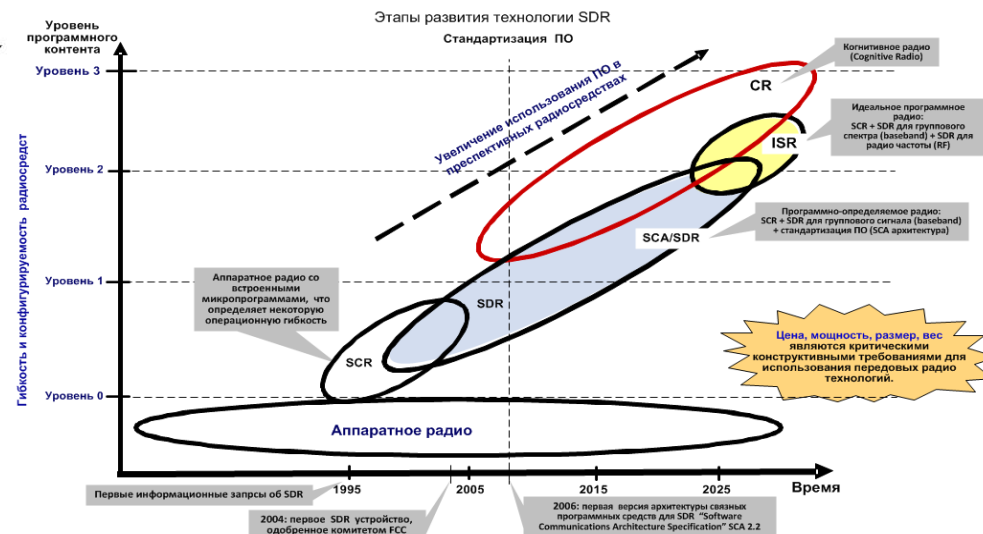


SDR Advantages

Повышение эффективности инфокоммуникационных систем в условиях арктической зоны РФ предлагается реализовать за счет применения технологий когнитивной (адаптивной) радиосвязи, считающейся в настоящее время «пиком эволюции» радиосистем и более детальным учетом сложных условий эксплуатации техники на Севере.



Исследования носят междисциплинарный характер и объединяют направления работ по радиофизике, радиотехнике, информатике и функциональной электронике.

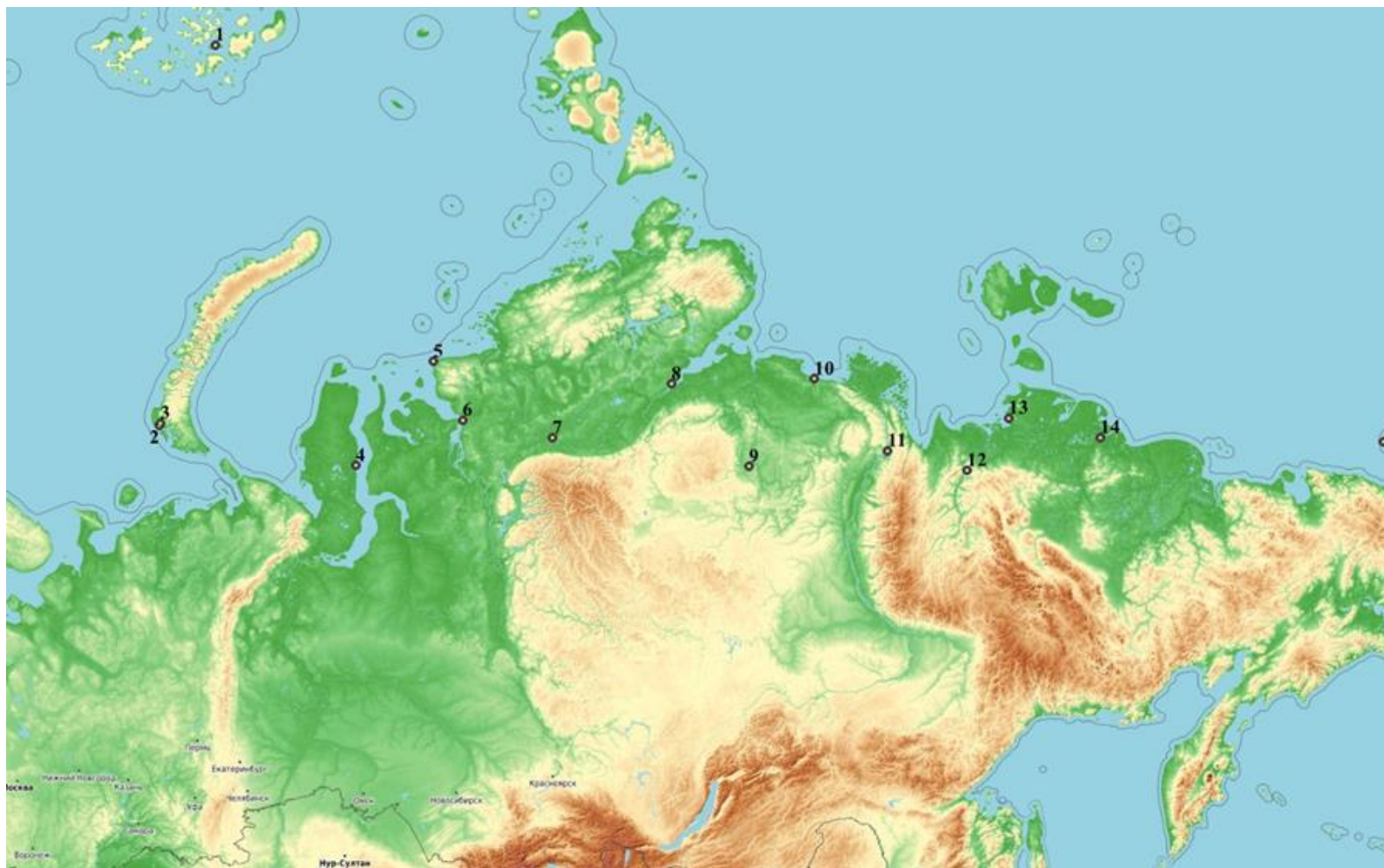


Уровни конфигурируемости программного радио:

- Уровень 0** — неконфигурируемое радио (hardware radio)
- Уровень 1** — программно-управляемое радио ((Software-Defined Radio, SDR) с ограниченным набором контролируемых функций.
- Уровень 2** — программно-определяемое радио (Software-Defined Radio, SDR), значительная часть свойств определяется программно, РЧ интерфейс (RF front-end) реализуется аппаратно.
- Уровень 3** — полностью программируемое идеальное цифровое радио (Ideal Software Radio, ISR), в котором граница между программным и аппаратным максимально возможно приближена к антенне и РЧ интерфейс доступен программной настройкой.

Software Communication Architecture (SCA) - Спецификация архитектуры связанных программных средств

Из всей совокупности возможных вариантов географического размещения пунктов связи мы выбрали 15 «самых северных», расположенных на территории РФ.

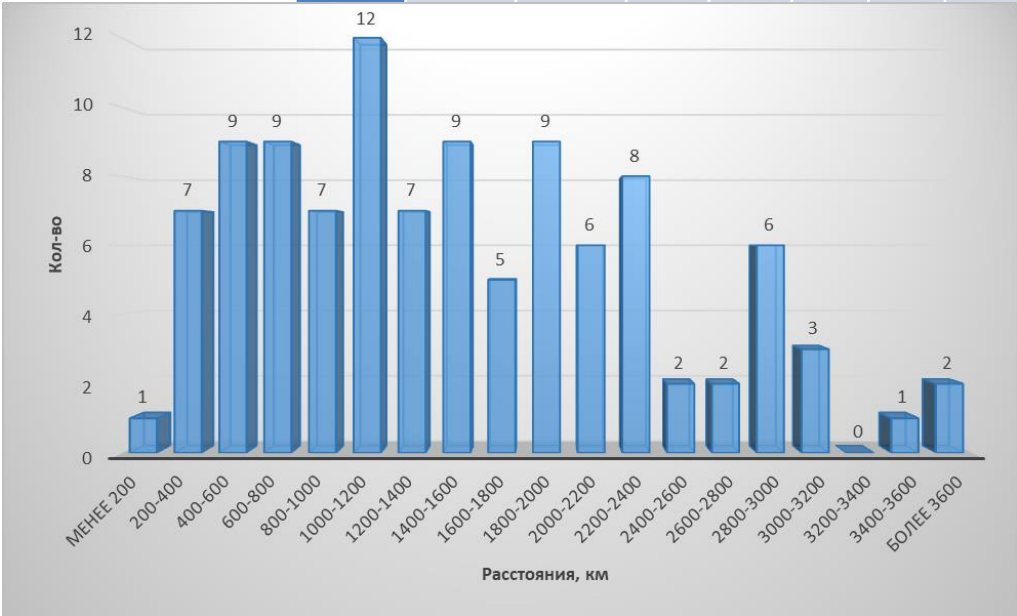


Список самых северных поселений в мире // Википедия : свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki> (дата обращения: 17.02.2021).



В созданной на основе пакета Quantum GIS геоинформационной системе (авторы выражают благодарность за помощь с.н.с. ИРФЭ ОНЦ СО РАН, к.ф.-м.н. Яценко А.С.) были рассчитаны расстояния между населёнными пунктами.

| | | Широта | 80,62 | 71,53 | 71,6 | 70,2 | 73,5 | 71,7 | 71,12 | 72,83 | 70,13 | 72,98 | 70,68 | 70 | 71,77 | 71,13 | 70,98 |
|---------|---------|---------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | Долгота | 58,03 | 52,33 | 52,4 | 72,5 | 80,5 | 83,6 | 92,82 | 105,1 | 113,1 | 119,8 | 127,4 | 135,6 | 139,8 | 149,3 | 178,5 |
| Широта | Долгота | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 80,6167 | 58,033 | 1 | | 1024 | 1017 | 1227 | 960 | 1184 | 1379 | 1420 | 1824 | 1673 | 2029 | 2243 | 2144 | 2365 | 2798 |
| 71,5333 | 52,333 | 2 | | | 7,8 | 751 | 961 | 1087 | 1421 | 1749 | 2138 | 2180 | 2541 | 2825 | 2808 | 3096 | 3718 |
| 71,6 | 52,4 | 3 | | | | 749 | 956 | 1083 | 1417 | 1744 | 2133 | 2174 | 2534 | 2818 | 2801 | 3089 | 3710 |
| 70,1667 | 72,517 | 4 | | | | | 464 | 436 | 755,1 | 1175 | 1510 | 1652 | 1983 | 2291 | 2330 | 2653 | 3439 |
| | | | | | | | | 225 | 493 | 791,6 | 1177 | 1243 | 1594 | 1890 | 1904 | 2216 | 2977 |
| | | | | | | | | | 335,9 | 739 | 1081 | 1217 | 1547 | 1854 | 1899 | 2225 | 3045 |
| | | | | | | | | | | 464 | 755 | 943,4 | 1246 | 1560 | 1630 | 1966 | 2848 |
| | | | | | | | | | | | 413,2 | 482,6 | 809,5 | 1115 | 1169 | 1503 | 2394 |
| | | | | | | | | | | | | 396,6 | 537 | 850,5 | 983,1 | 1325 | 2315 |
| | | | | | | | | | | | | | 366,9 | 646,6 | 686,8 | 1023 | 1956 |
| | | | | | | | | | | | | | | 316,4 | 463,1 | 797,6 | 1819 |
| | | | | | | | | | | | | | | | 251,6 | 524,3 | 1571 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | 342,7 | 1357 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 1048 |





- Как следует из представленных данных, основная часть расстояний между рассматриваемыми пунктами связи лежит в диапазоне от 400 до 2400 км. Если принять, что информационный обмен между данными пунктами организуется средствами радиосвязи, то теоретически возможными видами связи, обеспечивающими работу на таких дальностях и использующихся (использовавшихся или предлагаемых к использованию) в Арктических регионах, являются спутниковая, коротковолновая, метеорная и тропосферная радиосвязь.
- Большинство коммерческих сетей спутниковой связи Ku диапазона организованы с использованием ретрансляторов, развернутых на геостационарных ИСЗ. Применение таких систем абонентами, расположенными выше 70° с.ш., к которым относятся все рассматриваемые географические пункты, оценивается как малоэффективное или невозможное.
- Метеорную радиосвязь не будем рассматривать из-за относительно малой пропускной способности данных радиоканалов. Тропосферную – из-за необходимости развертывания дополнительных ретрансляторов для обеспечения данного рода связи.
- Проблемы организации коротковолновой связи в Арктике, связанные с большой временной изменчивостью параметров среды распространения радиоволн данного диапазона – высокоширотной ионосферы Земли, известны и способом решения данных проблем предлагается считать сетевое построение телекоммуникационной системы, использующей в своей работе методы адаптивной (когнитивной) радиосвязи.
- Рассмотрим несколько ситуаций, в которых должна работать рассматриваемая радиосеть, характеризующих возможную организацию информационного обмена в ней.

Таблица 1

Показатели модема МДМ-40К0 в полосе СТК (3100 Гц)

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|
| <i>R</i> , бит/с | | 1600 | 2400 | 3200 | 4800 | 6400 | 8000 | 9600 | 11200 | 12800 | 14400 | 16000 | 17600 | 19200 |
| Сигнал | | 2-PSK | 4-PSK | 4-PSK | 8-PSK | 16-QAM | 32-QAM | 64-QAM | 128-QAM | 256-QAM | 512-QAM | 1024-QAM | 2048-QAM | 4096-QAM |
| <i>BE</i> , бит/(с×Гц) | | 0,52 | 0,77 | 1,03 | 1,55 | 2,06 | 2,58 | 3,1 | 3,61 | 4,13 | 4,65 | 5,16 | 5,68 | 6,19 |
| <i>SNR</i> , дБ | АБГШ | 7,0 | 7,2 | 7,3 | 10,6 | 12,1 | 14,4 | 17 | 19,7 | 22,4 | 25 | 27,9 | 30,4 | 33,1 |
| | poor | 10,0 | 12,1 | 14,5 | 18,7 | 20,5 | 22,9 | 25,4 | 27,8 | 33,0 | 37,1 | – | – | – |
| <i>PAPR</i> , дБ | | 11,5 | 11,6 | 11,6 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,7 | 11,8 | 11,8 | 11,9 | 12,0 |
| <i>P</i> , Вт | АБГШ | 9 | 10 | 10 | 21 | 30 | 51 | 93 | 173 | 322 | 600 | 1169 | 2128 | 4055 |
| | poor | 18 | 29 | 51 | 137 | 208 | 361 | 643 | 1117 | 3698 | 9726 | – | – | – |
| <i>P_{уд}</i> , мВт/(бит/с) | АБГШ | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 10 | 15 | 25 | 42 | 73 | 121 | 211 |
| | poor | 11 | 12 | 16 | 29 | 33 | 45 | 67 | 100 | 289 | 675 | – | – | – |

Таблица 2

Сравнение показателей модемов с полосой 1×СТК, 2×СТК, 4×СТК, 8×СТК при скорости передачи данных 19200 бит/с

| | | | | | |
|------------------------|------|----------|--------|-------|-------|
| <i>BW</i> , Гц | | 3100 | 6200 | 12400 | 24800 |
| Сигнал | | 4096-QAM | 64-QAM | 8-PSK | 4-PSK |
| <i>BE</i> , бит/(с×Гц) | | 6,19 | 3,1 | 1,55 | 0,77 |
| <i>SNR</i> , дБ | АБГШ | 33,1 | 17 | 10,6 | 7,2 |
| | poor | – | 25,4 | 18,7 | 12,1 |
| <i>PAPR</i> , дБ | | 12,0 | 11,7 | 11,7 | 11,6 |
| <i>P</i> , Вт | АБГШ | 4055 | 186 | 84 | 80 |
| | poor | – | 1286 | 548 | 232 |

Примечание. При расчете потребляемой мощности РПДУ учитывалось расширение полосы сигнала, соответственно, и увеличение мощности шумов в полосе сигнала.

Обозначения, используемые в таблицах:

R – информационная скорость передачи данных;

сигнал – используемая модуляция;

BE – спектральная эффективность сигнала;

SNR – требуемое для обеспечения битовой вероятности ошибки не более 1×10^{-5} соотношение сигнал/шум в полосе модема;

PAPR – пик-фактор сигнала; *P* – потребляемая номинальная мощность РПДУ для указанной трассы и антенны;

P_{уд} – потребляемая удельная номинальная мощность РПДУ для выбранных условий в расчете на 1 бит/с информационной скорости передачи данных;

АБГШ – работа модема в канале с постоянными параметрами и АБГШ;

poor – работа модема в «плохом» по ITU-R F.520 канале;

BW – полоса сигнала.

«–» – работа модема с заданным качеством при данных параметрах не обеспечивается

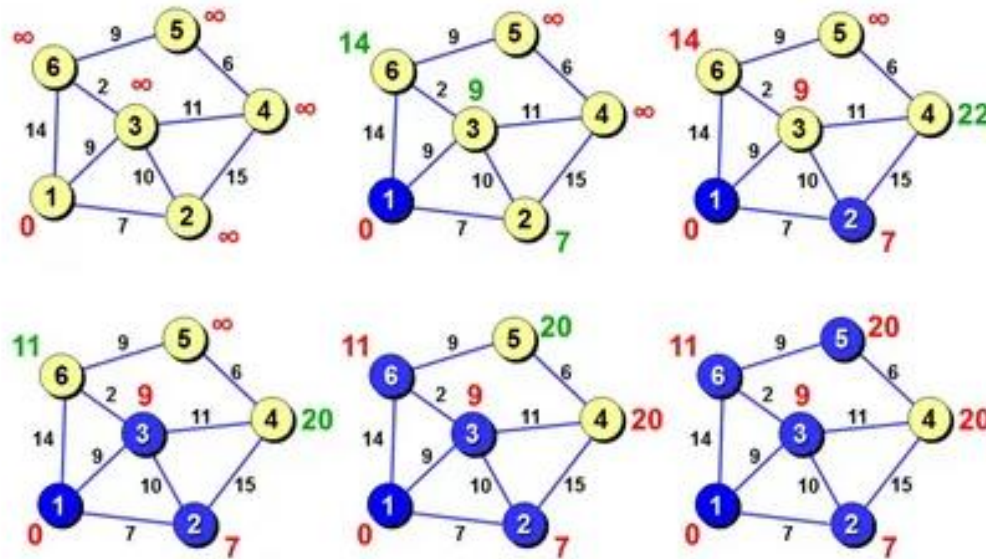
Таблица 3

Требования по MIL-STD-188-110C для полосы СТК

| | | | | | | | |
|------------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| <i>R</i> , бит/с | | 1200 | 2400 | 4800 | 6400 | 8000 | 9600 |
| Сигнал | | 2-PSK | 4-PSK | 8-PSK | 16-QAM | 32-QAM | 64-QAM |
| <i>SNR</i> , дБ | АБГШ | 5 | 6 | 13 | 16 | 19 | 21 |
| | poor | 10 | 11 | 19 | 23 | 27 | 31 |

Пукса Д. О., Романов Ю. В. К вопросу о влиянии спектральной эффективности сигнала КВ-модемов на их энергетическую эффективность // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 1 (32). С. 7–16.

При модельном описании рассматриваемая радиосеть может быть представлена в виде графа, вершины которого соответствуют рассматриваемым радиостанциям, а вес ребер зависит определяется скоростью передачи данных. Поиск оптимального маршрута, обеспечивающего максимальные скорости информационного обмена, при такой постановке задачи можно проводить с помощью известных алгоритмов, например алгоритма Дейкстры. Алгоритм Дейкстры предназначен для поиска кратчайшего пути в графе от какой-либо заданной вершины к остальным с помощью итеративного процесса.



Программная реализация алгоритма Дейкстры, применительно к решаемой задаче маршрутизации информационных пакетов в системе коротковолновой радиосвязи позволила определить оптимальные маршруты информационного обмена между всеми пунктами связи для трех описанных выше случаев.

Для запуска и отладки кода используется интегрированная среда разработки Clion. В проекте есть следующие основные файлы:

В **main** происходит чтение файла **speed**, т.е. файла с метриками алгоритма, выполнение алгоритма Дейкстры для каждой точки имеющегося графа и вывод результата в консоль.

В файле **algorithms** содержится запрограммированный алгоритм Дейкстры.

В файле **read_file** содержатся вспомогательные функции для чтения файла с метриками и функция для подсчета количества строк в файле с метриками. Функция **cnt_num_line** нужна для автоматического определения размерности графа.

В файле **speed** хранятся метрики для алгоритма. Можем использовать любой файл с метриками.

```

1  #include <stdio.h>
2  #include "read_file.h"
3  #include "algorithms.h"
4  #include <windows.h>
5
6
7  int main() {
8      SetConsoleOutputCP( wCodePageID: CP_UTF8);
9      char* path_speed="C:/Users/Seal/Desktop/ran/ran/C code/speed.txt";
10     int n=cnt_num_line( path: path_speed);
11     float speed[n][n];
12
13
14
15

```

```

12.8 12.8 14.4 12.8 12.8 12.8 12.8 11.2 9.6 11.2 11.2 11.2 9.6 6.4
0 14.4 12.8 12.8 12.8 11.2 11.2 11.2 9.6 6.4 6.4 3.2 8.0
14.4 12.8 12.8 12.8 11.2 11.2 11.2 9.6 6.4 6.4 3.2 8.0
4.8 6.4 12.8 12.8 12.8 11.2 11.2 11.2 9.6 8.0 8.0
3.2 12.8 12.8 12.8 12.4 11.2 11.2 11.2 9.6 4.8
3.2 12.8 12.8 12.8 12.8 11.2 11.2 11.2 4.8
3.2 12.8 12.8 12.8 12.8 11.2 11.2 6.4
4.8 3.2 12.8 12.8 12.8 12.8 9.6
3.2 12.8 12.8 12.8 12.8 11.2
3.2 12.8 12.8 12.8 11.2
3.2 4.8 12.8 11.2
2.4 6.4 12.8
3.2 12.8
12.8
|

```




Условия №2 определим как работу той же системы связи полярным днем (22 июня, полдень) при повышенной солнечной активности, определяемой числом Вольфа $W=100$.

Условия №1 и №2 отражают ситуацию, когда маршрутизация информационных потоков в сети строится на базе краткосрочного прогноза условия распространения, выполняющегося по следующей методике. На каждой из станций в полночь и полдень определяются значения МПЧ или отношения сигнал/шум для всех радионаправлений данной станции. Эти данные передаются в Центр управления связью (ЦУС). ЦУС выполняет расчет маршрутов доставки сообщений в ночных и дневных условиях в радиосети в целом и сообщает эти данные на все радиостанции. Передача информации в следующие сутки осуществляется по данным маршрутам. Одновременно определяются МПЧ радиолиний и эти данные используются для составления прогноза на следующие сутки.

Предположим, что существует возможность оперативного обмена данными о состоянии радиоканалов между ЦУС и радиостанциями и маршрутизация производится на основе этих данных. ЦУС сообщает радиостанциям новые маршруты доставки информации не раз в сетки, а, например, ежечасно. Данную ситуацию отражают **условия №3**. В этом случае расчеты проводились по единому времени, что позволяет учесть различные условия освещенности радиолиний сети.

Расчеты проведены для условия 22 марта и $W=75$, 6 часов по UTC. Параметры радиолиний те же, что и в предыдущих случаях.

Из данных видно, что во многих случаях задачу своевременной доставки рассмотренных объемов информации в условиях полярной ночи можно решить организацией прямых связей между радиостанциями. Ретрансляция «потребовалась» только в 18 из 106 рассмотренных случаев. В условиях полярного дня при большем поглощении радиоволн в нижней области (область D) ионосферы необходимость построения составных маршрутов доставки информации возрастает. Для части радионаправлений требуется использование двух ретрансляторов. При этом необходимо отметить, что при различных условиях распространения топология оптимальных маршрутов существенно изменяется и необходимо осуществлять переход от одного ретранслятора к другому.

Следует отметить, что условия №1 и №2 отражают ситуацию, когда маршрутизация информационных потоков в сети строится на базе краткосрочного прогноза условия распространения, выполняющегося по следующей методике:

- На каждой из станций в полночь и полдень определяются значения МПЧ или отношения сигнал/шум для всех радионаправлений данной станции. Эти данные передаются в Центр управления связью (ЦУС). ЦУС выполняет расчет маршрутов доставки сообщений в ночных и дневных условиях в радиосети в целом и сообщает эти данные на все радиостанции. Передача информации в следующие сутки осуществляется по данным маршрутам. Одновременно определяются МПЧ радиолиний и эти данные используются для составления прогноза на следующие сутки.
- Далее предположим, что существует возможность оперативного обмена данными о состоянии радиоканалов между ЦУС и радиостанциями и маршрутизация производится на основе этих данных. ЦУС сообщает радиостанциям новые маршруты доставки информации не раз в сутки, а, например, ежечасно. Данную ситуацию отражают условия №3. В этом случае расчеты проводились по единому времени, что позволяет учесть различные условия освещенности радиолиний сети.

Таким образом, предложенный способ определения оптимальных маршрутов информационного обмена может быть применен для решения задач как краткосрочного, так и оперативного прогнозирования параметров работы радиосети.

- Представленные результаты моделирования показывают работоспособность предложенных методик маршрутизации информационных потоков в коротковолновой радиосети.
- Показана изменчивость оптимальных маршрутов доставки информации в различных условиях.
- Предложены два метода сбора данных для решения задач маршрутизации, связанные с требованиями к оперативности прогнозов, на базе которых строятся оптимальные маршруты информационного обмена в радиосети.
- Результаты проведенных работ предлагается рассматривать на научно-технический задел, позволяющий продолжить работы по развитию специального программного обеспечения для решения задач структурной оптимизации радиосетей коротковолнового диапазона, работающих в сложных помеховых условиях.

Спасибо за внимание!

kriser2002@mail.ru