

УДК 621.396.4 + 004.716 + 656.61.052  
ББК 32.884.1

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.16 (WiMAX) ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ МОРЕПЛАВАНИЯ**

**Шаповалов А. А.<sup>1</sup>**

*(ФГОУ ВПО Морская Государственная Академия  
имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск)*

*Рассматриваются аспекты построения канала передачи информации в современных системах безопасности мореплавания (СБМ). Проводится сравнительный анализ существующих решений. Впервые на примере размещенной в порту Новороссийск Системы Управления Движением Судов (СУДС) определены требования к характеристикам оборудования беспроводных сетей IEEE 802.16 (WiMAX), функционирующего в частотном диапазоне 10-66 ГГц и используемого для обеспечения информационного обмена между элементами СБМ.*

Ключевые слова: безопасность мореплавания, системы управления безопасностью мореплавания, СУДС, АИС, ГМССБ, ДГНСС, ЕСКУС, передача информации, беспроводные сети, IEEE 802.16, WiMAX, радиорелейные линии.

### **1. Введение**

Жизнь современного человека неразрывно связана с морем. Оно является транспортной «артерией», по которой осуществляется большая часть мировых перевозок грузов и людей. Еже-

---

<sup>1</sup> Андрей Александрович Шаповалов, аспирант ([andrewsha@gmail.com](mailto:andrewsha@gmail.com)).

дневно в порт заходят сотни судов под различными флагами (так, по данным [10], в 2007 г. российские СУДС в своих районах действия обеспечивали контроль за 216382 судами). Но эта «артерия» является и источником повышенной опасности.

Структура, обеспечивающая безопасность мореплавания (БМ), включает в себя ряд систем, основными из которых являются [4]:

- СУДС, осуществляющая непосредственный контроль и мониторинг движения судов в зоне своей ответственности;
- глобальная морская система связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ), которая является основной СБМ, обеспечивающей быстрое оповещение спасательных координационных центров (СКЦ) о бедствии и дальнейшее оказание помощи судам, оказавшимся в беде;
- автоматическая идентификационная система (АИС), предназначенная для оперативного обмена статической, динамической и рейсовой информацией между судами и береговыми службами с целью предотвращения столкновений, контроля режима плавания и мониторинга судов;
- система передачи дифференциальных поправок для глобальных навигационных спутниковых систем (ДГНСС), предназначенная для повышения точности определения местоположения судна в обслуживаемом ей районе;
- система гидрометеорологического мониторинга (СГМ), которая обеспечивает мониторинг состояния атмосферных условий и водной среды.

Каждая из перечисленных систем функционирует под управлением человека-оператора, к которому стекается вся необходимая информация как для управления и контроля, так и для принятия решения по безопасности мореплавания. Представление данной информации в различных форматах затрудняет ее восприятие и анализ.

В связи с этим возникает необходимость объединения СБМ, существующих и проектируемых, на информационном уровне с предоставлением информации не только отдельным операторам

систем, но и более широкому кругу лиц, отвечающих за обеспечение безопасности мореплавания. Ставится задача создания структуры, которая бы совместно с отдельными системами вошла в единый информационный комплекс и решила возникшую проблему.

Так в 2003–2004 гг. такие интегрированные системы были введены в эксплуатацию в Австралии на участке между портами Сидней и Мельбурн и в Малаккском проливе.

В августе 2005 г. была сдана в эксплуатацию Международная система мониторинга судов на Балтийском море, организаторами которой являются Россия, Норвегия, Швеция, Дания, Финляндия, Латвия, Литва и Эстония, подписавшие в 2001 г. конвенцию HELCOM.

В России в результате организационных и технических мероприятий по комплексному использованию и информационной интеграции систем создаются региональные системы безопасности мореплавания (РСБМ), которые в перспективе предполагается объединить в Единую систему контроля и управления судоходства (ЕСКУС) «Росморречфлота». К настоящему времени созданы [9, 10]:

- РСБМ восточной части Финского залива, включая СУДС портов Санкт-Петербург, Приморск, Высоцк, Усть-Луга и объекты ГМССБ;

- проведена модернизация СУДС порта Астрахань и Оля, контрольно-корректирующей станции (ККС) Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS на подходах к порту Астрахань;

- введена в эксплуатацию базовая станция (БС) морского района А2 ГМССБ и СУДС порта Таганрог;

- проведена модернизация СУДС порта Мурманск (Кольского залива), включая строительство автономного радиотехнического поста (АРТП) на мысе Сеть-Наволоки;

- проведена модернизация СУДС и морского района А1 ГМССБ порта Архангельск;

- создана и введена в эксплуатацию СУДС порта Сочи;

- создана и введена в эксплуатацию СУДС порта Туапсе;
- проведена модернизация СУДС порта Ванино.

Таким образом, актуальность интеграции существующих СБМ в РБСМ и затем в ЕСКУС неоспорима.

Важнейшую роль при этом играет передача информации между элементами ЕСКУС, так как она непосредственным образом обеспечивает формирование содержания различных баз данных (БД) по безопасности мореплавания. Поэтому далее нами в данной статье рассматриваются вопросы организации канала передачи данных между элементами СБМ на примере размещенной в порту Новороссийск СУДС [4].

## **2. Определение требований к каналу передачи информации в системах управления безопасностью мореплавания**

Выбор оптимального способа передачи информации между элементами СБМ зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- состав сенсоров и требующаяся для передачи поступающих от них данных полоса пропускания линии;
- расстояние между сенсором и центром управления;
- ландшафт местности;
- уровень развития инфраструктуры связи в регионе и доступность платного сервиса высокоскоростной цифровой связи;
- электромагнитная совместимость проектируемых и действующих систем радиосвязи в регионе;
- возможность применения кабельных каналов;
- сложность получения разрешения на использование частот радиосвязи в регионе размещения системы.

На рис. 1 представлена структурная схема размещенной в порту Новороссийск СУДС. В ее состав входят: Центр СУДС (ЦСУДС); радиоцентры (РЦ) Пенай, Дооб, Геленджик, Южная Озереевка; радиотехнические посты (РТПС) Абрау-Дюрсо и Новороссийск, выполняющие функции ретрансляторов.

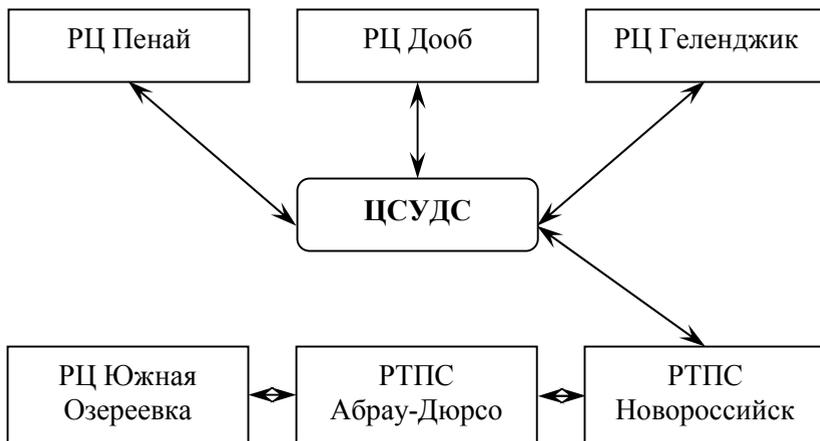


Рис. 1. Структурная схема СУДС порта Новороссийск

С сенсорных постов (СП) в ЦСУДС передается следующая информация [3, 4]:

- радарный образ, формируемый радиолокационными станциями (РЛС);
- данные от базовых станций (БС) АИС;
- видеоданные, поступающие от системы визуального наблюдения;
- данные системы гидрометеорологического мониторинга.

Все сенсоры СУДС, кроме РЛС и системы видеонаблюдения, формируют потоки данных, которые могут быть переданы через один узкополосный канал связи с пропускной способностью 19,2 Кбит/с [4].

Современные РЛС обрабатывают до 16 миллионов квантов отраженного эхосигнала за один оборот антенны, что при скорости вращения 20 оборотов в минуту и восьмиразрядном квантовании создает поток данных более 42 Мбит/с [4]. Оборудование для передачи потока такой интенсивности чрезвычайно дорого, поэтому в СУДС применяются различные способы обработки и сжатия радарного образа. Для выбора оптимального типа канала

связи требуется учитывать способы обработки и сжатия радарных данных, свойства ландшафта и акватории морского района и требования, предъявляемые к конкретной СУДС. Используя сжатие, умеренно очищенный от помех полный радарный образ может быть передан без каких-либо заметных потерь через линию с пропускной способностью около 1 Мбит/с.

Передача *MPEG*-кодированного цветного видеосигнала с качеством, эквивалентным качеству отображения в системе *PAL*, требует полосы пропускания линии связи примерно равной 1,8 Мбит/с [4]. Здесь также возможны различные варианты более сильного сжатия потока цифровых видеоданных за счет снижения количества кадров в секунду, использования черно-белого изображения вместо цветного и применения различных алгоритмов сжатия, например, *MPEG4* или *DivX/XviD*.

Таким образом, каналы передачи информации с учетом установленного на сенсорных постах оборудования должны иметь пропускную способность от 1 до 50 Мбит/с.

Для передачи информации между ЦСУДС и СП можно использовать как арендуемые, так и собственные каналы связи. Характеристики арендуемых каналов приведены в таблице 1. Характеристики собственных каналов связи перечислены в таблице 2.

С учетом рассмотренных нами требований к пропускной способности в СУДС могут использоваться следующие каналы передачи информации:

- цифровые выделенные линии T1/E1;
- оптоволоконный кабель;
- цифровые радиорелейные линии (ЦРРЛ);
- широкополосные радиомосты, полностью или частично соответствующие стандарту *IEEE 802.16* для беспроводных сетей;
- широкополосные радиомосты, основанные на корпоративных стандартах;
- широкополосные радиомосты, соответствующие стандарту *IEEE 802.11* для беспроводных сетей.

Таблица 1. Характеристики арендуемых каналов связи

Канал связи	Характеристики
Коммутируемая или выделенная телефонная линия	Пропускная способность: 2,4-56,0 Кбит/с. Предельная дистанция: не ограничена. Стоимость оборудования: очень низкая. Строительство: не требуется. Арендная плата: низкая.
<i>ISDN</i>	Пропускная способность: 64/128 Кбит/с. Предельная дистанция: любая в зоне действия сервиса. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: не требуется. Арендная плата: средняя.
Цифровая выделенная линия T1/E1	Пропускная способность: от 1,5/2 Мбит/с. Предельная дистанция: любая в зоне действия сервиса. Стоимость оборудования: средняя. Строительство: не требуется. Арендная плата: высокая.

Учитывая климатические и гидрометеорологические условия, наиболее предпочтительным в районе порта Новороссийск является использование беспроводных систем связи [2], таких как РРЛ и вышеперечисленные виды широкополосных радиомостов, так как в этом случае обеспечивается высокая надёжность связи, а приемопередающая аппаратура может располагаться на уже существующих вдоль побережья радиорелейных станциях (РРС), что снижает затраты на капитальное строительство под средства связи.

Таблица 2. Характеристики собственных каналов связи

Канал связи	Характеристики
Собственный кабель с медными жилами	Пропускная способность: 4,8–2048 Кбит/с. Предельная дистанция: 1-20 км (в зависимости от пропускной способности). Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуется прокладка кабеля.
900 МГц широкополосные радиомодемы	Пропускная способность: 1,2-4,8 Кбит/с. Предельная дистанция: 20-25 км. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуются мачты для подъема антенн. Разрешения: во многих странах разрешение на использование такого типа модемов не требуется. Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.
Собственный оптоволоконный кабель	Пропускная способность: 10 Мбит/с. Предельная дистанция: 2 км. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуется прокладка кабеля.
Собственный оптоволоконный кабель	Пропускная способность: 2 Мбит/с. Предельная дистанция: 15 км. Стоимость оборудования: средняя. Строительство: требуется прокладка кабеля.
УКВ/ДМ модемы	Пропускная способность: 1,2-9,6 Кбит/с. Предельная дистанция: 20-25 км. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуются мачты для подъема антенн. Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот. Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.

<p>Узкополосные <i>Ethernet</i> радиомосты</p>	<p>Пропускная способность: до 2 Мбит/с.                  Предельная дистанция: 20-22 км.                  Стоимость оборудования: средняя.                  Строительство: требуются мачты для подъема антенн.                  Разрешения: во многих странах разрешение на использование такого типа радиомостов не требуется.                  Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.</p>
<p>Цифровые радиорелейные линии (РРЛ)</p>	<p>Пропускная способность: до 34 Мбит/с.                  Предельная дистанция: до 60 км.                  Стоимость оборудования: очень высокая (тем выше, чем больше дистанция и выше пропускная способность радиоинтерфейса).                  Строительство: требуются мачты для подъема антенн.                  Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.                  Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.</p>
<p>Широкополосные радиомосты, соответствующие стандарту <i>IEEE</i> 802.16 (<i>WiMAX</i>) [15, 16, 23, 24]</p>	<p>Пропускная способность: до 134,4 Мбит/с.                  Частотный диапазон: 2-11 ГГц (для соединения базовой станции и потребителя), 10-66 ГГц (для соединения базовых станций).                  Предельная дистанция: до 40 км.                  Стоимость оборудования: средняя.                  Строительство: требуются мачты для подъема антенн.                  Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.                  Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.</p>

<p>Широкополосные радиомосты, частично соответствующие стандарту <i>IEEE 802.16 (pre-WiMAX)</i> [7]</p>	<p>Пропускная способность: до 54 Мбит/с.          Частотный диапазон: 2,3-6,1 ГГц.          Предельная дистанция: до 80 км.          Стоимость оборудования: средняя.          Строительство: требуются мачты для подъема антенн.          Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.          Ограничения: возможна работа оборудования при отсутствии прямой видимости антенн.</p>
<p>Широкополосные радиомосты, основанные на корпоративных стандартах [17]</p>	<p>Пропускная способность: до 300 Мбит/с.          Частотный диапазон: 2-6 ГГц.          Предельная дистанция: до 200 км.          Стоимость оборудования: средняя.          Строительство: требуются мачты для подъема антенн.          Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.          Ограничения: возможна работа оборудования без прямой видимости антенн на радиолиниях протяженностью до 20 км.</p>
<p>Широкополосные радиомосты, соответствующие стандарту <i>IEEE 802.11 (Wi-Fi)</i> [8, 14, 20, 22]</p>	<p>Пропускная способность: до 108 Мбит/с.          Частотный диапазон: 2,4-2,5 ГГц; 5-6 ГГц.          Предельная дистанция: до 80 км.          Стоимость оборудования: средняя.          Строительство: требуются мачты для подъема антенн.          Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.          Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн при использовании на радиолиниях протяженностью более 20 км.</p>

В настоящее время связь между СП и ЦСУДС в порту Новороссийск организована с использованием цифровых РРС *Nokia FlexiHopper*, обеспечивающих пропускную способность до 34 Мбит/с, и аналоговых РРС *Ericsson MiniLink*, обеспечи-

вающих пропускную способность до 2 Мбит/с.

Однако широкополосные мосты на основе беспроводных сетей *WiMAX* имеют ряд преимуществ перед используемыми в настоящее время в СУДС порта Новороссийск РРЛ:

- более высокую пропускную способность (до 134,4 Мбит/с при ширине канала 28 МГц и модуляции 64-QAM для оборудования, работающего в частотном диапазоне 10-66 ГГц [16]);

- значительно более низкую цену. Так, например, комплект *WiMAX*-оборудования *Nateks Multilink W* [21], используемый для организации канала связи с топологией «точка – точка» на радиотрассах протяженностью до 40 км и обеспечивающий пропускную способность до 36 Мбит/с, согласно [1], стоит 313568 руб., а аналогичный ему по характеристикам комплект РРЛ-оборудования *Nateks Microlink* [18] стоит 2562828 руб.

Поэтому далее мы рассмотрим возможность применения широкополосных радиомостов, соответствующих стандарту *IEEE 802.16* и функционирующих в частотном диапазоне 10-66 ГГц, для организации информационного обмена между элементами СБМ.

### **3. Определение требований к приемопередающему оборудованию**

Как известно, каждая система передачи данных состоит из трех основных частей: передатчика, приемника и соединяющей линии. В радиолинии роль промежуточного звена выполняет среда, которая является звеном, практически не поддающимся управлению. Влияние среды на распространение радиоволн (РРВ) проявляется в изменении амплитуды поля волны, скорости и направления распространения волны. Поэтому при исследовании РРВ возникает задача: расчет энергетических параметров радиолинии (выбор мощности передающего устройства и определение напряженности на входе приемного устройства).

В рамках данной статьи рассматриваются линии связи, обеспечивающие передачу информации между ЦСУДС порта

Новороссийск и СП. В этом случае приемная и передающая антенны расположены на расстоянии прямой видимости.

Исходные данные для проведения расчета необходимой мощности передатчика приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Требуемые характеристики WiMAX-оборудования

Характеристика	Значение
Частотный диапазон в режиме «точка – точка» для соединения БС, ГГц	10-66
Рабочая частота, ГГц	13
Коэффициент усиления передающей антенны, дБи	38,0
Сопротивление антенны, Ом	50,0
Чувствительность приемника по мощности, дБм	-120,0
Длина антенны, м	0,6

Для определения мощности передатчика необходимо определить напряженность электрического поля в точке приема по формуле [11]:

$$(1) \quad E_{00} = \frac{\sqrt{60 \cdot P \cdot G}}{r},$$

где  $E_{00}$  – напряженность электрического поля в месте приема, мВ/м;  $P$  – мощность передатчика, кВт;  $G$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $r$  – расстояние между точками приема и передачи, км.

Минимальная напряженность электрического поля, необходимая для приема, определяется по формуле [13]:

$$(2) \quad E_{\min} = \frac{U_{\min}}{l_0},$$

где  $U_{\min}$  – минимальное значение ЭДС в антенне, необходимое для приема, В;  $l_0$  – действующая длина антенны.

Минимальное значение ЭДС в антенне, необходимое для приема, определяется по формуле [13]:

$$(3) \quad U_{\min} = \sqrt{P \cdot R},$$

где  $P$  – чувствительность приемника, Вт;  $R$  – сопротивление

антенны, Ом.

Таблица 4. Параметры радиотрасс

Радиотрасса	Протяженность, км	Тип подстилающей поверхности	Высота подъема антенн, м	Параметры препятствия
РЦ Пенай – ЦСУДС	12,3	Вода	35-56	–
РЦ Дооб – ЦСУДС	17,8	Вода	198-56	–
РЦ Геленджик – ЦСУДС	18,3	Вода	319-56	–
РЦ Ю. Озеревка – РТПС Абрау-Дюрсо	6,3	Пересе- ченная мест- ность	125-81	–
РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск	13,9	Пересе- ченная мест- ность	81-504	Относи- тельная координата: 0,612. Про- свет: 6,76 м
РТПС Ново- российск – ЦСУДС	14,0	Пересе- ченная мест- ность	504-56	–

Действующая длина антенны определяется по формуле [13]:

$$(4) \quad l_a = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \cdot l}{\lambda} \right),$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $l$  – длина антенны, м.

Длина волны определяется по формуле:

$$(5) \quad \lambda = \frac{c}{f},$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света;  $f$  – частота, Гц.

Определим по формуле (5) длину волны:  $\lambda = 0,023$  м.

Подставляя необходимые исходные данные в формулу (4), определим действующую длину антенны:  $l_0 = 0,017$  м.

Минимальное значение ЭДС в антенне, необходимое для приема, определяется по формуле (3):  $U_{\min} = 7,07 \cdot 10^{-6}$  В.

Тогда минимальная напряженность электрического поля, необходимая для приема, определится по формуле (2):  $E_{\min} = 0,409$  мВ/м.

Таким образом, минимальная необходимая мощность передатчика в свободном пространстве в соответствии с формулой (1) определится как:

$$(6) \quad P_0 = \frac{E_{\min}^2 \cdot r^2}{60 \cdot G},$$

где  $P_0$  – необходимая мощность передатчика, кВт;  $E_{\min}$  – напряженность электрического поля в месте приема, мВ/м.

Подставляя полученные данные в формулу (6), определим необходимую мощность передатчика в свободном пространстве для каждой радиолинии. Результаты расчета приведены в таблице 5.

В реальных радиолиниях передачи данных условия распространения радиоволн существенно отличаются от условий распространения в свободном пространстве из-за влияния атмосферы Земли, гидрометеорологических факторов и земной поверхности. Для учета этого вводится множитель ослабления  $V$ , который зависит от протяженности линии связи, длины волны, высот подъема антенн, рельефа местности и т.д. Его значение можно определить как теоретически, так и экспериментально путем измерения мощности сигнала на входе приемника. Из-за сложности и многообразия различных условий распространения радиоволн практически невозможно создать строгие методы расчета множителя ослабления.

Таблица 5. Необходимая мощность передатчика в свободном пространстве

Радиотрасса	Необходимая мощность, мВт
РЦ Пенай – ЦСУДС	66,92
РЦ Дооб – ЦСУДС	140,16
РЦ Геленджик – ЦСУДС	144,92
РЦ Ю. Озереевка – РТПС Абрау-Дюрсо	17,56
РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск	85,47
РТПС Новороссийск – ЦСУДС	86,70

На открытых интервалах линий передачи данных множитель ослабления имеет интерференционный характер, так как в точку приема кроме прямой волны могут приходиться одна или несколько волн, отраженных от земной поверхности.

Интерференционный множитель ослабления  $V$  рассчитывается по формуле [12]:

$$(7) \quad V = \sqrt{1 + \Phi^2 + 2 \cdot \Phi \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot r} + \theta\right)},$$

где  $\Phi$  – модуль коэффициента отражения;  $h_1$  – высота подъема передающей антенны, м;  $h_2$  – высота подъема приемной антенны, м;  $r$  – расстояние между точками приема и передачи, м;  $\theta$  – фаза коэффициента отражения, град.

Для расчета интерференционного множителя ослабления необходимо определить модуль коэффициента отражения  $\Phi$  и его фазу  $\theta$ . Метод их расчета подробно изложен в [12]. Для определения коэффициента отражения и его фазы необходимы следующие данные:

- диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  подстилающей поверхности;

- угол скольжения  $\Delta$ , определяемый графическим путем и зависящий от расстояния между антеннами и от высоты подъема антенн над уровнем моря.

Модуль коэффициента отражения и его фаза определяются по номограммам «Кривые модулей коэффициентов отражения» и «Кривые аргументов коэффициентов отражения», приведенным в [12].

При распространении радиоволн на большие расстояния значение фазы коэффициента отражения стремится к  $180^\circ$  ( $\theta \rightarrow 180^\circ$ ) [13] и из-за сложности вычисления коэффициентов отражения к расчету принимают их усредненные значения, выбираемые из таблицы «Усредненные значения коэффициентов отражения» [5].

Подставляя в формулу (7) соответствующие значения модуля коэффициента отражения (согласно [5]  $\Phi = 0,8$  для воды и  $\Phi = 0,2$  для пересеченной лесистой местности), фазы коэффициента отражения  $\theta = 180^\circ$ , длины волны, определенное по формуле (5), высоты подъема антенн и расстояния между антеннами, рассчитаем интерференционные множители ослабления для радиотрасс в зоне ответственности СУДС порта Новороссийск:  $V_{СП} = 1,02$ ,  $V_{СД} = 1,08$ ,  $V_{СГ} = 1,14$ ,  $V_{ОА} = 0,97$ ,  $V_{НС} = 0,94$ .

Так как на радиотрассе РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск расположено препятствие (гора), то необходимо определить тип данной трассы. Для этого рассчитаем по формуле [5] просвет на трассе, при котором напряженность поля в точке приема равна напряженности поля свободного пространства:

$$(8) \quad H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot R_0 \cdot \lambda \cdot k \cdot (1 - k)},$$

где  $k$  – относительная координата точки, определяющей просвет на трассе;  $R_0$  – расстояние между приемной и передающей антеннами, м.

Подставляя в формулу (8) соответствующие значения из таблиц 3 и 4, получим  $H_0 = 5,04$  м.

Так как полученное значение  $H_0$  удовлетворяет условию  $H > H_0$ , то согласно [13] данную радиотрассу можно считать

открытой. В этом случае необходимо дополнительно вычислить угол скольжения по формуле [5]:

$$(9) \quad \theta' = \frac{H(g)}{2 \cdot R_0 \cdot k \cdot (1-k)},$$

где  $H(g)$  – просвет на трассе с учетом рефракции, м;  $R_0$  – расстояние между приемной и передающей антеннами, м;  $k$  – относительная координата препятствия.

Просвет на трассе с учетом рефракции определяется по формуле [5]:

$$(10) \quad H(g) = H + \Delta H(g) - \delta H(g),$$

где  $H$  – просвет при отсутствии рефракции, м;  $\Delta H(g) - \delta H(g)$  – приращение просвета при изменении  $g$  ( $\delta H(g) = 0$  на открытых и полуоткрытых интервалах [5]), определяемое по формуле [5]:

$$(11) \quad \Delta H(g) - \delta H(g) = -\frac{R_0^2 \cdot g \cdot k \cdot (1-k)}{4} - \delta H(g).$$

Преобразуем формулу (10):

$$(12) \quad H(g) = H - \frac{R_0^2 \cdot g \cdot k \cdot (1-k)}{4}.$$

Рассчитаем по формуле (12) значение просвета на трассе с учетом рефракции:  $H(g) = 8,14$  м.

Подставляя в формулу (9) полученное по формуле (12) значение  $H(g)$ , определим значение угла скольжения:  $\theta' = 1,23 \cdot 10^{-3}$  рад.

При малых углах  $\theta'$  коэффициент ослабления на радиотрассах с одним препятствием определяется по формуле [5]:

$$(13) \quad V = \sqrt{1 + \Phi^2 - 2 \cdot \Phi \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot p(g)}{3}\right)},$$

где  $p(g)$  – относительный просвет на трассе при заданном значении  $g$ , определяемый по формуле [5]:

$$(14) \quad p(g) = \frac{H(g)}{H_0}.$$

Подставляя в формулу (14) значения  $H(g)$  и  $H_0$ , получим искомое значение:  $p(g) = 1,61$ .

Определим по формуле (13) коэффициент ослабления на радиотрассе РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск:  $V_{АН} = 0,94$ .

Необходимая мощность передатчика с учетом интерференционного множителя ослабления определяется по формуле [11]:

$$(15) P = \frac{P_0}{V^2}.$$

Подставляя в формулу (15) полученные значения мощности передатчика в свободном пространстве и соответствующие им множители ослабления, получим необходимую мощность передатчика при распространении радиоволн в реальных условиях при ослаблении за счет влияния подстилающей поверхности:  $P_{СП} = 64,32$  мВт,  $P_{СД} = 120,16$  мВт,  $P_{СГ} = 111,05$  мВт,  $P_{ОА} = 19,87$  мВт,  $P_{АН} = 96,73$  мВт,  $P_{СГ} = 111,05$  мВт.

Величина множителя ослабления при поглощении радиосигнала гидрометеорами в децибелах определяется по формуле [5]:

$$(16) V = -\gamma \cdot R_{эф},$$

где  $\gamma$  – коэффициент ослабления, дБ/км;  $R_{эф}$  – эффективная длина трассы, км, на которой коэффициент ослабления примерно постоянен и равен  $\gamma$ .

Расчет ослабления сигнала в дожде осуществляется по методике, изложенной в [6].

Коэффициент ослабления в дожде определяется по формуле [6]:

(17)  $\gamma = \beta \cdot J^\alpha$ , где  $J$  – интенсивность осадков, мм/час;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, определяемые по формулам [6]:

$$(18) \alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln^{-1}(f) + \alpha_2 \cdot \ln^{-3}(f) + \alpha_3 \cdot \ln^{-5}(f),$$

где  $\alpha_0 = -2,125$ ,  $\alpha_1 = 16,48$ ,  $\alpha_2 = -87,9$ ,  $\alpha_3 = 232,2$ ;  $f$  – частота, ГГц.

$$(19) \beta = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(f) + \beta_2 \cdot \ln^2(f)},$$

где  $\beta_0 = -12,39$ ,  $\beta_1 = 4,1$ ,  $\beta_2 = -0,288$ .

Подставляя соответствующие значения коэффициентов и значение частоты в формулы (18) и (19), определим значение

коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ :  $\alpha = 1,183$  и  $\beta = 0,023$ .

Согласно [2] средняя интенсивность дождя в районе Новороссийска составляет 7 мм/ч. Подставляя ее значение и ранее полученные значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в формулу (17), определим значение коэффициента ослабления:  $\gamma = 0,231$ .

Эффективная протяженность дождевого образования в километрах определяется по эмпирической формуле [6]:

$$(20) R_{\gamma\delta} = \frac{R_0}{1 + \frac{R_0}{35 \cdot \exp(-0,015 \cdot J_{0,01})}},$$

где  $J_{0,01}$  – интенсивность дождя, который идет в данной местности в течение 0,01% времени, мм/ч;  $R_0$  – длина радиотрассы, км.

Величина  $J_{0,01}$  определяется по номограмме «Статистические распределения среднeminутных значений интенсивности дождей» [5]:  $J_{0,01} = 72$  мм/ч.

Подставляя в формулу (20) значение  $J_{0,01}$  и соответствующие длины радиотрасс из таблицы 4, определим эффективные длины радиотрасс:  $R_{\text{ЭФ-СП}} = 6,05$  км,  $R_{\text{ЭФ-СД}} = 7,13$  км,  $R_{\text{ЭФ-СГ}} = 7,21$  км,  $R_{\text{ЭФ-ОА}} = 4,12$  км,  $R_{\text{ЭФ-АН}} = 6,41$  км,  $R_{\text{ЭФ-СП}} = 6,43$  км.

Подставляя в формулу (16) полученные значения  $R_{\text{ЭФ}}$  и  $\gamma$ , рассчитаем множитель ослабления в дожде:  $V_{\text{СП}} = -1,39$  дБ,  $V_{\text{СД}} = -1,65$  дБ,  $V_{\text{СГ}} = -1,67$  дБ,  $V_{\text{ОА}} = -0,95$  дБ,  $V_{\text{АН}} = -1,48$  дБ,  $V_{\text{НС}} = -1,49$  дБ.

Коэффициент ослабления в сухом снеге и граде значительно меньше, чем в дожде той же интенсивности, из-за меньшей величины диэлектрической проницаемости твердых частиц (для воды  $\varepsilon \approx 80$ , для льда и снега  $\varepsilon = 2 \div 3$ ). Его значение определяется из таблицы «Сравнительная оценка коэффициентов ослабления для сухого снега и дождя» [5]. Согласно [5] на частотах менее 50 ГГц влиянием сухого снега можно пренебречь, а коэффициент ослабления в мокром снеге равен коэффициенту ослабления в дожде той же интенсивности.

Коэффициент ослабления в туманах определяется по формуле [5]:

$$(21) \gamma = k_e \cdot M,$$

где  $M$  – количество жидкости в единице объема (водность),  $\text{г/м}^3$ , выбираемое из таблицы «Характеристики облаков и туманов» [5];  $k_e$  – коэффициент ослабления на единицу водности,  $\text{дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ , определяемый по номограмме «Определение коэффициента ослабления в туманах и облаках» [5].

Определим значение водности:

- а) для капельно-жидких туманов:  $M = 1 \text{ г/м}^3$ ;
- б) для смешанных туманов:  $M = 0,3 \text{ г/м}^3$ .

Определим коэффициент ослабления на единицу водности:

1. Для капельно-жидких туманов:
  - а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,11 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ ;
  - б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,09 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ .
2. Для смешанных туманов:
  - а) при температуре  $0^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,16 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ ;
  - б) при температуре  $-8^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,2 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ .

Горизонтальная протяженность туманов достигает нескольких сотен километров. Поэтому, будем считать, что для туманов  $R_{\text{эф}} \geq R_0$ .

Подставляя в формулу (21) полученные значения водности и коэффициента ослабления на единицу водности, определим коэффициент ослабления:

1. Для капельно-жидких туманов:
  - а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,11 \text{ дБ/км}$ ;
  - б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,09 \text{ дБ/км}$ .
2. Для смешанных туманов:
  - а) при температуре  $0^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,048 \text{ дБ/км}$ ;
  - б) при температуре  $-8^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,06 \text{ дБ/км}$ .

Подставляя в формулу (16) полученные значения коэффициента ослабления, определим множитель ослабления:

1. В капельно-жидких туманах:
  - а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :  
 $V_{\text{СП}} = -1,35 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СД}} = -1,96 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СГ}} = -2,01 \text{ дБ}$ ,  
 $V_{\text{ОА}} = -0,69 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{АН}} = -1,53 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{НС}} = -1,54 \text{ дБ}$ .
  - б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :  
 $V_{\text{СП}} = -1,11 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СД}} = -1,60 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СГ}} = -1,65 \text{ дБ}$ ,

$$V_{OA} = -0,57 \text{ дБ}, V_{AH} = -1,25 \text{ дБ}, V_{HC} = -1,26 \text{ дБ}.$$

2. В смешанных туманах:

а) при температуре  $0^\circ\text{C}$ :

$$V_{СП} = -0,59 \text{ дБ}, V_{СД} = -0,85 \text{ дБ}, V_{СГ} = -0,88 \text{ дБ},$$

$$V_{OA} = -0,30 \text{ дБ}, V_{AH} = -0,66 \text{ дБ}, V_{HC} = -0,67 \text{ дБ}.$$

б) при температуре  $-8^\circ\text{C}$ :

$$V_{СП} = -0,74 \text{ дБ}, V_{СД} = -1,07 \text{ дБ}, V_{СГ} = -1,09 \text{ дБ},$$

$$V_{OA} = -0,38 \text{ дБ}, V_{AH} = -0,83 \text{ дБ}, V_{HC} = -0,84 \text{ дБ}.$$

Перевод значений множителей ослабления из логарифмической (в дБ) в линейную систему исчисления осуществляется на основании формулы [5]:

$$(22) V_{дБ} = 20 \cdot \lg V,$$

где  $V_{дБ}$  – значение множителя ослабления, дБ.

Из газов, входящих в состав атмосферы, ослабление вызывают кислород и водяной пар. Оно обусловлено взаимодействием падающего поля волны и молекул газов, обладающих электрическим и магнитным моментами, и достигает максимума при совпадении частоты воздействующего поля с собственными частотами колебаний молекул. Экспериментальные данные, приведенные в [5], показывают, что ослаблением сигнала кислородом и водяным паром можно пренебречь на частотах, меньших 15 ГГц.

Подставляя в формулу (15) значения мощности передатчика при распространении радиоволн в реальных условиях и предварительно переведенные по формуле (22) значения коэффициентов ослабления, определим необходимую мощность передатчика при поглощении сигнала:

1. В дожде и мокром снеге:

$$P_{СП} = 88,58 \text{ мВт}, P_{СД} = 175,69 \text{ мВт}, P_{СГ} = 163,12 \text{ мВт},$$

$$P_{OA} = 24,73 \text{ мВт}, P_{AH} = 136,01 \text{ мВт}, P_{СП} = 138,27 \text{ мВт}.$$

2. В капельно-жидких туманах:

а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :

$$P_{СП} = 87,77 \text{ мВт}, P_{СД} = 188,69 \text{ мВт}, P_{СГ} = 176,41 \text{ мВт},$$

$$P_{OA} = 23,29 \text{ мВт}, P_{AH} = 137,58 \text{ мВт}, P_{СП} = 139,88 \text{ мВт}.$$

б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :

$$P_{СП} = 83,05 \text{ мВт}, P_{СД} = 173,68 \text{ мВт}, P_{СГ} = 162,37 \text{ мВт}, \\ P_{ОА} = 22,66 \text{ мВт}, P_{АН} = 128,99 \text{ мВт}, P_{СП} = 131,15 \text{ мВт}.$$

3. В смешанных туманах:

а) при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ :

$$P_{СП} = 73,68 \text{ мВт}, P_{СД} = 146,14 \text{ мВт}, P_{СГ} = 135,99 \text{ мВт}, \\ P_{ОА} = 21,29 \text{ мВт}, P_{АН} = 112,61 \text{ мВт}, P_{СП} = 114,49 \text{ мВт}.$$

б) при температуре  $-8^{\circ}\text{C}$ :

$$P_{СП} = 76,27 \text{ мВт}, P_{СД} = 153,73 \text{ мВт}, P_{СГ} = 142,73 \text{ мВт}, \\ P_{ОА} = 21,69 \text{ мВт}, P_{АН} = 117,10 \text{ мВт}, P_{СП} = 119,06 \text{ мВт}.$$

Таким образом, для организации связи между элементами СУДС может быть использовано *WiMAX*-оборудование, мощность которого соответствует определенным нами требованиям и технические характеристики которого приведены в таблице 3. При этом будет обеспечиваться одинаковое качество работы оборудования в различных условиях РРВ.

Пропускная способность, обеспечиваемая *WiMAX*-радиоинтерфейсом, зависит в первую очередь от ширины радиоканала и типа используемой модуляции.

Зависимость пропускной способности *WiMAX*-канала от его ширины и типа модуляции приведена в таблице 6.

Таблица 6. Зависимость пропускной способности *WiMAX*-интерфейса от ширины радиоканала и типа модуляции

Ширина канала, МГц	20	25	28
Тип модуляции			
QPSK	32 Мбит/с	40 Мбит/с	44,8 Мбит/с
16-QAM	64 Мбит/с	80 Мбит/с	89,6 Мбит/с
64-QAM	96 Мбит/с	120 Мбит/с	134,4 Мбит/с

Соответствующее стандарту [16] оборудование варьирует тип используемой модуляции в зависимости от отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе приемного устройства. Зависимость используемого типа модуляции от отношения С/Ш на входе

приемного устройства приведена в таблице 7.

Таблица 7. Зависимость типа модуляции от отношения сигнал/шум на входе приемного устройства

Тип модуляции	Скорость кодирования	Уровень сигнал/шум, дБ
BPSK	1/2	6,4
QPSK	1/2	9,4
QPSK	3/4	11,2
16-QAM	1/2	16,4
16-QAM	3/4	18,2
64-QAM	1/2	22,7
64-QAM	3/4	24,4

Отношение сигнал/шум на входе приемника может быть определено исходя из формулы необходимой чувствительности приемного устройства в дБ [16]:

$$(23) R_{SS} = -102 + SNR_{Rx} + \lg(F_S),$$

где  $SNR_{Rx}$  – чувствительность приемного устройства, дБ;  $F_S$  – *sampling frequency*.

Значение *sampling frequency* определяется по формуле [16]:

$$(24) F_S = 8000 \cdot \text{floor}\left(\frac{n \cdot BW}{8000}\right),$$

где  $BW$  – ширина канала, Гц;  $n$  – коэффициент, принимающий значение 144/125 для каналов, ширина которых кратна 1,25; 57/50 для каналов, ширина которых кратна 2,0; 8/7 для каналов другой ширины.

Модифицируя формулу (23) и подставляя в нее необходимые исходные данные, вычислим отношение С/Ш в дБ на входе приемного устройства для ширины радиоканала 20, 25 и 28 МГц. Полученные результаты приведены в таблице 8.

Таблица 8. Отношение С/Ш на входе приемного устройства

Ширина канала, МГц	20	25	28
Радиотрасса			
РЦ Пенай – ЦСУДС	20,66	19,65	19,19
РЦ Дооб – ЦСУДС	20,66	19,65	19,19
РЦ Геленджик – ЦСУДС	20,56	19,55	19,09
РЦ Ю. Озеревка – РТПС Абрау- Дюрсо	20,66	19,65	19,19
РТПС Абрау- Дюрсо – РТПС Новороссийск	20,66	19,65	19,19
РТПС Новорос- сийск – ЦСУДС	20,66	19,65	19,19

Таким образом, на основании полученных результатов для каждой из радиотрасс будет обеспечена следующая пропускная способность: 64 Мбит/с при ширине канала 20 МГц, 80 Мбит/с при ширине канала 25 МГц и 89,6 Мбит/с при ширине канала 28 МГц.

#### 4. Заключение

В статье рассмотрены аспекты построения канала передачи информации в современных СБМ и определены требования к нему. Проведен сравнительный анализ существующих решений. На примере размещенной в порту Новороссийск СУДС впервые показана возможность использования беспроводных сетей, функционирующих в частотном диапазоне 10-66 ГГц и соответствующих стандарту *IEEE 802.16 (WiMAX)*, для обеспечения информационного обмена между элементами СБМ.

## Литература

1. ГК НАТЕКС: продажа телекоммуникационного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/sales/>
2. ДЕМЬЯНОВ В. В., ПОПОВ В. В. *Научное осмысление опыта создания информационной сети ГМССБ на Юге России*. – Новороссийск – Ростов-на-Дону: Государственная Морская Академия – Академия транспорта РФ, 1999. – 624 с.
3. ДОЛМАТОВ Б. М. *Системный подход к созданию больших информационных комплексов безопасности мореплавания (на примере систем безопасности мореплавания в регионе порта Новороссийск)*: дис. канд. техн. наук. – Новороссийск, 2002. – 174 с.
4. ДОЛМАТОВ Б. М., ПОПОВ В. В. *Научные аспекты создания автоматизированных информационно-идентификационных систем безопасности мореплавания в портах Южного бассейна России*. – М.: РосКонсульт, 2001. – 496 с.
5. КАМЕНСКИЙ Н. Н., МОДЕЛЬ А. М., НАДЕНЕНКО Б. С. и др. *Справочник по радиорелейной связи*. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
6. ЛОБАЧ В. С. *Основы проектирования цифровых радиорелейных линий* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ctt-group.ru/documents/r11/index.html>
7. НПО Рапира – беспроводные сети wi-fi, ieee 802.16. *Телекоммуникационное оборудование Wimax. Беспроводная технология Wimax* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nporapira.ru/index.php?id=20>
8. НПО Рапира: *каталог оборудования | Точка-точка (радиомост)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nporapira.ru/catalog/equip2>
9. ПАРФЕНОВ Ю. *Для безопасности мореплавания* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.connect.ru/article.asp?id=7593>
10. ПАРФЕНОВ Ю. *Развитие систем обеспечения безопасности мореплавания* [Электронный ресурс] // Морские вести

- России: сайт. – URL: <http://www.morvesti.ru/anons-file/index.php?news=2669> (дата обращения 17.10.2008).
11. ЧЕРЕНКОВА Е. Л., ЧЕРНЫШЕВ О. В. *Распространение радиоволн*: учеб. для ВУЗов связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
  12. ЧЕРНЫЙ Ф. Б. *Распространение радиоволн*. – М.: Советское радио, 1972. – 464 с.
  13. ЧЕРНЫШОВ В. П., ШЕЙНМАН Д. И. *Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства*: учеб. – М.: Радио и связь, 1989. – 238 с.
  14. *Cisco Aironet 1400 Series Wireless Bridge [Cisco Aironet 1400 Series]* – Cisco Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5679/ps5279/ps5285/product\\_data\\_sheet09186a008018495c.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5679/ps5279/ps5285/product_data_sheet09186a008018495c.html)
  15. *IEEE 802.16 – Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.16](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16)
  16. *IEEE Std. 802.16-2004: Standard for local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Systems*. – New York: IEEE, 2004. – 857 pp.
  17. *Motorola Point-to-Point Wireless Ethernet Bridges* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.motorola.com/business/v/index.jsp?vgnextoid=773862ba88de6110VgnVCM1000008406b00aRCRD&vgnnextnoice=1>
  18. *Nateks Microlink. ГК Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=61>
  19. *Nateks Multilink 3. ГК Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=155>
  20. *Nateks Multilink L PtP. Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

- <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=209>
21. *Nateks Multilink W. ГК Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=156>
  22. *smartbridges* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.smartbridges.ru/box/8>
  23. *WiMAX – Википедия* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
  24. *WiMAX – Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wimax>

## **USING IEEE 802.16 (WiMAX) WIRELESS NETWORKS TO BUILD DATA TRANSMISSION CHANNEL IN SAFETY OF SHIPPING MANAGEMENT SYSTEMS**

**Andrey Shapovalov**, Admiral Ushakov Maritime State Academy, Novorossiysk, graduate student ([andrewsha@gmail.com](mailto:andrewsha@gmail.com)).

*Abstract: Aspects of building of data transmission channel in modern safety of shipping management systems are considered. Comparative analysis of current solutions is carried out. Requirements to the characteristics of the IEEE 802.16 (WiMAX) wireless equipment working in 10-66 GHz frequency band and to be used to ensure data transmission between elements of safety of shipping systems were determined on example of Novorossiysk Vessel Traffic System (VTS) for the first time.*

Keywords: safety of shipping, safety of shipping management systems, VTS, AIS, GMDSS, DGNS, VTMS, data transmission, wireless networks, IEEE 802.16, WiMAX, radio relay lines.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р.Т. Сиразетдиновым*