

УДК 656.25:621.3.049

В. Г. ШЕВЧУК, доцент, В. К. КУЧЕРЕНКО, студент, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; М. П. СТОЦКИЙ, инженер, институт «Белжелездорпроект», г. Минск, А. Г. ДОЛГОПОЛОВ, магистрант, инженер, Гомельская дистанция сигнализации и связи Белорусской железной дороги

ОРГАНИЗАЦИЯ ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТ В СИСТЕМЕ GSM-R НА УЧАСТКЕ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Приведены основные возможности стандарта цифровой радиосвязи GSM-R, который наиболее применим для модернизации технологической радиосвязи на участке железной дороги. Показано, каким образом можно осуществить планирование канальной емкости сетей и базовых станций по частотам на участке железной дороги.

В настоящее время на железных дорогах ряда стран мира используются цифровые стандарты радиосвязи для эффективного управления и контроля движением поездов [1, 4].

Стандарт GSM-R (Global System for Mobil Telecommunication for Railway) развернут в большинстве европейских стран и ряде других стран мира (таблица 1, рисунок 1).

GSM-R – это система радиосвязи для железных дорог на базе стандарта сотовой связи GSM. Основное отличие GSM-R от традиционной системы GSM заключается в том, что частотное планирование, как и в транкинговой связи [2, 6, 16–18], ориентировано на максимальную площадь соты. При этом следует иметь в виду, что количество пользователей в системе ограничено, а количество соединений больше; время соединения меньше; необходимо гарантированное минимальное время на установление связи; предоставление связи в группах и очередь с приоритетами; динамическая перегруппировка (в аварийных ситуациях) и т. п.

Система стандарта GSM-R предназначена для связи поездов с управляющими центрами, а также обеспечения работы приложений, управления трафиком. Гарантирует связь при скорости движения до 500 км/ч [3, 5].

Технология GSM-R позволяет перевести поездную и маневровую радиосвязь на мощную унифицированную цифровую системную платформу [7, 9]. Она обеспечивает оптимальное покрытие обслуживаемой зоны, высокие эксплуатационную готовность и надежность, реализует интегрированные алгоритмы для обмена информацией с высокоскоростными поездами.

Потенциал GSM-R не ограничивается телефонной связью. Технология GSM-R, как и GSM, интегрируется с GPRS для предоставления услуг на основе пакетной коммутации [8, 10]. Благодаря этому возможно в режиме реального времени получать телеметрическую информацию с любого локомотива, любой станции или перегона дороги. Информация о местоположении и скорости поезда будет передаваться по сети GSM-R в центр управления, что позволит полностью автоматизировать процесс регулирования движения поездов [13].

Таблица 1 – Перечень стран, использующих стандарт GSM-R в качестве базового стандарта радиосвязи

Страна	Владелец инфраструктуры	Оператор железной дороги	Высокоскоростные линии
Германия	DB Netz	DBAG	+
Бельгия	Infrabel	SNCB	
Испания	ADIF	RENFE	+
Финляндия	RHK	VR	
Франция	RFF	SNCF	+
Великобритания	Network Rail Limited	List of the Passenger operators	
Индия	–	IR	
Италия	RFI	TI	+
Норвегия	JBV	NSB	
Нидерланды	NS Railinfratrust	NS	
Швеция	BV	SJ	+
Швейцария	–	SBB/CFF/FFS	+
Чехия	Czech Railways	ČD	
Бельгия	Infrabel	SNCB	
Литва	Lietuvos Geležinkeliai		
Латвия	Latvijas Dzelzceļš		

Внедрение стандарта GSM-R на железных дорогах (рисунок 1) осуществляется в соответствии с «Рекомендациями по внедрению цифровой технологической радиосвязи на железнодорожном транспорте стандарта GSM-R», утвержденными совещанием Комиссии ОСЖД по инфраструктуре и подвижному составу 3 сентября 2005 г.

Применение такой системы в пассажирском комплексе многократно повысит безопасность пассажирских перевозок.

Появляется также возможность во время движения поезда передавать в соответствующие пункты управления разнообразную поездную информацию, например об износе тормозов и температуре в рефрижераторных и топливных вагонах, о состоянии сцепления вагонов. Это позволит существенно сократить затраты времени на техническое обслуживание и маневровую работу [11, 12].

Результатом внедрения технологии GSM-R на железной дороге станет повышение эффективности железнодорожных перевозок.

Новая цифровая сеть радиосвязи обладает рядом преимуществ, которые позволяют упростить обмен информацией, повысить качество обслуживания абонентов и уровень безопасности.

Сеть реализует интеллектуальные функции и поддерживает большой набор услуг телефонной связи и передачи данных. Например, поддерживается групповой и широковещательный вызов, приоритеты вызовов, прерывание разговора при поступлении срочного вызова с высоким приоритетом (например, в случае чрезвычайной ситуации), что способствует усилению безопасности на железнодорожном транспорте [15].

Кроме того, поддерживается функциональная адреса-

ция, причем функциональные единицы, например машинист локомотива или проводник, могут быть вызваны независимо от их конкретного абонентского номера. GSM-R интегрирует разные службы и делает ненужной сложную структуру, характерную для аналоговых сетей [14].

Структура сети GSM-R существенно не отличается от структуры мобильных сетей общего пользования и их расширений в смысле элементов сети, стандартизованных интерфейсов и сопряжения,

На рисунке 1 показано, что стандарт GSM-R предусматривает работу передатчиков в двух диапазонах частот. Полоса частот 876–880 МГц используется для передачи сообщений с подвижной станции (мобильного терминала) на базовую станцию, а полоса частот 921–925 МГц – для передачи сообщений с базовой станции на подвижную станцию (мобильный терминал).

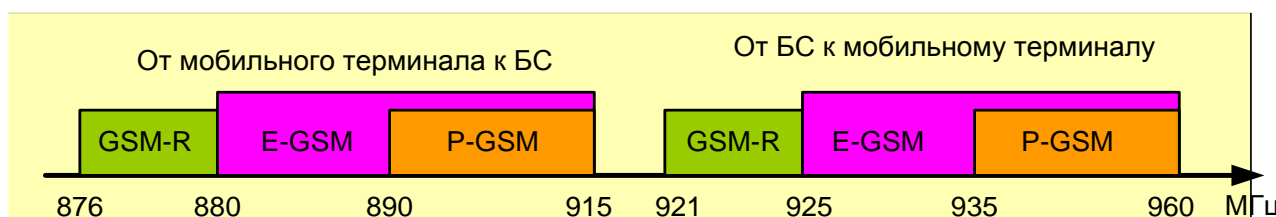


Рисунок 1 – Частотный диапазон системы GSM-R в Европе:
P-GSM – диапазон общедоступных сетей GSM; E-GSM – расширенный диапазон GSM

На рисунке 2 рассмотрен частотный план стандарта GSM-R. При переключении каналов во время сеанса связи разность между этими частотами постоянна и равна 45 МГц. Полоса частот, выделенная на

один частотный канал, составляет 200 кГц. Таким образом, в отведенной для приема/передачи полосе радиочастот шириной 4 МГц размещается 19 каналов связи.

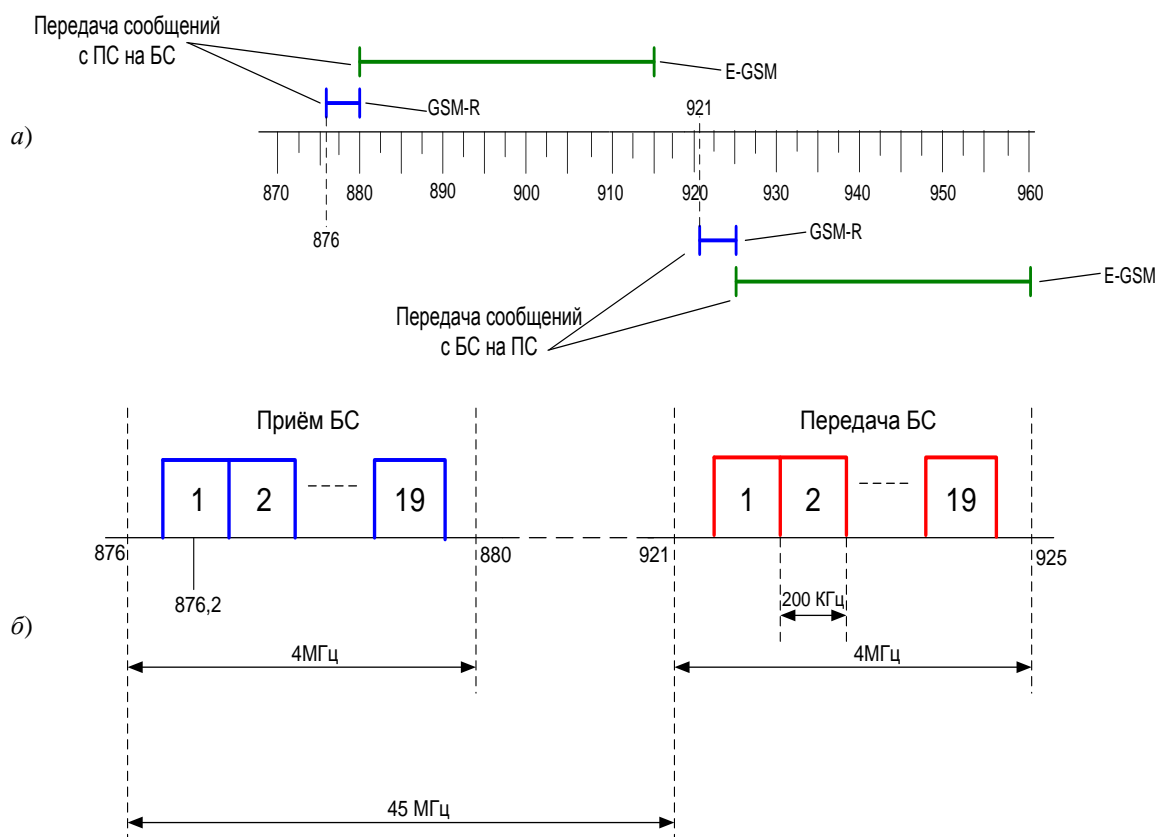


Рисунок 2 – Частотный план стандарта GSM-R

Каждой базовой станции (БС) стандарта GSM-R доступны все 19 частотных каналов, что позволяет реализовать метод скачкообразной перестройки частоты в стандарте GSM-R. Один из способов переключения частоты состоит в переключении модулирующего сигнала на входе передатчика. В этом случае число частот, используемых для скачкообразной перестройки, определяется числом приемопередатчиков БС. Для увеличения пропускной способности в стандарте GSM-R, как и в стандарте GSM, применяют множественный доступ с временным разделением каналов, что позволяет на одной несущей частоте разместить одновременно 8 речевых каналов. Таким образом, общее число каналов, доступных в системе GSM-R, составляет

$$N_{\text{св}} = 8N_F, \quad (1)$$

где N_F – общее число частотных каналов по плану ($N_F = 19$), $N_{\text{св}} = 8 \cdot 19 = 152$.

Для защиты от ошибок, возникающих в радиоканалах, применяется блочное и сверхточное кодирование с перемежением. Повышение эффективности кодирования и перемежения при малой скорости перемещения подвижной станции достигается медленным переключением рабочих частот в процессе сеанса связи со скоростью 217 скачков/с.

Для борьбы с интерференционными замираниями принимаемых сигналов, вызванными многолучевым распространением радиоволн в условиях города, в аппаратуре связи используются эквалайзеры, обеспечивающие выравнивание импульсных сигналов со среднеквадратическим отклонением времени задержки до 16 мкс. Система синхронизации оборудования рассчитана на компенсацию абсолютного времени задержки сигналов до 233 мкс. Это соответствует максимальной дальности связи 35 км (максимальный радиус соты).

Для модуляции радиосигнала применяется спектрально-эффективная гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (GMSK). Обработка речи в данном стандарте осуществляется в рамках системы прерывистой передачи речи DTX (Discontinuous Transmission).

Достоинство сотовых сетей подвижной радиосвязи (СПР) заключается в высокой эффективности использования радиоспектра, достигаемой благодаря тому, что территория, где организуется СПР, делится на небольшие зоны (соты), в каждой из которых связь организуется с помощью различного набора частот. По условиям электромагнитной совместимости (ЭМС) не рекомендуется в одной частотной группе использовать интермодуляционно несовместимые частоты плана.

Пример сети СПР с кластером размерности $N = 3$ ($a = 2, b = 1$) приведен на рисунке 3.

В центре каждой соты расположена базовая станция БС, обслуживающая находящиеся в данной соте мобильные станции МС. Совокупность рядом расположенных сот, в которых все частоты различны, образуют кластер. Причем в одинаковых сотах различных кластеров МС и БС работают на одних и тех же частотах.

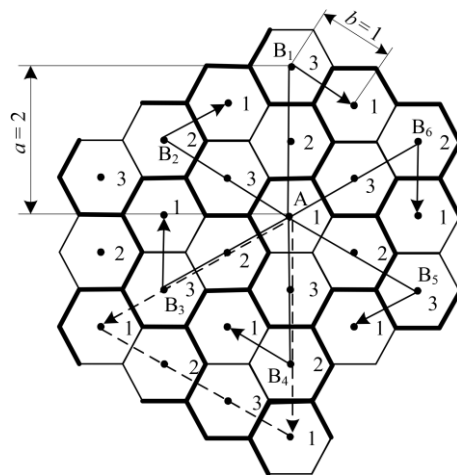


Рисунок 3 – Пример построения сети с кластером размерностью 3 ($a = 2, b = 1$)

При 3-элементном кластере ячейки с одинаковыми полосами частот повторяются очень часто, что плохо в смысле уровня соканальных помех, т. е. помех от станций системы, работающих на тех же частотных каналах, но в других ячейках. В этом отношении более выгодны кластеры с большим числом элементов, например 5-элементном кластере (рисунок 4).

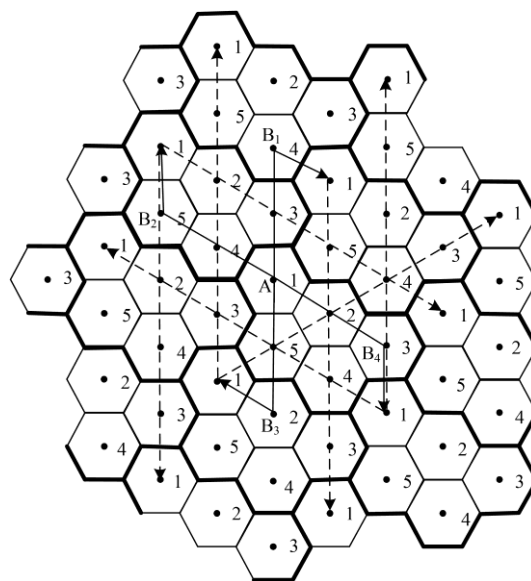


Рисунок 4 – Пример построения сети с кластером размерностью 5

На практике это число может достигать пятнадцати.

Увеличение числа элементов в кластере, выгодное в отношении снижения уровня соканальных помех, приводит к пропорциональному уменьшению полосы частот, которая может быть использована в одной ячейке. Поэтому практически число элементов в кластере должно выбираться минимально возможным, обеспечивающим допустимое соотношение сигнал/помеха.

Учитывая специфику GSM-R, где базовые станции располагаются не на плоскости, а линейно, можно использовать кластеры с размерностью 3 (рисунок 5). В таком случае одинаковые соты разных кластеров будут всегда находиться на значительном расстоянии, и это не приведет к появлению соканальных помех.

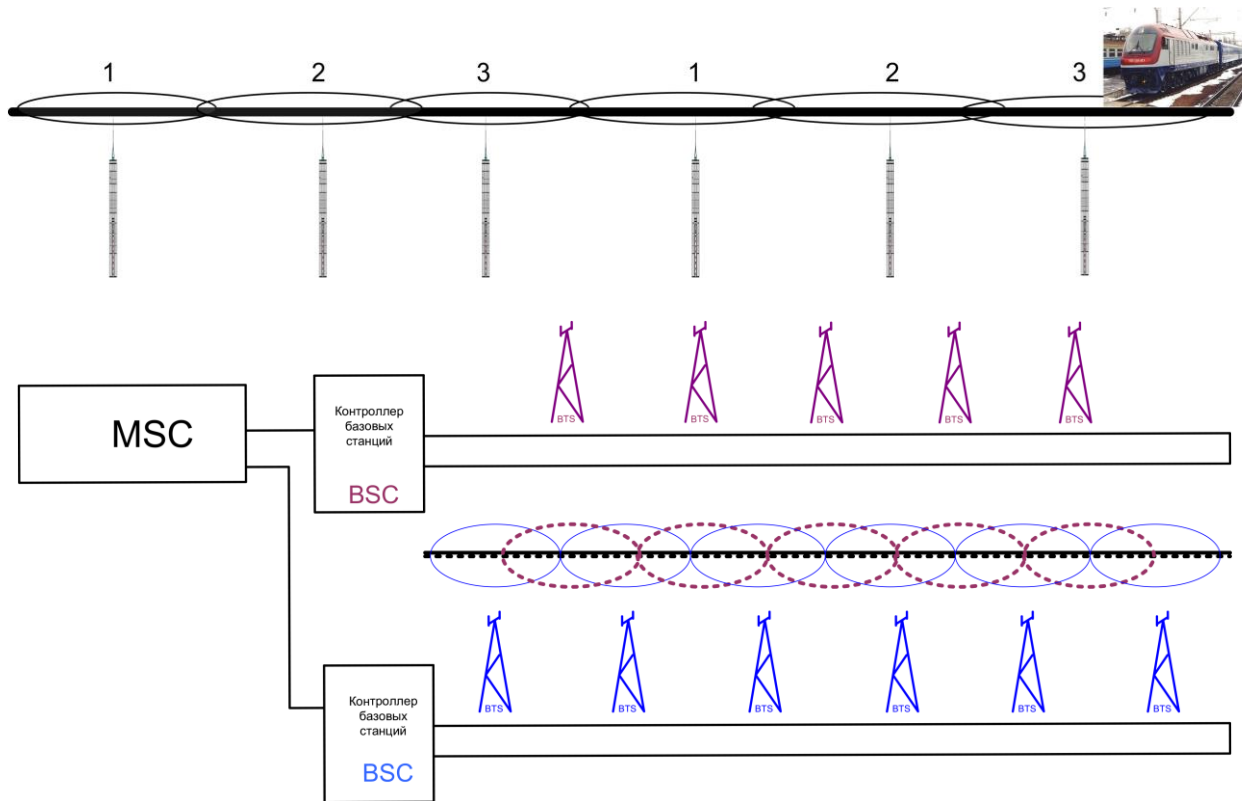


Рисунок 5 – Пример построения сети GSM-R на железнодорожном участке с кластером размерностью 3

При формировании зон обслуживания на железнодорожных перегонах проектируемого участка эффективным способом снижения уровня соканальных помех является применение направленных антенн. В секторе направленной антенны сигнал излучается преимущественно в одну сторону, а уровень сигнала в противоположном направлении сокращается до минимума. Применение направленных антенн обеспечивает деление соты на секторы и позволяет чаще применять частоты в сотах повторно.

При планировании телетрафика в пределах зоны обслуживания проводится предварительная оценка качества обслуживания абонентов. Под качеством обслуживания понимается своевременное предоставление каналов абонентам при обеспечении достоверности приема информации не ниже заданной. Анализ работы систем мобильной связи показывает, что только небольшая их часть одновременно пользуется услугами сети. При этом интенсивность ее использования может изменяться во времени и быть различной в зависимости от потребности индивидуальных абонентов. Сеть обычно разрабатывается с учетом ожидаемой интенсивности ее использования.

Планирование канальной емкости сетей и базовых станций по частотам на участке железной дороги произведём, учитывая следующие данные:

- число абонентов, одновременно работающих в пределах одной базовой станции на перегонах, – не менее 35;
- число абонентов, одновременно работающих в пределах одной базовой станции на станциях и крупных железнодорожных узлах, – не менее 300;
- средняя продолжительность разговора в час наибольшей нагрузки (ЧНН) $T_{cp} = 1,5$ мин;
- средняя частота поступления вызовов в ЧНН $\lambda_{cp} = 7$ вызовов/ч;

- вероятность отказа в системе составляет $P = 0,005$, т. е. не более одного из двухсот абонентов в час получат отказ при первом обращении к сети, что соответствует 99,5 % вероятности установления соединения;
- ширина полосы частот, выделенная стандарту GSM-R, равна 2,4 МГц;
- разнос частот между соседними каналами связи составляет 200 кГц;
- количество частотных дуплексных каналов принимаем равным 19.

При оценках емкости систем сотовой связи обычно используют модель системы с отказами (модель Эрланга *B*), в то время как модель системы с ожиданием (модель Эрланга *C*) применяют гораздо реже.

На рисунке 6 представлены графики вероятности отказа в обслуживании в зависимости от трафика при различном числе каналов.

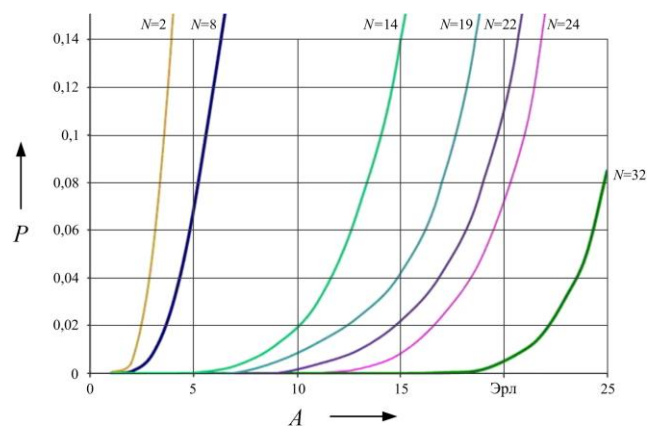


Рисунок 6 – Вероятность отказа в обслуживании в зависимости от трафика (модель Эрланга *B*)

Поскольку в распоряжении системы находится полоса частот шириной 2×4 МГц, а одно соединение требует двух каналов (прямого и обратного) по 200 кГц каждый, то для 3-сотового кластера количество дуплексных каналов в соте можно определить из выражения

$$F_c = F_k m C_c, \quad (2)$$

где F_c – ширина полосы частот, занимаемая системой сотовой связи; F_k – ширина полосы частотного канала; $m = 3$ – разрядность кластера; C_c – количество частотных каналов,

$$C_c = 2 \cdot 4 \cdot 10^6 / (3 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 10^3) \approx 2 \text{ канала.}$$

В стандарте GSM-R используется TDMA (Time Division Multiple Access). Таким образом, каждый частотный канал разделён на восемь временных интервалов (timeslots). Один временной интервал необходим в качестве управляющего канала для базовой станции, остальные семь доступны для передачи голосовых сообщений и передачи данных. Отсюда количество речевых каналов в соте $C = C_c \cdot 3 = 2 \cdot 3 = 6$.

Из графика (см. рисунок 6) можно найти, что для 6 каналов на соту и вероятности отказа системы 0,005 интенсивность трафика в одной соте составит $A_{\text{сот}} = 2,5$ Эрл. Отсюда суммарный трафик всей системы, учитывая секторирование сот, будет

$$A_{\text{сот}} N_c \cdot 2 = 2,5 \cdot 31 \cdot 2 = 155 \text{ Эрл.}$$

Трафик на одного абонента составит $A_{\text{аб}} = \lambda_{\text{ср}} T_{\text{ср}} = 7 \times 1,5/60 = 0,175$ Эрл.

На основе этих значений определяется количество пользователей, которых может обслужить система:

$$N_a = A / A_{\text{аб}} = 155/0,175 = 885.$$

Тогда количество пользователей, приходящихся на один канал, $N = 885/19 \approx 46$.

Максимальное количество пользователей, которые могут быть одновременно обслужены, определяется количеством каналов в соте и количеством сот в системе:

$$N_{\text{max}} = C N_{\text{сот}} = 6 \cdot 2 \cdot 31 = 372.$$

Учитывая то, что сеть GSM-R разрабатывается для участка железной дороги, можно сделать вывод о том, что ресурсы данной системы вполне достаточны.

Список литературы

1 **Андрюшко, О. С.** Цифровизация линейного канала поездной радиосвязи / О. С. Андрюшко, Д. К. Завалишин, Р. В. Себякин // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 4. – С. 12–15.

2 Развитие и совершенствование технологической радиосвязи / А. М. Вериго [и др.] // Автоматика, связь, информатика. – 2011. – № 6. – С. 28–32.

Получено 03.11.2013

V. G. Shevchuk, V. K. Kucherenko, M. P. Stotcky, A. G. Dolgoplov. Organization of re-use of frequencies GSM-R on a site of the railway.

Are the basic capabilities of the standard digital radio GSM-R, which is most applicable for modernization of technological radio communication on the site of the railway. Shows how you can plan a channel capacity of networks and base stations on the frequencies on a site of the railway.

3 **Вериго, А. М.** Технологическая радиосвязь сегодня и завтра / А. М. Вериго, К. К. Алмазян // Автоматика, связь, информатика. – 2004. – № 5. – С. 28–31.

4 **Вериго, А. М.** Системы радиосвязи на зарубежных железных дорогах / А. М. Вериго // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 5. – С. 45.

5 **Власенко, С. В.** Общеввропейская система управления движением поездов / С. В. Власенко, С. А. Лунев // Автоматика, связь, информатика. – 2006. – № 4. – С. 28–32.

6 **Климова, Т. В.** Особенности построения систем GSM-R на ОАО «РЖД» / Т. В. Климова // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 12. – С. 25–26.

7 **Корниенко, А. А.** Информационная безопасность системы GSM-R / А. А. Корниенко, С. В. Диасамидзе // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 12. – С. 32–33.

8 **Одинский, А. Н.** Современные тенденции на рынке систем оперативной радиосвязи / А. Н. Одинский // Мир связи. – 2005. – № 8. – С. 24–27.

9 **Осминина, С. В.** Перспективы внедрения GSM-R / С. В. Осминина // Автоматика, связь, информатика. – 2007. – № 8. – С. 22–23.

10 **Родигина, Т. М.** Цифровые стандарты радиосвязи в свете требований информационных технологий железнодорожного транспорта / Т. М. Родигина // Радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2002. – № 4. – С. 5–8.

11 СТП «Требования по эксплуатации поездной радиосвязи Белорусской железной дороги». – Минск, 2006. – 50 с.

12 **Шевчук, В. Г.** Перспективы внедрения радиосистем стандарта GSM-R на Белорусской железной дороге / В. Г. Шевчук, И. В. Арабина, А. М. Желудок // Материалы XIV Международной научно-технической конференции «Современные средства связи». – Минск, 2009. – С. 123–124.

13 Совершенствование технологической радиосвязи железной дороги на основе GSM- и 3G-технологий / В. Г. Шевчук [и др.] // Материалы V Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте». – Гомель, 2010. – С. 242–243.

14 Применение беспроводных систем информационного обеспечения технологических процессов на Белорусской железной дороге / В. Г. Шевчук [и др.] // Материалы XVI Международной научно-технической конференции «Современные средства связи». – Минск, 2011. – С. 212–213.

15 **Шевчук, В. Г.** Обеспечение связью при чрезвычайных ситуациях на железнодорожном транспорте // В. Г. Шевчук, [и др.] // Материалы Международной научно-практической конференции «Чрезвычайные ситуации: теория и практика». – Гомель, 2011. – С. 231–233.

16 GSM-R – Мобильная радиосвязь для железных дорог [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.radioscanner.ru/info/article>. – Дата доступа: 10.05.2013.

17 GSM-Rail [Электронный ресурс]. – 2008. – Режим доступа: <http://www.senderlisteffm.de/index.html>. – Дата доступа: 01.10.2013.

18 UIC Project EIRENE. System Requirements Specification (version 15). – GSM-R Operators Group, 2006. – P. 34–39.