

УДК 623.385.6

## Определение оптимального расположения базовых станций стандарта TETRA для создания системы определения и передачи координатно-временной информации о средствах связи

Семенов С. С., Смолеха В. П., Плут М. Н., Коморников П. М., Смолеха А. В.

*Перспективным и опирающимся на современную мировую практику направлением дальнейшего совершенствования системы технического обеспечения связи является определение и передача координатно-временной информации о средствах связи в режиме времени близком к реальному на цифровые карты автоматизированных рабочих мест должностных лиц органов управления. Целью исследования является разработка системы контроля, определения местоположения и передачи информации о техническом состоянии средств связи с отображением информации на цифровых картах автоматизированных рабочих мест должностных лиц системы технического обеспечения связи. Постановка задачи: составной частью исследования является расчет наименьшего количества базовых станций для систем профессиональной транкинговой радиотелефонной связи и места их размещения на графе сети автомобильных дорог Северо-Западного района Западного региона при ограничении на расстояние от каждого узла сети дорог до ближайшей к нему базовой станции, определяемый радиусом действия станции. Используемые методы: теория графов, алгоритм нахождения  $p$ -центров. Новизна заключается в том, что при применении апробированного алгоритма нахождения  $p$ -центров решается задача минимизации количества базовых станций и определяются места их размещения. Результат: количество базовых станций и места их размещения на графе сети дорог. Практическая значимость заключается в сокращении материальных затрат на внедрение оборудования, устройств и средств стандарта TETRA при разработке системы контроля, определения местоположения и передачи информации о техническом состоянии средств связи. Реализация алгоритма на ПЭВМ позволит сократить время проведения расчетов для графа сети дорог.*

**Ключевые слова:** система технического обеспечения связи, средства связи, технология радиочастотной идентификации, нахождение  $p$ -центров.

### Введение

С целью обеспечения органов управления системы технического обеспечения связи координатно-временной информацией о средствах связи во времени близком к реальному предлагается внедрить автоматическую идентификацию на основе технологии радиочастотной идентификации [1, 2], оснастить комплексы связи аппаратурой спутниковой навигации ГЛОНАСС (ГЛОНАСС/GPS) или абонентскими терминалами стандарта TETRA (стандарт для систем профессиональной транкинговой радиотелефонной связи) [3].

Стандарт TETRA – цифровой стандарт, разработанный на основе технологии GSM и ориентированный на создание систем связи эффективно и экономично решающих задачу гибкой коммуникации между различными группами пользователей с обеспечением многоуровневой приоритезации вызовов и защищенности информации.

Стандарт TETRA позволяет обеспечить безопасность в сети связи, исключить несанкционированное использование ресурсов системы и обеспечить конфиденциальность передаваемой информации в сети, что способствует выбору данного стандарта для передачи данных о состоянии и местонахождении средств связи.

Защищенность параметров абонента обеспечивается посредством кодовой защиты конфигурации абонентского терминала и присвоения идентификаторов-псевдонимов.

Места размещения и минимальное количество базовых станций рассчитываются для графа существующей сети автомобильных дорог. Например, сети автомобильных дорог Западного региона по направлению г. Санкт-Петербург – г. Петрозаводск – г. Беломорск – г. Кандалакша – г. Апатиты – г. Мурманск. Центры графа и радиусы определяются из матрицы взвешенных расстояний. Абсолютные центры (так называемые абсолютные  $p$ -центры) графа рассчитываются по известному алгоритму из раздела дискретной математики [4, 5].

Интерпретация задачи нахождения абсолютных  $p$ -центров теории графов заключается в нахождении наименьшего количества базовых станций и такое их размещение, чтобы расстояние от каждого узла сети дорог до ближайшей к нему базовой станции не превышало радиуса действия станции. Если же число базовых станций известно (ограничено выделенными лимитами), то требуется найти их минимальное количество и разместить их так, чтобы было минимально возможным расстояние от любого узла до ближайшей к нему базовой станции.

Если предположить, что базовые станции размещаются в вершинах соответствующего графа  $G$ , то задача будет состоять в нахождении  $p$ -центров графа для  $p = 1, 2, 3, \dots$  и т. д. до тех пор, пока число разделения  $p$ -центра не станет меньше или равно заданному расстоянию. Полученное (последнее) значение числа  $p$  будет наименьшим числом базовых станций, а  $p$ -центр – их оптимальным размещением, удовлетворяющим предъявляемым требованиям.

Алгоритм нахождения  $p$ -центров является частным случаем алгоритма решения более общей задачи, состоящей в определении  $p$ -центров, располагающихся, вообще говоря, не в вершинах графа.

Метод Хакими [4, 5], предназначенный для решения задач с одним абсолютным центром, не может быть обобщен на случай абсолютных  $p$ -центров. Для нахождения таких центров Сингер предложил некоторый эвристический метод – итерационный алгоритм решения задачи об абсолютных  $p$ -центрах графа.

Алгоритм является быстро сходящимся и обладает двумя преимуществами: процесс можно закончить сразу же, как только достигнута необходимая «точность» в расположении центров и метод легко видоизменить таким образом, чтобы можно было находить решения, близкие к оптимальному, и, следовательно, проводить анализ устойчивости решения.

Алгоритм построения абсолютного  $p$ -центра графа  $G=(X, A)$  при известном  $p$  выглядит следующим образом:

- 1) вводится параметр  $\lambda$  (км), пусть  $\lambda=0$ ;
- 2) увеличение  $\lambda$  на небольшую величину  $\Delta\lambda$ ;
- 3) построение множества  $Q_\lambda(x_i)$  для всех  $x_i \in X_n$  и нахождение области  $\Phi_\lambda$ ;
- 4) построение двудольного графа  $G'=(X' \cup X, A')$ , где  $X'$  – множество вершин, каждая из которых соответствует некоторой области  $\Phi_\lambda$ , и  $A'$  –

множество ребер, такое, что ребро между областью-вершиной и вершиной  $x_i$  существует тогда и только тогда, когда  $x_i$  может быть достигнута в этой области;

- 5) найти наименьшее доминирующее множество графа  $G'$ ;
- 6) если число областей в приведенном выше множестве больше, чем  $p$ , то вернуться к шагу 2; в противном случае надо остановиться. Области этого множества образуют абсолютный  $p$ -центр исходного графа  $G$ ,  $\lambda$  является абсолютным  $p$ -радиусом.

Если требуется найти такое наименьшее значение  $p$ , что каждая вершина достижима из некоторого центра в пределах заданного критического расстояния, то шаги с 3 по 6 в приведенном выше алгоритме следует выполнять при  $\lambda$ , равном этому «критическому» значению. Соответствующее число областей в наименьшем доминирующем множестве является тогда требуемым значением для  $p$ , и области этого множества образуют искомый  $p$ -центр.

Пусть  $\lambda$  зафиксировано и вычислены расстояния  $\delta_i = \lambda/v_i$ . Любое ребро графа либо достижимо целиком, либо частично, либо совсем не достижимо из вершины  $x_i$  в пределах расстояния  $\delta_i$ . Если достижима только часть ребра (от какого-либо конца ребра до некоторой «предельной» точки на нем), то над предельной точкой ставится «метка». Эти метки содержат всю информацию, необходимую для описания множеств  $Q_\lambda(x_i)$ . Таким образом,  $Q_\lambda(x_i)$  состоит из точек всех ребер (или частей ребер), принадлежащих кратчайшим маршрутам между метками и вершиной  $x_i$ .

После размещения всех меток (для всех вершин) каждое ребро будет разделено на ряд участков; каждый участок характеризуется теми вершинами, которые из него могут быть достигнуты (то есть из точек этого участка). Таким образом, любой участок описывается бинарным вектором  $\{j_1, j_2, \dots, j_n\}$  длины  $n$ , в котором  $j_k = 1$ , если вершина  $x_k$  достижима из этого участка, и  $j_k = 0$  в противном случае.

Поскольку область  $\Phi_\lambda$  достижима только из тех вершин, для которых  $j_k = 1$  (в бинарном векторном представлении этой области) и не из каких других, то эти бинарные векторы называются строгими пересечениями ( $SI$ ).

Представление области бинарным вектором не содержит никакой информации о месте ее расположения на графе. Однако такое представление выгодно с вычислительной точки зрения: оно не предъявляет больших требований к памяти машины и позволяет уменьшить время вычисления, особенно при выполнении шага 5 алгоритма. Если абсолютный  $p$ -центр описан «на языке строгих пересечений», то дальнейшая процедура осуществляется чрезвычайно просто: надо лишь выяснить, какие участки ребер соответствуют этим строгим пересечениям.

На шаге 4 алгоритма строится двудольный граф  $G' = (X' \cup X, A')$ , у которого вершины из  $X'$  представляют области  $\Phi_\lambda$ . Это может привести к графу больших размеров, что сильно увеличит время вычисления на шаге 5. Уменьшить размеры графа  $G'$  удастся с помощью приведенной ниже теоремы и исключить те области, которые не влияют на получаемое оптимальное решение (но если существует больше одного оптимального решения, то при такой процедуре

некоторые из них теряются). Теорема: при заданной величине  $X$  для получения некоторого минимального доминирующего множества графа  $G'$  можно предварительно исключить из множества  $X'$  все вершины, соответствующие тем  $SI$ , над которыми доминируют другие  $SI$  в  $X'$ , причем  $(SI)_1$  доминирует над  $(SI)_2$ , если  $(SI)_1 \otimes (SI)_2 = (SI)_2$ .

В качестве примера взят фрагмент подграфа существующего графа сети автомобильных дорог Северо-Западного федерального округа (рис. 1).

Число, стоящее около любого ребра, задает его длину в километрах, вес каждой вершины графа равен единице. Требуется найти абсолютный  $p$ -центр с минимально возможной величиной параметра  $p$  и такой, чтобы каждая вершина графа отстояла хотя бы от одного из этих  $p$  центров на расстоянии, не превосходящем 35 километров (ограничение).

Множество  $Q_\lambda(5)$  отмечено точками. Они расставлялись сразу же в процессе последовательного «прохождения» ребер. Числа в кружках, стоящие около произвольной метки, указывают «номера» вершин, которым эта метка соответствует. Так, кружок  $\textcircled{3}$  на ребре (2,3) означает, что только отмеченная точка достижима из вершин 1 и 3 в пределах расстояния 35 км. На рисунке 2 точками около ребер показано достижимое множество  $Q_\lambda(5)$ , соответствующее вершине 5. Всего в данном примере существует 33 участка ребер, включая пустой участок (из которого ни одна вершина не может достигаться в пределах расстояния 35 километров).

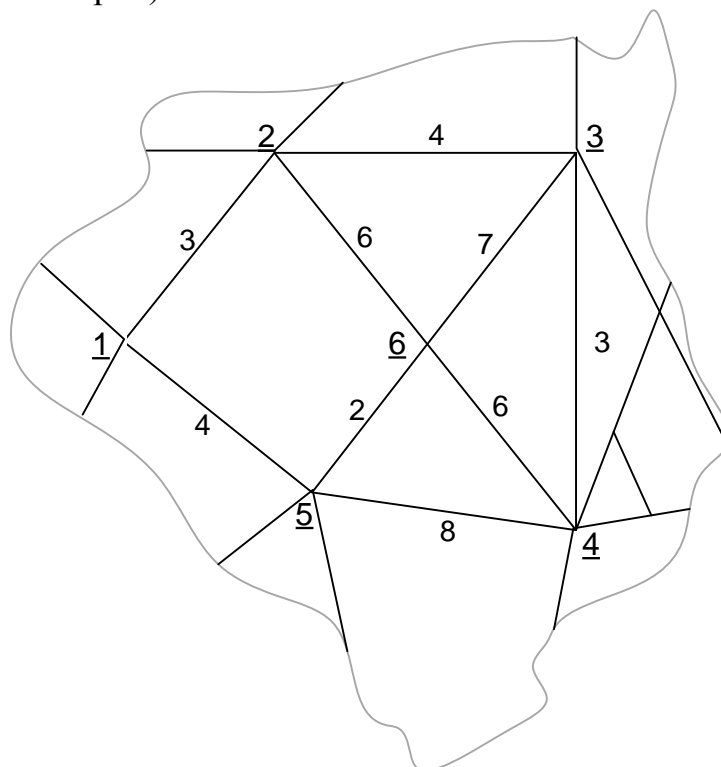


Рис. 1. Фрагмент подграфа сети автомобильных дорог Северо-Западного федерального округа

Для  $\lambda=35$  км на рисунке 2 показаны метки, определяющие множества  $Q_\lambda(x_i)$ .

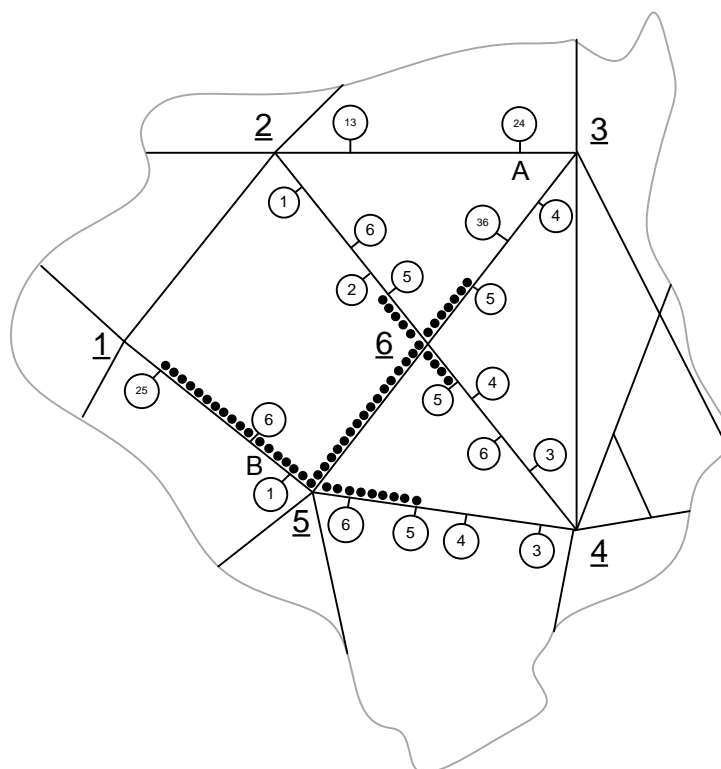


Рис. 2. Фрагмент подграфа сети автомобильных дорог Северо-Западного федерального округа с метками для достижимых множеств  $Q_\lambda(x_i)$

Пустой участок расположен между метками 4 и 5 на ребре (4,5). Некоторые из этих 33 участков имеют одинаковые  $SI$ . Существует всего 18 областей со следующими  $SI$ :

1. 000000	5. 0000010	9. 001100	13. 000101	17. 110010
2. 010000	6. 0000001	10. 100010	14. 001001	18. 100011
3. 001000	7. 0000011	11. 011000	15. 111000	
4. 000100	8. 1100000	12. 010001	16. 011100	

Так, например, участок между метками 1 и 6 на ребре (1, 5) принадлежит области с  $SI$ , равным 100011, поскольку лишь из точек графа, лежащих между этими двумя метками, достигается вершины 1, 5 и 6 (и никакие другие) в пределах расстояния  $\lambda = 35$ .

После исключения тех  $SI$ , которые доминируются другими  $SI$ , остается только 7 областей (с номерами  $SI$  от 12 до 18). Граф  $G'$  после выполнения шага 4 алгоритма выглядит так, как показано на рисунке 3.

В приведенном примере наименьшее множество (легко) строится с помощью прямого последовательного перебора, оно «порождается»  $SI$  с номерами 16 и 18 в приведенном выше списке. Область, соответствующая  $SI$  с номером 16, состоит из одной точки, расположенной на ребре (2,3) в том месте, где находится кружок  $\textcircled{24}$ . На рисунке 2 эта точка обозначена буквой  $A$ . Область, соответствующая  $SI$  с номером 18, представляет собой участок ребра (1,5) между метками 6 и 1; на рисунке 2 она обозначена буквой  $B$ .

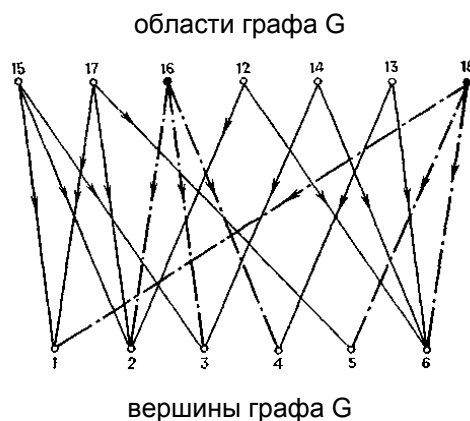


Рис. 3. Граф  $G'$  после выполнения шага 4 алгоритма (области в наименьшем доминирующем множестве обозначены «●»)

Таким образом, при  $\lambda = 35$  км требуется два центра; один расположен в точке  $A$ , а другой – в любой точке области  $B$ . Поскольку область  $A$  является точкой, то два указанных центра образуют также абсолютный 2-центр и  $\lambda=35$  является минимально возможным критическим расстоянием для существования 2-центра. Поэтому при  $\lambda < 35$  область  $A$  исчезнет совсем, и тогда требуется размещать 3-центр.

В связи с громоздкостью графа автомобильных дорог Северо-Западного региона целесообразно граф разбивать на подграфы, т. к. число повторений шагов алгоритма с 3 по 6 (для различных значений  $\lambda$ ) всех повторений, которые необходимо осуществить для получения абсолютного  $p$ -центра с заданной точностью может достигать нескольких сотен.

В работе [4] представлены времена вычисления (в секундах) и числа итераций, требуемые при построении абсолютных 1-, 2-, 3-, 4- и 5-центров для случайно выбранных связных и неориентированных графов. Приведенный алгоритм может эффективно применяться при нахождении абсолютных  $p$ -центров достаточно больших графов.

### Выводы

Представленный алгоритм позволяет рассчитать минимальное количество базовых станций цифрового стандарта TETRA и места их размещения на графе автомобильных дорог.

Дальнейшей перспективой исследований является реализация приведенного алгоритма в геоинформационной системе КБ «Панорама» с написанием подпрограммы, позволяющей после выделения зоны ответственности на цифровой карте получить искомое значение минимального количества и мест размещения базовых станций на графе дорог.

Приведенные расчеты сделаны на примере подграфа сети автомобильных дорог Северо-Западного района Западного региона.

### Литература

1. Багдасарян А. С., Багдасарян С. А., Кащенко Г. А., Николаева С. А., Семенов Р. В. Система автоматической идентификации управления перемещением грузов на железнодорожном транспорте // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2013. № 3. С. 92 – 98.
2. Багдасарян А. С., Николаева О. В., Подшивалова Г. В., Семенов Р. В. Оценка дальности действия систем радиочастотной идентификации в условиях природных и техногенных катастроф // *Теория и техника радиосвязи*. 2012. № 4. С. 11 – 16.
3. Боговик А. В., Нестеренко А. Г., Одоевский С. М., Рашич О. В., Паращук И. Б., Салюк Д. В., Скоропад А. В. Новые информационные и сетевые технологии в системах управления военного назначения. Часть 1. Новые сетевые технологии в системах управления военного назначения. СПб.: ВАС, 2010. 432 с.
4. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывная математика. Книга 7. Графы. Часть 2. Киев: Освіта України, 2015. 513 с.
5. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

### References

1. Bagdasaryan A. S., Bagdasaryan S. A., Kashchenko G. A., Nikolaeva S. A., Semenov R. V. *Sistema avtomaticheskoy identifikacii upravleniya peremeshcheniem gruzov na zheleznodorozhnom transporte* [System of automatic identification of management of movement of freights on railway transport]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2013, no. 3, pp. 92-98 (in Russian).
2. Bagdasaryan A. S., Nikolaeva O. V., Podshivalova G. V., Semenov R. V. *Ocenka dal'nosti dejstviya system radiochastotnoj identifikacii v usloviyah prirodnyh i tekhnogennyh katastrof* [Assessment of range of action of systems of radio-frequency identification in the conditions of natural and technogenic catastrophes]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2012, no. 4, pp. 11-16 (in Russian).
3. Bogovik A. V., Nesterenko A. G., Odoevskij S. M., Rashich O. V., Parashchuk I. B., Salyuk D. V., Skoropad A. V. *Novye informacionnye i setevye tekhnologii v sistemah upravleniya voennogo naznacheniya. CHast' 1. Novye setevye tekhnologii v sistemah upravleniya voennogo naznacheniya* [New information and network technologies in military control systems. Part 1. New network technologies in military control systems]. Saint-Petersburg, Budyonny Military Academy of Communications, 2010. 432 p. (in Russian).
4. Kononyuk A. E. *Diskretno-nepreryvnaya matematika. Kniga 7. Grafy. CHast' 2* [Discrete and continuous mathematics. Book 7. Columns. Part 2]. Kiev, Osvita Ukraine, 2015. 513 p. (in Russian).
5. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskij podhod* [Theory of counts. Algorithmic approach]. Moscow, World, 1978. 432 p. (in Russian).

Статья поступила 11 февраля 2016 г.

### Информация об авторах

*Семенов Сергей Сергеевич* – доктор технических наук, доцент. Профессор кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: безопасность связи; техническое обеспечение связи; качество военной продукции; программирование при решении различных прикладных задач. E-mail: semsem@yandex.ru

*Смолеха Виталий Петрович* – соискатель ученой степени кандидата военных наук. Доцент кафедры телекоммуникационных технологий и сетей. Ульяновский государственный университет. Область научных интересов: теория инфокоммуникационных систем и сетей и теория цифровой обработки сигналов. E-mail: v.0750@yandex.ru

*Плут Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: техническое обеспечение связи. E-mail: mplout@mail.ru.

*Коморников Павел Маркович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: метрологическое обеспечение; управление запасами; техническое обеспечение связи. E-mail: nnoteer@mail.ru.

*Смолеха Алексей Витальевич* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: техническое обеспечение связи; технология радиочастотной идентификации. E-mail: a.1802@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

---

## Determining the Optimal Location of TETRA Standard Base Stations to Create a System of Definitions and the Transfer a Coordinate-Time Information on the Means of Communication

S. S. Semenov, V. P. Smoleha, M. N. Plut, P. M. Komornikov, A. V. Smoleha

*A promising and relying on modern world practice the direction of further improvement of the system of technical maintenance of communication is to define and transfer a coordinate-time information on the means of communication in the mode of the time close to real digital map of the automated workplaces officials controls. **Purpose of research** is to develop a control system, positioning and transfer of information on the technical condition of communication with the display of information on digital maps of the automated workplaces officials TMC. **Formulation of the problem:** an integral part of the research is to calculate the smallest number of base stations for professional trunked radio communication systems, as well as the need to find placements base stations on the graph of the road network of the North-West District of the Western Region. In solving the problem there is a limit to the distance between each node of the network of roads and the nearest base station is identical to the radius of the station steps. **Methods used:** graph theory, algorithm for finding the  $p$ -centers. **The novelty:** is that the application of a proven algorithm for finding the  $p$  centers solved the problem of minimizing the number of base stations and identifies their locations. **The result:** the number of base stations and their location on the graph of the road network. **The***



*practical significance* is to reduce material costs for the introduction of the equipment, the TETRA standard devices and tools in the development of control systems, positioning and transfer of information on the technical condition means of communication. The implementation of the algorithm on PC will reduce the time of calculation for the graph of the road network.

**Key words:** system of technical maintenance of communication, means of communication, radio frequency identification technology, finding the p-centers.

### Information about Authors

*Sergey Sergeevich Semenov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Associate Professor. Professor at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of communications. Field of research: Communication security; information security; technical maintenance of communication; the quality of products, programming for solving various applications. E-mail: semsem@yandex.ru

*Vitaly Petrovich Smoleha* – Ph.D. of Military Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of telecommunications technologies and networks. Ulyanovsk state university. Field of research: theory of communication systems and networks and the theory of digital signal processing. E-mail: v.0750@yandex.ru-

*Mihail Nikolaevich Plut* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of Communications. Field of research: technical maintenance of communication. E-mail: mplout@mail.ru

*Pavel Markovich Komornikov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of Communications. Field of research: metrological maintenance; inventory management; technical maintenance of communication. E-mail: nnoteer@mail.ru

*Alexsey Vitalevich Smoleha* – Postgraduate, military student at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of Communications. Field of research: technical maintenance of communication; technology of radio-frequency identification. E-mail: a.1802@yandex.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.