

Научная статья

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-67-77>

EDN:KIVXAN



Адресное пеленгование источников сигналов транкинговых систем связи

Владимир Борисович Манелис, vbm@ircoc.vrn.ru
Владимир Александрович Сладких ✉, sladkihva@ircoc.vrn.ru
Владимир Алексеевич Козьмин, kozminva@ircoc.vrn.ru
Данила Владимирович Шатилов, shatilovdv@ircoc.vrn.ru

АО «ИРКОС»,
Москва, 129626, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Транкинговые системы радиосвязи получили широкое распространение в России и в других странах. В этой связи службам радиоразведки и радиоконтроля необходимо регулярно проводить поиск и идентификацию функционирующих радиостанций, а также их пеленгование и оценку местоположения. В транкинговых системах имеется множество частотных каналов и осуществляется их динамическое выделение абонентам на время сеансов связи. Поскольку абоненты могут использовать разные радиоканалы в различные интервалы времени, для определения местоположения источника сигнала необходимо выделить его пеленги во всех радиоканалах системы. Для решения этой задачи должно быть использовано адресное пеленгование, которое включает обнаружение сигналов источников транкинговых сетей, их идентификацию и формирование пеленгов идентифицированных источников.

Целью работы является разработка алгоритмов адресного пеленгования источников сигналов транкинговых сетей DMR, dPMR, NXDN, APCO P25, TETRA. В работе использованы **методы** компьютерного и натурного моделирования разработанных алгоритмов. В качестве инструментальной базы использованы двухканальный приемник, антенная решетка, анализаторы транкинговых систем и тестовые радиостанции.

Новизна. В работе представлен алгоритм адресного пеленгования источников сигналов транкинговых систем связи DMR, dPMR, P25, NXDN, TETRA, который выполняет обнаружение, идентификацию источников сигнала и формирование оценки направления на эти источники. Разработан алгоритм предварительного обнаружения активных радиоканалов транкинговых сетей, позволяющий значительно сократить количество анализируемых несущих частот и повысить быстродействие работы анализатора.

Решение. Реализация представленного алгоритма адресного пеленгования основана на использовании анализаторов транкинговых систем и двухканального радиоприемника с антенной решеткой и аппаратурой навигации. Анализаторы реализуют «адресность», а двухканальный приемник и антенная решетка – пеленгование идентифицированных источников. На основании спектрального анализа разработан алгоритм предварительного обнаружения активных радиоканалов транкинговых сетей.

Практическая значимость. Внедрение адресного пеленгования источников сигналов транкинговых систем связи позволяет определять их местоположение и расширяет функциональные возможности существующих анализаторов сигналов. Использование представленного алгоритма предварительного обнаружения активных радиоканалов значительно сокращает время анализа. Разработанные алгоритмы адресного пеленгования внедрены и успешно апробированы в анализаторе источников сигналов транкинговых систем связи на базе мобильного пеленгатора АРТИКУЛ-М1.

Ключевые слова: DMR, P25, dPMR, NXDN, TETRA, транкинговые системы связи, анализатор сигнала, двухканальный радиоприемник, антенная решетка, адресное пеленгование

Ссылка для цитирования: Манелис В.Б., Сладких В.А., Козьмин В.А., Шатилов Д.В. Адресное пеленгование источников сигналов транкинговых систем связи // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 4. С. 67–77. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-67-77. EDN:KIVXAN

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-67-77>

EDN:KIVXAN

Address Direction Finding of Trunk Communication Systems Signal Sources

 Vladimir B. Manelis, vbm@ircoc.vrn.ru Vladimir A. Sladkikh , sladkihva@ircoc.vrn.ru Vladimir A. Kozmin, kozminva@ircoc.vrn.ru Danila V. Shatilov, shatilovdv@ircoc.vrn.ru

JSC "IRCOS",
Moscow, 129626, Russian Federation

Annotation

Relevance. Trunk radio communication systems have become widespread in Russia and other countries. In this regard, radio intelligence and radio monitoring services must regularly search for and identify functioning radio stations, as well as their direction finding and location assessment. Trunk systems have many frequency channels, and they are dynamically allocated to subscribers for the duration of communication sessions. Since subscribers can use different radio channels at different time intervals, to determine the location of the signal source it is necessary to select its bearings in all radio channels of the system. To solve this problem, address direction finding must be used, which includes detection of signals from trunk network sources, their identification and formation of bearings of identified sources.

The aim of the work is to develop algorithms for address direction finding of signal sources of trunk networks DMR, dPMR, NXDN, APCO P25, TETRA. The paper uses **methods** of computer and full-scale modeling of the developed algorithms. The instrumental base used is a two-channel receiver, an antenna array, trunk systems analyzers and test radio stations.

Novelty. The paper presents an algorithm for address direction finding of signal sources of trunk communication systems DMR, dPMR, P25, NXDN, TETRA, which performs detection, identification of signal sources and formation of an estimate of the direction to these sources. An algorithm for the preliminary detection of active radio channels of trunk networks has been developed, which allows for a significant reduction in the number of analyzed carrier frequencies and an increase the speed of the analyzer.

Decision. The implementation of the presented algorithm of address direction finding is based on the use of trunk system analyzers and a two-channel radio receiver with an antenna array and navigation equipment. The analyzers implement "addressability", and the two-channel receiver and antenna array implement direction finding of identified sources. Based on spectral analysis, an algorithm for the preliminary detection of active radio channels of trunk networks has been developed.

Practical significance. The implementation of address direction finding of signal sources of trunk communication systems allows determining their location and expands the functionality of existing signal analyzers. The use of the developed algorithm for preliminary detection of active radio channels significantly reduces the analysis time. The developed algorithms for address direction finding have been implemented and successfully tested in the analyzer of signal sources of trunk communication systems based on the direction finder ARTIKUL-M1.

Keywords: DMR, P25, dPMR, NXDN, TETRA, trunk communication systems, signal analyzer, two-channel radio receiver, antenna array, address direction finding

For citation: Manelis V.B., Sladkikh V.A., Kozmin V.A., Shatilov D.V. Address Direction Finding of Trunk Communication Systems Signal Sources. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(4):67–77. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-67-77. EDN:KIVXAN

Введение

В настоящее время широкое распространение, в том числе в России, получили транкинговые си-

стемы радиосвязи. В таких системах имеется множество частотных каналов, и осуществляется их динамическое выделение абонентам на время се-

ансов связи. Транкинговые системы широко используются для мобильной радиосвязи в Вооруженных Силах, МЧС, МВД, муниципальных службах, транспортных, энергетических компаниях и др. К транкинговой связи относятся системы TETRA (аббр. от англ. Terrestrial Trunked Radio), DMR (аббр. от англ. Digital Mobile Radio), APCO P25 (Project 25), dPMR (аббр. от англ. Digital Personal Mobile Radio), NXDN (аббр. от англ. Next Generation Digital Narrowband) и др.

Для планирования и эксплуатации сетей транкинговой радиосвязи гражданского назначения, проверки соответствия требований к параметрам передатчиков, соответствия частотно-территориальному, плану службам радиомониторинга и радиоконтроля необходимо регулярно проводить поиск и идентификацию функционирующих радиостанций, а также анализ параметров их радиосигналов. Эта задача также актуальна для радиоэлектронной разведки в системах специального назначения. В [1–5] представлены российские анализаторы сигналов некоторых транкинговых систем связи.

Кроме обнаружения и идентификации, реализованных в этих анализаторах, актуальной является также задача пеленгования и оценки местоположения источников сигналов. Эта задача практически не освещена в известной литературе. Для ее решения могут использоваться мобильные или стационарные станции радиоконтроля, оснащенные пеленгационным оборудованием. В разных точках траектории движения мобильной станции или в пунктах размещения стационарных станций выполняется обнаружение сигналов источников транкинговых сетей, их идентификация и формирование пеленгов идентифицированных источников (адресное пеленгование). По совокупности пеленгов каждого из источников выполняется расчет их местоположения, например, как в [1, 2, 6].

Поскольку в транкинговых системах каждый абонент может использовать разные радиоканалы в различные интервалы времени, пеленги каждого абонента могут формироваться также в различных радиоканалах системы. Данная особенность транкинговых систем делает принципиально невозможным определение местоположения источника сигнала по полученным пеленгам в одном радиоканале. Поэтому без адресного пеленгования определить местоположение источников транкинговых систем не представляется возможным, так как из совокупности пеленгов невозможно выделить пеленги конкретного источника.

Для некоторых стандартов транкинговой связи (DMR, TETRA) предусмотрена слотовая временная структура сигналов. В этом случае разные станции могут осуществлять передачу в одном частотном канале в различных слотах. Отсюда для процедуры адресного пеленгования необходимо определять слоты каждого источника.

Для транкинговых систем связи выделены определенные диапазоны частот. Например, для систем DMR в России предусмотрены диапазоны 134–176 МГц и 403–470 МГц, для систем TETRA – 410–430 и 450–470 МГц. Однако конкретные используемые радиоканалы (несущие) в рамках выделенных диапазонов в задаче радиоконтроля априори неизвестны. Поэтому для адресного пеленгования источников транкинговых систем требуется предварительное обнаружение используемых радиоканалов.

В [7, 8] приведено описание алгоритмов адресного пеленгования базовых станций (БС) сотовых систем связи GSM, UMTS, LTE, 5G. Целью данной работы является адресное пеленгование источников сигналов транкинговых сетей DMR, dPMR, NXDN, APCO P25, TETRA.

В общем случае представленная в данной работе реализация адресного пеленгования основана на использовании анализаторов сигналов транкинговых сетей, двухканального радиоприемника, содержащего опорный и коммутируемый каналы, а также антенной решетки (АР). Анализаторы реализуют «адресность», а двухканальный приемник и АР – пеленгование обнаруженных источников.

Предварительное обнаружение активных радиоканалов

Активные радиоканалы анализируемой транкинговой системы априори неизвестны. Процедура обнаружения и синхронизации сигнала, выполняемая анализатором с малым шагом по частоте в пределах исследуемой широкой полосы, является чрезмерно трудоемкой с точки зрения вычислительной сложности из-за большого количества возможных положений несущих в этой полосе. В этой связи требуется предварительное быстрое действующее обнаружение активных радиоканалов, которое в работе выполняется посредством спектрального анализа непрерывного входного сигнала опорного канала, постоянно подключенного к одному элементу АР.

Для сокращения вычислительной сложности входной широкополосный сигнал разбивается на несколько частотных интервалов шириной ΔF . Разбиение осуществляется с перекрытием, которое определяется шириной полосы транкингового сигнала. Для каждого частотного интервала осуществляется фильтрация и передискретизация входного сигнала, в результате формируется комплексный видеосигнал с частотой дискретизации f_d . В дальнейшем сигналы всех сформированных частотных интервалов обрабатываются независимо.

Спектральный анализ каждого частотного интервала осуществляется следующим образом. Интервал длительности сигнала разбивается на

подынтервалы длиной 1024 отсчета, над которыми выполняется быстрое преобразование Фурье. В результате для каждого подынтервала получаем амплитудный спектр $Q_k^{(n)}$, где $k = \overline{0,1023}$; $n = \overline{1, N}$ – номер подынтервала; N – число полных подынтервалов.

Из этого массива формируется максимальный амплитудный спектр (спектр с максимальными компонентами):

$$Q_k^{\max} = \max_n(Q_k^{(n)}), \quad k = \overline{0,1023}. \quad (1)$$

Далее рассчитывается порог 1, как увеличенный вдвое 10 %-й квантиль массива $Q_k^{\max}$ (1). На спектральном интервале $k = \overline{0,1023}$ выделяются области G_j , где $Q_k^{\max}$ превышает порог 1. Здесь j – номер области; W_j – ширина области; $j = \overline{1, J}$; J – число выделенных областей.

Наряду с сигнальными областями спектра часто имеют место также узкополосные помехи, которые отбраковываются по ширине следующим образом:

$$W_j < h \cdot B, \quad (2)$$

где B – ширина полосы сигнала анализируемой транкинговой системы; h – порог отбраковки.

Оставшиеся после отбраковки области $\tilde{G}_j$, где $j = \overline{1, \tilde{J}}$ ($\tilde{J}$ – число оставшихся областей), считаются спектральными интервалами возможного расположения активных несущих транкинговой системы.

Окончательно несущие-кандидаты (несущие, которые должны исследоваться анализатором) определяются следующим образом. Для спектральных интервалов возможного расположения несущих формируется нормированная корреляция максимального амплитудного спектра (1) со спектральной маской сигнала анализируемой транкинговой системы:

$$R_k^{(j)} = \frac{\left(\sum_{m=-B/2}^{B/2} Q_{k+m}^{\max} \cdot Z_m\right)^2}{\sum_{m=-B/2}^{B/2} Z_m^2 \cdot \sum_{m=-B/2}^{B/2} (Q_{k+m}^{\max})^2}, \quad (3)$$

$$k \in \tilde{G}_j, \quad j = \overline{1, \tilde{J}},$$

где Z_m , $m = \overline{-B/2, B/2}$ – спектральная маска (априори известный усредненный амплитудный спектр сигнала).

В спектральных областях $\tilde{G}_j$, $j = \overline{1, \tilde{J}}$ выделяются подобласти E_n , $n = \overline{1, L}$, в которых выходной сигнал коррелятора (3) превышает фиксированный порог 2, равный 0,85. Обозначим $E_n^{\max} = \max_{k \in E_n}(E_n)$ как максимальное значение n -й подобласти, W_n – ширину этой подобласти, L – число выделенных подобластей.

Дальнейшая процедура зависит от допустимой частотной расстройки δ для сигнала анализируемой транкинговой системы. Исследование алгоритмов анализаторов транкинговых систем показало, что допустимая частотная расстройка приблизительно составляет: $\delta = 3$ кГц – для DMR, P25, NXDN (полоса 12,5 кГц); $\delta = 1,5$ кГц – для dPMR, NXDN (полоса 6,25 кГц); $\delta = 4$ кГц – для TETRA.

Если ширина выделенной подобласти W_n не превышает 2δ , несущая-кандидат в такой подобласти определяется как $\hat{k}^{(n)} = \arg E_n^{\max}$. В противном случае несущие-кандидаты в n -й подобласти определяются по выражению: $\hat{k}_i^{(n)} = \arg E_n^{\max} \pm 2\delta i$, $i = 0, 1, \dots$ при условии, что $\hat{k}_i^{(n)} \in E_n$. При этом анализатор исследует несущие-кандидаты, начиная с $\hat{k}_0^{(n)}$, а в случае обнаружения сигнала из дальнейшего анализа исключаются значения $\hat{k}_i^{(n)}$, располагающиеся от активной несущей ближе, чем на ширину сигнала B .

Для каждой из определенных выше несущих-кандидатов по непрерывному сигналу опорного канала анализатором выполняется поиск сигнала с последующей идентификацией его источников. В [1–5] приведены блок-схемы и описание процедур обнаружения и выделения идентификационных параметров сигналов для некоторых стандартов транкинговой связи. Обработка сигналов всех несущих-кандидатов выполняется параллельно. Если в соответствии с приведенной выше процедурой число несущих-кандидатов равно нулю, работа анализатора в данном частотном интервале не производится.

На рисунке 1 приведены примеры предварительного определения несущих-кандидатов систем TETRA и DMR, где ширина полосы анализируемого интервала: $\Delta F = 400$ кГц, частота дискретизации – $f_d = 400$ кГц, порог отбраковки – $h = 0,6$. Эфирные входные сигналы этих примеров получены в крупном российском городе. На этих рисунках представлены зависимости максимального амплитудного спектра – 1 (синим цветом) и выходного сигнала коррелятора – 3 (красным цветом) от частоты. Пунктиром показаны порог 1 и порог 2. Максимальный амплитудный спектр и порог 1 представлены в логарифмическом масштабе. Маркером показаны несущие-кандидаты, в которых анализатор должен выполнить поиск и идентификацию. Сигналы системы TETRA успешно обнаружены и идентифицированы на несущих 1, 4, 5, 6 (зеленый маркер на рисунке 1а), сигналы системы DMR – на несущих 1, 6 (зеленый маркер на рисунке 1б). На других несущих-кандидатах (черный маркер) осуществляется передача сигналов других систем связи. Рисунок 1б иллюстрирует также эффективную отбраковку узкополосных помех.

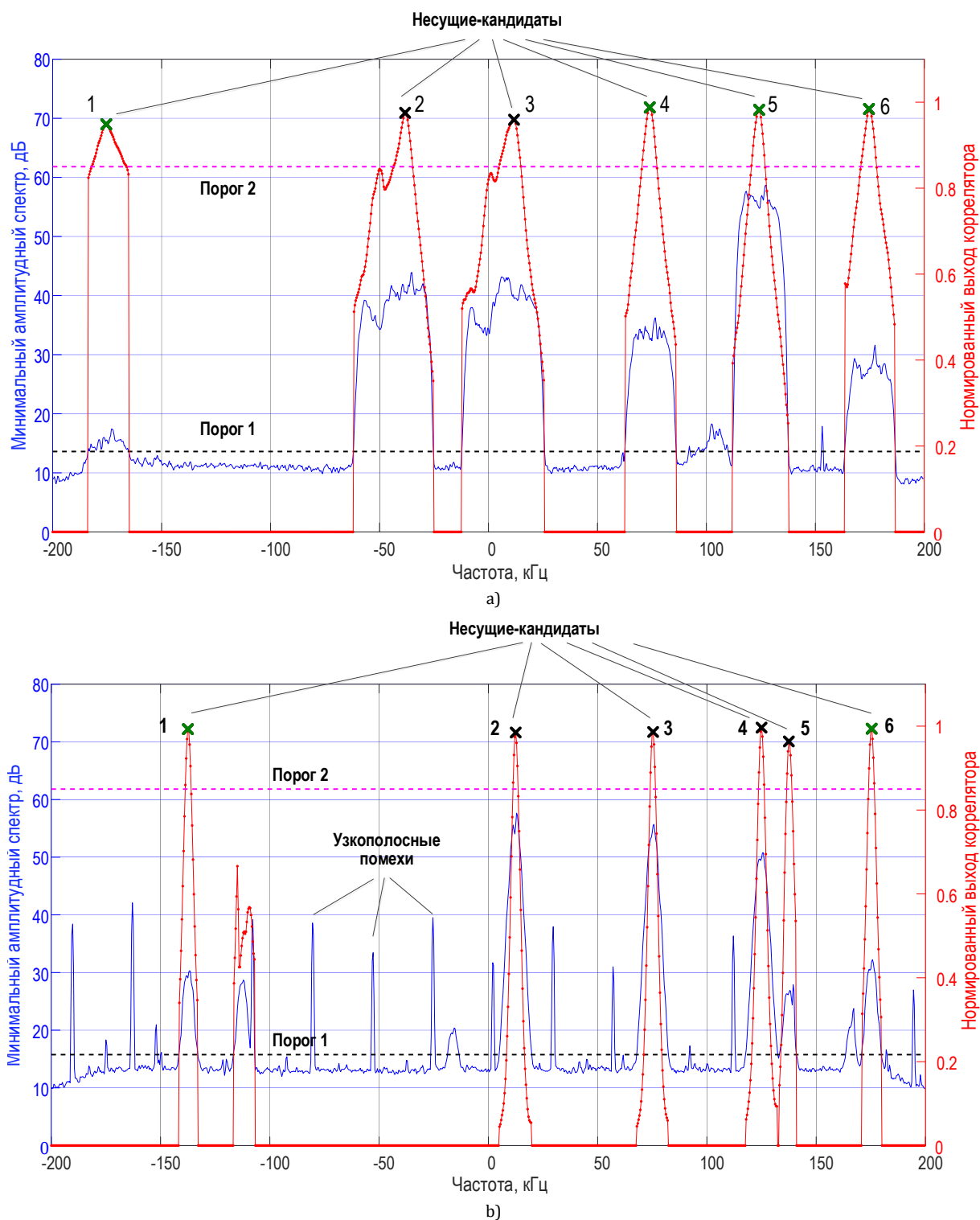


Рис. 1. Иллюстрация процедуры определения активных радиоканалов системы TETRA (a) и DMR (b)

Fig. 1. Illustration of the Procedure for Determining Active Radio Channels of the TETRA System (a) and DMR System (b)

Использование процедуры предварительного обнаружения активных радиоканалов позволяет значительно снизить количество частотных позиций, для которых необходимо выполнять анализ сигнала. Для рассмотренного выше примера обнаружения каналов системы TETRA вместо анализа

16 частотных позиций с шагом 25 кГц (частотная сетка системы TETRA) в полосе $\Delta F = 400$ кГц проанализировано 6 позиций. Для системы DMR вместо анализа $\Delta F/28 = 67$ частотных позиций для приведенного примера проанализированы всего 6 несущих.

Общая процедура пеленгования источников транкинговых систем

Пеленгование источников транкинговых систем реализуется на базе двухканальной приемной аппаратуры, использующей многоэлементную АР. Обозначим номера каналов приемника – 0 (опорный канал) и 1 (коммутируемый канал), $m = \overline{0, M-1}$ – номер элемента АР, M – число элементов АР. Исходными данными для адресного пеленгования являются отсчеты комплексного видеосигнала, синхронно поступающие с каждого канала приемника $x_{0i}, x_{1i}^{(m)}, i = \overline{0, L_c-1}, m = \overline{0, M-1}$.

Комплексный видеосигнал опорного канала 0 формируется с помощью аналогового тракта, который постоянно подключен к нулевому элементу АР $m = 0$. Комплексный видеосигнал коммутируемого канала 1 формируется с помощью аналогового тракта, который последовательно подключается ко всем элементам АР.

Процедура пеленгования выполняется параллельно с работой анализатора, который осуществляет обнаружение транкингового сигнала, частотно-временную синхронизацию, идентификацию источников сигнала, а также определяет принадлежность временных интервалов сигнала тому или иному источнику. На каждом таком интервале выполняется пеленгование, и соответствующий пеленг относится к идентифицированной станции. Таким образом, начало и окончание интервала пеленгования, а также начальный и конечный отсчеты блоков элементов АР известны. Заметим, что блоки элементов АР не синхронизированы с временной структурой анализируемого транкингового сигнала.

На рисунке 2 показаны блоки отсчетов видеосигнала элементов АР $m = \overline{0, M-1}$ для коммутируемого тракта и соответствующие блоки отсчетов опорного тракта. Цикл пеленгования занимает интервал времени, в течение которого формируются блоки отсчетов всех элементов АР. Пауза длительностью τ между блоками отсчетов обу-

словлена временем переключения коммутируемого канала между элементами АР. На рисунке 2 $i_{op}^{(m)}, i_{cl}^{(m)} = i_{op}^{(m)} + L_c$ – начальный и конечный отсчеты m -го элемента АР, L_c – число отсчетов блока, T_e – его длительность, T_p – длительность интервала пеленгования, которая обычно связана с временной структурой сигнала.

Длительность времени работы одного элемента АР T_e – это аппаратный параметр, который зависит от анализируемой транкинговой системы и выбирается исходя из соотношения:

$$T_e \leq \frac{T_p - M\tau}{M + 1}. \quad (4)$$

В этом случае на интервале одного цикла пеленгования гарантированно имеют место блоки отсчетов длительностью T_e каждого элемента АР.

Для каждого цикла пеленгования формируются величины, в которых содержится информация о разности фаз между синхронными отсчетами m -го элемента коммутируемого канала и нулевого элемента опорного канала:

$$U_m = \sum_{i=i_{op}^{(m)}}^{i_{cl}^{(m)}} x_{0i}^* \cdot x_{1i}^{(m)}, m = \overline{0, M-1}. \quad (5)$$

По величинам $U_m, m = \overline{0, M-1}$, в соответствии с фазоразностным методом пеленгования формируется решающая функция:

$$\Omega(\theta) = D(\theta) |\mathbf{U}^T \cdot \mathbf{e}|, \quad (6)$$

где $D(\theta)$ – диаграмма направленности элемента АР; $\mathbf{U}^T = (U_0, \dots, U_{M-1})$; $\mathbf{e}$ – вектор предполагаемых разностей фаз между сигналами m -го и нулевого элементов АР в случае угла прихода θ : $\mathbf{e} = \{\exp(j \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d_m(\theta)), m = \overline{0, M-1}\}$; $d_m(\theta)$ – разность хода между m -м и нулевыми элементами АР: $d_m(\theta) = (a_m - a_0)\sin\theta + (b_m - b_0)\cos\theta$; (a_m, b_m) – координаты элементов АР; λ – длина волны сигнала.

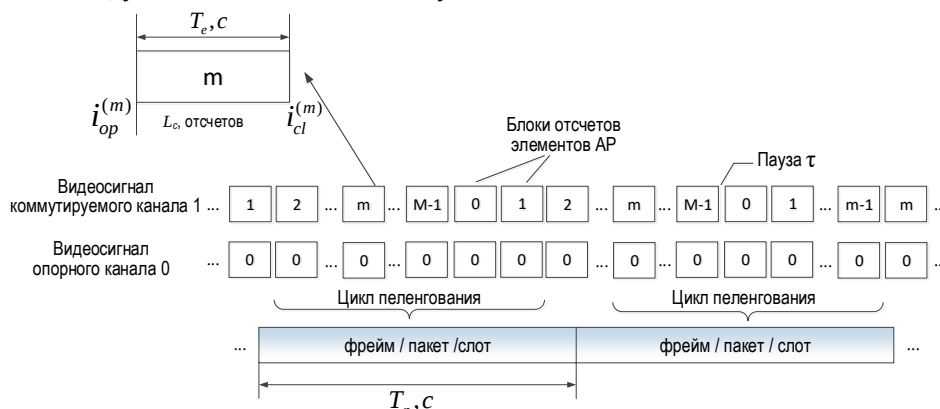


Рис. 2. Иллюстрация общей процедуры пеленгования
Fig. 2. Illustration of the General Direction Finding Procedure

Пеленг определяется по положению максимума решающей функции (6):

$$\bar{\theta} = \max_{\theta} \Omega(\theta). \quad (7)$$

Для повышения помехоустойчивости в каждой точке анализа выполняется некоторое количество циклов пеленгования. Совокупность полученных пеленгов образуют гистограмму пеленгования, максимум которой служит оценкой направления на источник.

Особенности пеленгования источников транкинговых систем

Рассмотрим некоторые особенности пеленгования для транкинговых систем DMR, dPMR, P25, NXDN, TETRA. Стандарты этих систем [9–13] предполагают различные режимы связи: между мобильными радиостанциями напрямую, соединение с использованием ретрансляторов, а также работу через БС в составе транкинговой сети, в которой процедуры предоставления канала централизованно регулируются сетью.

В режиме транкинговой сети все эти системы используют множественный доступ с частотным разделением каналов. При этом в системах dPMR, P25, NXDN в каждом частотном канале на интервале сеанса связи передавать голос и данные может только один абонент. В системах DMR, TETRA используется также многостанционный доступ с временным разделением каналов, при котором для DMR организована двухслотовая, а для TETRA четырехслотовая временная структура. Это позволяет на одной несущей передавать голос и данные соответственно двум или четырем абонентам.

DMR

Ширина полосы DMR сигнала – 12,5 кГц. Длительность слота – 30 мс. В слотах передаются пакеты данных длительностью $T_p = 27,5$ мс, защитный интервал между пакетами – 2,5 мс. Скорость передачи DMR сигнала 4800 бод, в каждом символе переносится 2 бита. Используется четырехпозиционная частотная модуляция 4FSK.

В активном режиме БС передачу сигнала ведет непрерывно. На рисунке 3 показан пример временной структуры DMR-сигнала. Цифрами «1» и «2» обозначены слоты соответствующих физических каналов. Обработка DMR-сигнала осуществляется независимо для каждого из двух каналов.

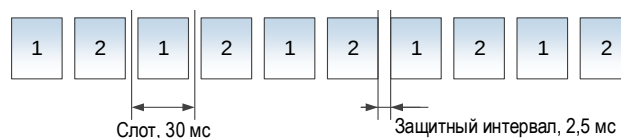


Рис. 3. Пример временной структуры DMR-сигнала

Fig. 3. Example of the Time Structure of a DMR Signal

Исходными данными для пеленгования являются отсчеты комплексного видеосигнала опорного и коммутируемого каналов полосой 12,5 кГц с частотой дискретизации $f_s = J/T = 38,4$ кГц, где $T = 1/4800$ с – длительность символа; $J = 8$ – число отсчетов на символ.

Каждый пеленг DMR сигнала определяется по одному пакету. В частности, для 8-элементной AP ($M = 8$) и паузы на переключение $\tau = 0,5$ мс длительность блока одного элемента AP в соответствии с (4) равна $T_e = 2,6$ мс, что составляет приблизительно $L_e = 100$ отсчетов.

dPMR

Ширина полосы dPMR сигнала – 6,25 кГц. Скорость передачи – 2400 бод, используется четырехпозиционная частотная модуляция 4FSK.

Сигнал dPMR структурирован во времени по фреймам. Имеются следующие виды фреймов: фреймы передачи голоса и данных длительностью (80 мс), фрейм начала передачи (80 мс) и фрейм окончания (20 мс). Фреймы передачи голоса и данных объединены в суперфреймы по 4 фрейма в каждом. Возможны различные варианты сигнала dPMR, типовая структура сигнала показана на рисунке 4. Передача всегда начинается с начального фрейма. За ним следует некоторое количество суперфреймов голоса или данных. Заканчивается передача фреймом окончания.

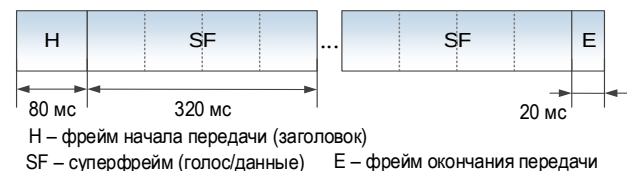


Рис. 4. Пример передачи голоса или данных

Fig. 4. Example of Voice or Data Transmission

Исходными данными для пеленгования являются отсчеты комплексного видеосигнала опорного и коммутируемого каналов полосой 6,25 кГц с частотой дискретизации $f_s = J/T = 19,2$ кГц, где $T = 1/2400$ с; $J = 8$.

Каждый пеленг dPMR сигнала определяется по одному фрейму длительностью $T_p = 80$ мс, фрейм окончания передачи для пеленгования не используется. В частности, для 8-элементной AP ($M = 8$) и паузы на переключение $\tau = 0,5$ мс длительность блока одного элемента AP в соответствии с (4) равна $T_e = 8,4$ мс, что составляет приблизительно $L_e = 161$ отсчет.

NXDN

Ширина полосы NXDN может принимать два значения: 6,25 или 12,5 кГц. Скорость передачи – 2400 или 4800 бод, используется четырехпозиционная частотная модуляция 4FSK.

Сигнал NXDN имеет фреймовую временную структуру. Длительность фрейма составляет $T_{fr} = 80$ мс для полосы 6,25 кГц или $T_{fr} = 40$ мс для полосы 12,5 кГц. В сигнале NXDN передаются различные информационные каналы. Для некоторых из них передача осуществляется только на начальном интервале фрейма длиной $\frac{3}{4}T_{fr}$, что составляет 60 мс для полосы 6,25 кГц или 30 мс для полосы 12,5 кГц. Поэтому используются именно начальные интервалы фреймов, что обеспечивает гарантированное наличие сигнала при пеленговании.

Исходными данными для пеленгования являются отсчеты комплексного видеосигнала опорного и коммутируемого каналов полосой 6,25 или 12,5 кГц с частотой дискретизации $f_s = J/T = 19,2$ или 38,4 кГц, $T = 1/2400$ или $T = 1/4800$ с, $J = 8$.

Каждый пеленг NXDN сигнала определяется по интервалу длительности $T_p = 30$ мс. При этом для полосы 12,5 кГц получаем один пеленг на интервале фрейма, а для полосы 6,25 кГц – два пеленга на фрейм. В частности, для 8-элементной AP и паузы на переключение $\tau = 0,5$ мс длительность блока одного элемента AP в соответствии с (4) равна $T_e = 2,9$ мс, что составляет приблизительно $L_e = 55$ и $L_e = 110$ отсчетов для полос 6,25 и 12,5 кГц.

P25

Ширина полосы сигнала P25 Phase 1 – 12,5 кГц. Скорость передачи – 4800 бод, используется частотная модуляция C4FM (4-х уровневая FSK).

Сигнал P25 представляет собой фреймовую временную структуру. Имеются различные виды фреймов: передачи голоса длительностью 180 мс; передачи данных переменной длительности; заголовка данных (82,5 мс); окончания передачи (15 или 45 мс). Фреймы передачи голоса могут быть объединены в суперфреймы по 2 фрейма в каждом. На рисунке 5 показана типовая передача голосовых данных. Передача начинается с фрейма заголовка данных, за которым следует некоторое количество суперфреймов голоса. Заканчивается передача фреймом окончания.

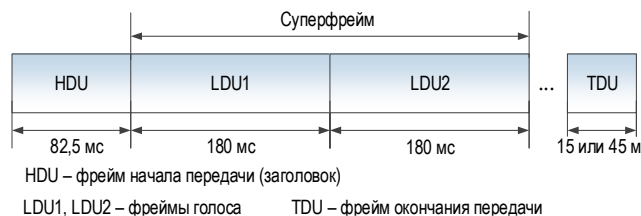


Рис. 5. Пример передачи голоса

Fig. 5. Example of Voice Transmission

Исходными данными для пеленгования являются отсчеты комплексного видеосигнала опорного и коммутируемого каналов полосой 12,5 кГц с

частотой дискретизации $f_s = J/T = 38,4$ кГц, где $T = 1/4800$ с, $J = 8$.

Выбран интервал пеленгования $T_p = 60$ мс, так что за каждый голосовой фрейм формируется три пеленга. Фрейм окончания передачи для пеленгования не используется. В частности, для 8-элементной AP и паузы на переключение $\tau = 0,5$ мс длительность блока одного элемента AP в соответствии с (4) равна $T_e = 6,2$ мс, что составляет приблизительно $L_e = 239$ отсчета.

TETRA

Ширина полосы сигнала TETRA – 25 кГц. Скорость передачи данных – 18 кбод. Используется модуляция $\pi/4$ DQPSK, в которой каждый символ в зависимости от значения использует фазы сигнала $\pm\pi/4, \pm3\pi/4$, то есть передается два бита на символ. Сигнал TETRA во времени структурирован по фреймам длительностью 56,67 мс. Последовательность из 18 фреймов образует мультифрейм длительностью 1,02 с. Фрейм делится на 4 слота длительностью 14,167 мс каждый. В разных слотах фрейма могут вести передачу четыре различных радиостанции.

На рисунке 6 представлена временная структура сигнала TETRA.

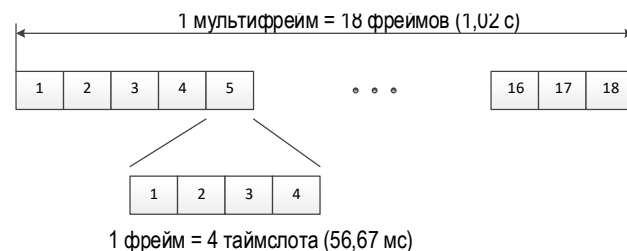


Рис. 6. Временная структура сигнала TETRA

Fig. 6. Time Structure of Signal TETRA

Исходными данными для пеленгования являются отсчеты комплексного видеосигнала опорного и коммутируемого каналов полосой 25 кГц с $f_s = J/T = 90$ кГц, $T = 1/18000$ с, $J = 5$.

Оценка каждого пеленга сигнала TETRA определяется по одному слоту длительности $T_p = 14,167$ мс. В частности, для 8-элементной AP и $\tau = 0,5$ мс длительность блока одного элемента AP в соответствии с (4) равна $T_e = 1,1$ мс, что составляет приблизительно $L_e = 100$ отсчетов.

Примеры адресного пеленгования и оценки местоположения источников

Адресное пеленгование и оценка местоположения источников транкинговых систем связи реализованы в российском анализаторе сигналов транкинговых сетей (https://www.ircos.ru/ru/sw_bstrunk.html) на базе мобильного пеленгатора АРТИКУЛ-М1 (https://www.ircos.ru/ru/pel_mp1.html) производства АО «ИРКОС» (<https://www.ircos.ru/>

[zip/cat2024.pdf](#)). Пеленгатор установлен на автомобиль и включает антенную систему, двухканальное цифровое радиоприемное устройство семейства АРГАМАК и аппаратуру навигации. Функционал обнаружения, анализа и пеленгования сигналов транкинговых сетей реализован в виде отдельного программного модуля.

Приведем некоторые результаты адресного пеленгования источников транкинговых сигналов. На рисунке 7 представлен пример адресного пеленгования двух радиостанций стандарта DMR с иденти-

фикаторами устройств Source ID = 703 и Source ID = 704, работающих на одной частоте 155 МГц в разных слотах сигнала. На фоне карты местности показано реальное расположение радиостанций DMR, положение пеленгатора, ориентация его АР (черной стрелкой), а также направления на радиостанции относительно пеленгатора. Ниже показаны результаты пеленгования: решающие функции (6) и значения пеленгов (7). Видно, что полученные пеленги соответствуют истинному направлению на радиостанции.

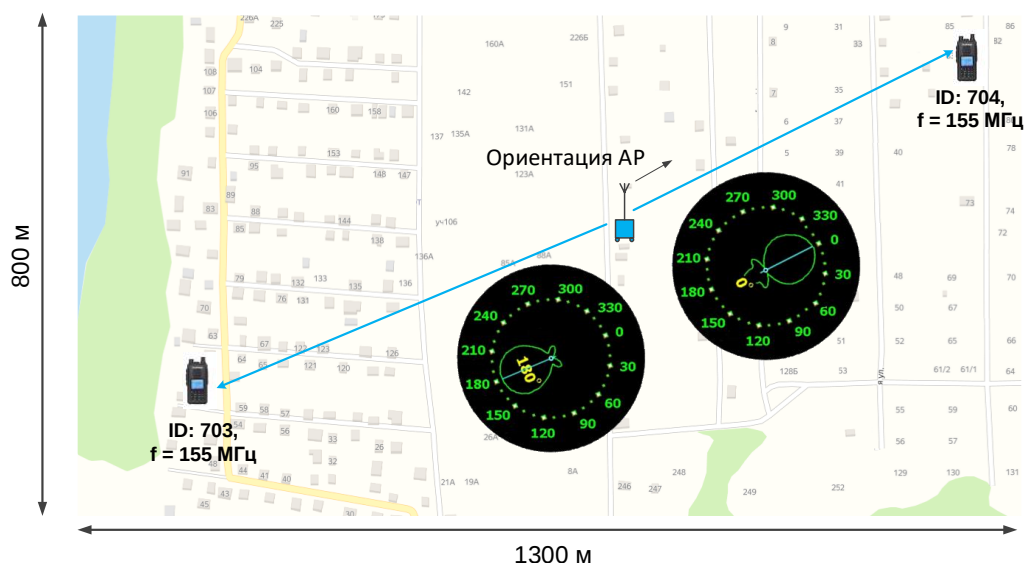


Рис. 7. Пример адресного пеленгования радиостанций DMR, работающих на одной частоте в разных слотах сигнала

Fig. 7. Example of Address Direction Finding of DMR Radio Stations Operating on the Same Frequency in Different Signal Slots

По результатам пеленгования в различных точках траектории движения мобильного пеленгатора можно получить оценку местоположения обнаруженных источников, например, посредством использования угломерного или амплитудно-угломерного методов [1, 6]. На рисунке 8 показан пример оценки местоположения радиостанции сигнала P25 с идентификатором Source ID = 10 и идентификатором сети NAC = 659. Радиостанция работала на частоте 851 МГц, периодически передавая голосовой сигнал. На фоне карты местности показана двумерная решающая функция оценки местоположения источника, трек движения пеленгатора, а также положение точек местности, в которых получены результаты пеленгования. В качестве примера красными пунктирными линиями показаны результаты пеленгования из некоторых точек местности (одиночные пеленги). Полученная оценка местоположения радиостанции (зеленая точка) практически совпадает с ее реальным расположением (оранжевый треугольник), погрешность составила 10 м.

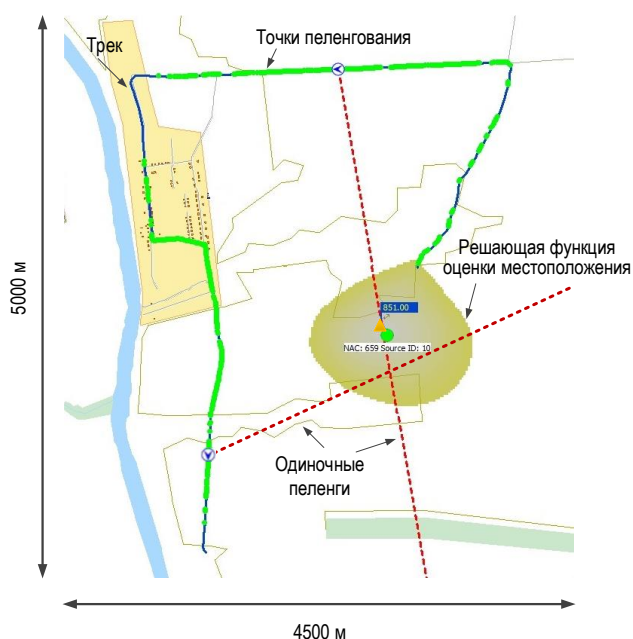


Рис. 8. Пример оценки местоположения радиостанции P25

Fig. 8. Example of Estimating the Location of a Radio Station P25

На рисунке 9 показан пример оценки местоположения радиостанций DMR и NXDN, работающих на частотах 155,13 и 141 МГц соответственно. Радиостанции располагались рядом друг с другом (оранжевый треугольник) и излучали сигнал

независимо друг от друга, периодически передавая в эфир голосовые данные. Полученная погрешность оценки местоположения для обеих радиостанций не превысила 20 м.

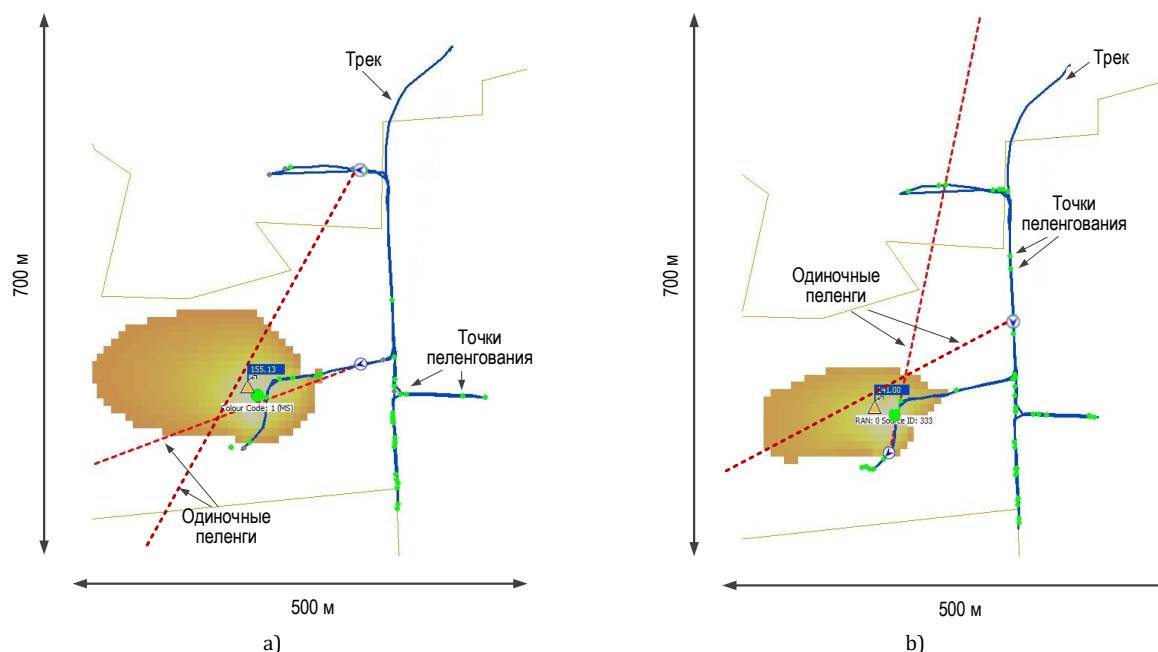


Рис. 9. Пример оценки местоположения радиостанций DMR (a) NXDN (b)

Fig. 9. Example of Estimating the Location of DMR (a) and NXDN (b) Radio Stations

Заключение

В данной работе представлена процедура адресного пеленгования источников сигналов транкинговых систем связи, рассмотрены особенности пеленгования для систем DMR, dPMR, P25, NXDN, TETRA. Описанная процедура позволяет выполнить обнаружение, идентификацию источников и сформировать оценку направления на эти источники. Представлен алгоритм предварительного обнаружения активных радиоканалов транкинговых сетей, который позволяет значительно сократить количество анализируемых несущих частот и повысить скорость обработки.

Список источников

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства. М.: Горячая линия – Телеком, 2015. 640 с.
2. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Автоматизированные системы радиоконтроля и их компоненты. М.: Горячая линия – Телеком, 2022. 488 с.
3. Беспалов О.В., Бочаров Д.Н., Каюков И.В., Козьмин В.А., Манелис В.Б. Анализатор сигналов радиостанций DMR // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 106–110.
4. Ашихмин А.В., Бочаров Д.Н., Козьмин В.А., Крыжко И.Б., Сладких В.А. Анализатор сигналов радиостанций APCO P25 // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 111–114.
5. Жуков А.А., Зайцев А.А., Козьмин В.А., Сысоев Д.С. Анализаторы базовых станций TETRA и DECT // Спецтехника и связь. 2012. № 3. С. 35–40.
6. Козьмин В.А., Крыжко И.Б., Токарев А.Б., Фатеев А.А. Определение местоположения источников радиоизлучения // Спецтехника и связь. 2016. № 4. С. 60–68.
7. Манелис В.Б., Сладких В.А., Козьмин В.А., Бизюков П.Е. Адресное пеленгование базовых станций GSM, UMTS, LTE сетей сотовой связи // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 142–158. DOI:10.24412/2410-9916-2021-2-142-158. EDN:ONSJJS

8. Манелис В.Б., Козьмин В.А., Сладких В.А. Обнаружение и идентификация базовых станций сетей сотовой связи 5G // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 3. С. 152–178. DOI:10.24412/2410-9916-2021-3-152-178. EDN:VKAIOR
9. ETSI TS 102 361-1 V2.3.1 (2013-07). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM). Digital Mobile Radio (DMR) Systems. Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol. 2013. 174 p.
10. TIA-102.BAAA-A. Project 25. FDMA – Common Air Interface. New Technology Standards Project – Digital Radio Technical Standards. 2003.
11. ETSI TS 102 490 V1.8.1 (2014-06). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM). Peer-to-Peer Digital Private Mobile Radio using FDMA with a channel spacing of 6,25 kHz with e.r.p. of up to 500 mW. 2014. 67 p.
12. NXDN TS 1-A Version 1.3. Part 1: Air interface. Sub-part A: Common Air Interface. 2011.
13. ETSI TS 100 392-2 V2.4.1 (2003-10). Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Voice plus Data (V+D). Part 2: Air Interface (AI). 2003. 813 p.

References

1. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A. *Radio Monitoring – Tasks, Methods, Means*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2015. 640 p. (in Russ.)
2. Rembovsky A.M., Ashikhmin A.V., Kozmin V.A. *Automated Radio Monitoring Systems and Their Components*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ.; 2022. 488 p (in Russ.)
3. Bepalov O.V., Bocharov D.N., Kayukov I.V., Kozmin V.A., Manelis V.B. DMR Radio Station Signals Analyzer. *Spectekhnika i svyaz'*. 2016;4:106–110 (in Russ.)
4. Ashikhmin A.V., Bocharov D.N., Kozmin V.A., Kryzhko I.B., Sladkikh V.A. APCO P25 Radio Station Signals Analyzer. *Spectekhnika i svyaz'*. 2016;4:111–114 (in Russ.)
5. Zhukov A.A., Zaitsev A.A., Kozmin V.A., Sysoev D.S. TETRA and DECT Base Station Analyzers. *Spectekhnika i svyaz'*. 2012;3:35–40 (in Russ.)
6. Kozmin V.A., Kryzhko I.B., Tokarev A.B., Fateev A.A. Determining the Location of Radio Emission Sources. *Spectekhnika i svyaz'*. 2016;4:60–68 (in Russ.)
7. Manelis V.B., Sladkikh V.A., Kozmin V.A., Bizyukov P.E. Base station address direction finding of GSM, UMTS, LTE cellular networks. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021;2:142–158 (in Russ.). DOI:10.24412/2410-9916-2021-2-142-158. EDN:ONSJJS
8. Manelis V.B., Kozmin V.A., Sladkikh V.A. Detection and identification of base stations of 5G cellular networks. *Systems of Control, Communication and Security*. 2021;3:152–178 (in Russ.) DOI:10.24412/2410-9916-2021-3-152-178. EDN:VKAIOR
9. ETSI TS 102 361-1 V2.3.1 (2013-07). *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM). Digital Mobile Radio (DMR) Systems. Part 1: DMR Air Interface (AI) protocol*. 2013. 174 p.
10. TIA-102.BAAA-A. Project 25. *FDMA – Common Air Interface. New Technology Standards Project – Digital Radio Technical Standards*. 2003.
11. ETSI TS 102 490 V1.8.1 (2014-06). *Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM). Peer-to-Peer Digital Private Mobile Radio using FDMA with a channel spacing of 6,25 kHz with e.r.p. of up to 500 mW*. 2014. 67 p.
12. NXDN TS 1-A Version 1.3. *Part 1: Air interface. Sub-part A: Common Air Interface*. 2011.
13. ETSI TS 100 392-2 V2.4.1 (2003-10). *Terrestrial Trunked Radio (TETRA). Voice plus Data (V+D). Part 2: Air Interface (AI)*. 2003. 813 p.

Статья поступила в редакцию 18.06.2025; одобрена после рецензирования 17.07.2025; принята к публикации 18.07.2025.

The article was submitted 18.06.2025; approved after reviewing 17.07.2025; accepted for publication 18.07.2025.

Информация об авторах:

МАНЕЛИС
Владимир Борисович

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского сектора АО «ИРКОС»
 <https://orcid.org/0009-0008-7077-3611>

СЛАДКИХ
Владимир Александрович

кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского сектора АО «ИРКОС»
 <https://orcid.org/0009-0007-7397-717X>

КОЗЬМИН
Владимир Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, директор по научной работе АО «ИРКОС»
 <https://orcid.org/0000-0002-5268-1114>

ШАТИЛОВ
Данила Владимирович

инженер-программист 3 категории научно-исследовательского сектора АО «ИРКОС»
 <https://orcid.org/0009-0006-9084-2958>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.