

УДК 621.396.33

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЗАГЛУБЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

MODERN METHODS FOR FORMATION OF RADIOLOCATION IMAGES OF SUBSURFACE OBJECTS

Д. В. Демьянюк,

аспирант кафедры информационных радиотехнологий БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь

С. А. Савенко,

гл. научный сотрудник Научно-исследовательского института Вооруженных Сил Республики Беларусь, д-р техн. наук, профессор, г. Минск, Республика Беларусь

К. Н. Чугай,

докторант Научно-исследовательского института Вооруженных Сил Республики Беларусь, канд. техн. наук, доцент, г. Минск, Республика Беларусь

D. Demyaniuk,

Graduate student of the department of information radiotechnologies of BSUIR, Minsk, Republic of Belarus

S. Savenko,

Chief scientific officer of the Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus, doctor of technical sciences, professor, Minsk, Republic of Belarus

K. Chugai,

Doctoral student of the Research Institute of the Armed Forces of the Republic of Belarus, candidate of technical sciences, associate professor, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 29.01.2018 г.

В статье рассмотрены современные методы формирования радиолокационных изображений заглубленных объектов, среди которых можно выделить методы голографии в радиодиапазоне и метод миграции, а также методы «сверхразрешения».

In the article, modern methods of formation of radar images of subsurface objects, among which one can distinguish methods of holography in the radio range, the method of migration and methods of "superresolution" are considered.

Ключевые слова: заглубленный объект, формирование радиолокационных изображений, радиоголографический метод, томографический метод, «сверхразрешение».

Keywords: subsurface objects, radar image formation, radio-holographic method, tomography method, "superresolution".

В настоящее время существенно возрастает интерес к подповерхностной локации, в частности в сфере инженерно-геофизических исследований, что породило создание различных модификаций радиолокаторов подповерхностного зондирования. Отдельно следует выделить радиолокаторы подповерхностного зондирования малых дальностей, которые предназначены для решения задачи обнаружения заглубленных объектов (в виде малоразмерных неоднородностей) в различных укрывающих средах в ходе разведки местности (приповерхностном слое грунта, железнодорожном полотне (насыпи), взлетно-посадочных полосах аэродромов,

дорожном покрытии автодорог, завалах и т. п.) при проведении поисково-спасательных работ и поиске скрытно установленных объектов.

Существующие методы подповерхностного зондирования, обеспечивающие формирование радиолокационных изображений заглубленных объектов, находят широкое применение в различных областях: геологии, строительстве дорог и промышленных объектов, археологии, военной сфере и т. д.

Повышение эффективности радиолокаторов подповерхностного зондирования, заключающееся в совершенствовании аппаратной части, ограничивается техническими возможностями,

обусловленными приближением к пределам физической реализуемости. В результате очевидна необходимость повышения эффективности путем совершенствования существующих и разработки новых методов обработки принятого сигнала, обеспечивающих формирование радиолокационных изображений в реальном масштабе времени.

В первом приближении многие природные среды можно рассматривать как плоскостойкие, а электромагнитные волны — как плоские гармонические, направление распространения которых перпендикулярно к плоскости раздела.

Рассматривая методы формирования радиолокационных изображений, необходимо учитывать существующие особенности, которые возникают при восстановлении радиолокационного изображения. Они заключаются в том, что принимаемый сигнал имеет сложную структуру, включая компоненты, обусловленные отражением от укрывающей среды (грунта) и различных неоднородностей, встречающихся на пути распространения зондирующего сигнала, и представляет собой двумерный случайный процесс,

который в случае наличия заглубленного объекта может быть описан выражением [1]:

$$f(t_1, t_2) = n(t_1, t_2) + m(t_1, t_2) + p(t_1, t_2) + h(t_1, t_2), \quad (1)$$

где $n(t_1, t_2)$ — сигнал, отраженный от укрывающей среды (земной поверхности);

t_1 — аргумент, характеризующий изменения по оси X;

t_2 — аргумент, характеризующий изменения по оси Y;

$m(t_1, t_2)$ — сигнал, отраженный от заглубленного объекта;

$p(t_1, t_2)$ — сигнал передатчика, просачивающийся в приемный тракт посредством антенной системы;

$h(t_1, t_2)$ — помеха, в качестве которой выступает белый шум.

Неоднородности среды характеризуются относительным изменением диэлектрической проницаемости. Рассеяние электромагнитной волны на неоднородностях рассматривается в скалярном приближении однократного рассеяния. Описание поведения падающей, отраженной

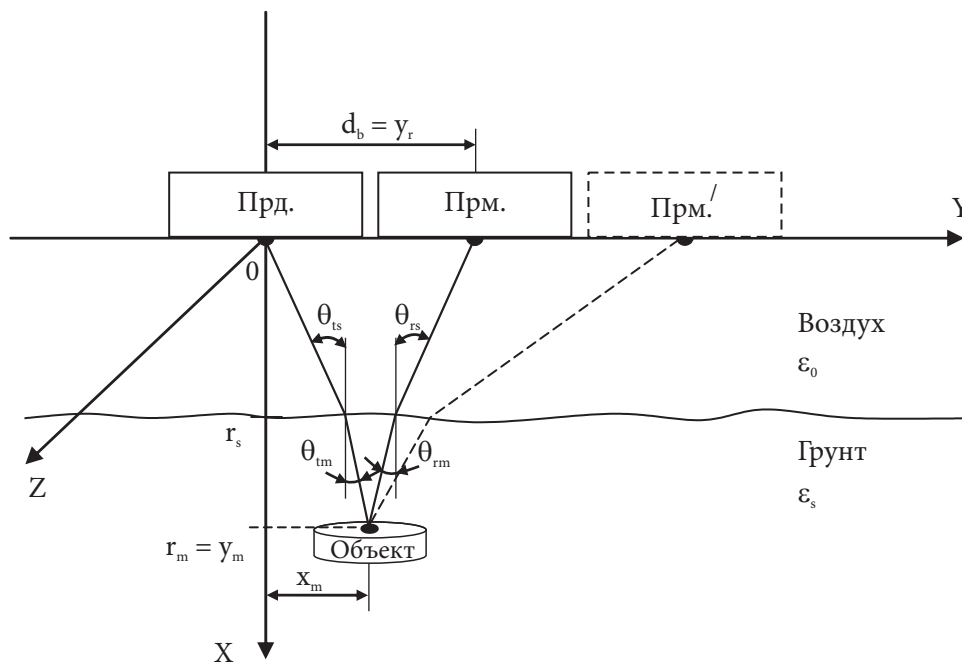


Рис. 1. Схема радиолокационного наблюдения заглубленного объекта:
 координаты фазового центра передающей антенны — $(x_t = 0, y_t = 0, z_t = 0)$;
 координаты фазового центра приемной антенны — $(x_r = 0, y_r = d_b, z_r = 0)$;
 координаты центра верхней поверхности заглубленного объекта — $(x_m = r_m, y_m, z_m = 0)$;
 высота фазового центра передающей антенны над уровнем земли — r_s

и прошедшей волн в такой среде дает одномерное уравнение Гельмгольца [2].

В дискретной форме представления двумерный случайный процесс имеет вид:

$$f_{g,r} = f(g\Delta_1, r\Delta_2), \quad (2)$$

где $g = 0 \dots M - 1$;
 M — количество реализаций в одном скане;
 Δ_1 — интервал дискретизации t_1 ;
 $r = 0 \dots N - 1$;
 N — количество отсчетов в одной реализации;
 Δ_2 — интервал дискретизации t_2 .

Такой сигнал описывается пространственной частотой ω и его структура, обусловленная отражениями, носит сложный характер. При этом, как правило, наибольшую мощность имеет отражение от земной поверхности и приповерхностных неоднородностей, поэтому возникают сложности при выделении составляющих отраженных от верхней и нижней поверхностей объекта.

Схема радиолокационного наблюдения заглушенного объекта приводится с учетом выбранной в [1] структуры системы подповерхностного зондирования на рис. 1, голографические и томографические особенности формирования отраженного сигнала (определяются необходимостью наличия дополнительных приемных каналов) [3–8].

Двумерный энергетический спектр принятого сигнала формируется в соответствии с выражением вида [9]:

$$S(\omega_1, \omega_2) = \frac{\Delta_1 \Delta_2}{4\pi^2} \sum_{\tau_1=0}^{K-1} \sum_{\tau_2=0}^{L-1} W_{\tau_1, \tau_2} R(\tau_1, \tau_2) e^{-j\tau_1 \omega_1 \Delta_1} e^{-j\tau_2 \omega_2 \Delta_2}, \quad (3)$$

где $R(\tau_1, \tau_2)$ — двумерная корреляционная функция принятого сигнала $f(t_1, t_2)$;
 W_{τ_1, τ_2} — корреляционное окно;
 K, L — число значений аргументов двумерной корреляционной функции.

Дискретная форма двумерной корреляционной функции принятого сигнала имеет вид [9]:

$$R(\tau_1, \tau_2) = \frac{1}{MN} \sum_{g=0}^{M-1} \sum_{r=0}^{N-1} \overline{f(g\Delta_1, r\Delta_2)} f(g\Delta_1 - \tau_1, r\Delta_2 - \tau_2), \quad (4)$$

где $\overline{}$ — оператор комплексного сопряжения.

Методы формирования радиолокационных изображений.

Для существующих методов обработки радиолокационных данных классическим и наиболее простым является спектральный метод получения радиолокационного изображения. С учетом преобразования Фурье можно выделить два направления [3]: радиоголографическое (получения радиолокационного изображения всей подповерхностной области) и радиотомографическое (реконструкции внутреннего содержания подповерхностных объектов).

Радиоголографический метод. При решении голографической задачи пространственно-спектральным методом осуществляется восстановление двумерного радиолокационного изображения. Двумерный (пространственный) спектр представляет собой радиолокационное (радиоголографическое) изображение, учитывающее распределение токов, локализованных в объекте, и представляет собой двумерное преобразование Фурье от интенсивности рассеянного поля электромагнитной волны $J(x, y)$, а с учетом функции Дирака $D(\omega_x, \omega_y)$ и выражения (3) формируется в соответствии с выражением [3]:

$$S_G(\omega_x, \omega_y) = \frac{\Delta_x \Delta_y}{4\pi^2} \sum_{q=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} \sum_{l=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} J(x, y) e^{-jq\omega_x \Delta_x} e^{-jl\omega_y \Delta_y} D(\omega_x, \omega_y), \quad (5)$$

где Δ_x — шаг дискретизации по оси X ;
 Δ_y — шаг дискретизации по оси Y .

Метод синтеза апертуры. Реализация данного метода основана на применении радиолокатора с синтезируемой апертурой (РСА), обеспечивающего двумерное угловое сканирование антенной системой в верхнем полупространстве. В результате обработки получаемых данных осуществляется фокусировка излучения в каждую точку нижнего полупространства. Последовательное сканирование точкой фокусировки позволяет восстанавливать трехмерное распределение неоднородностей под границей раздела сред. Принимаемый сигнал описывается выражением [3, 4]:

$$u_c(x, y) = \sum_{g=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{r=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} W_{C,g,r} f(x + g\Delta_x, y + r\Delta_y), \quad (6)$$

где W_C — весовая функция.

Алгоритм восстановления радиолокационного изображения имеет вид:

$$S_C(\omega_x, \omega_y) = \frac{\Delta_x \Delta_y}{4\pi^2} \sum_{q=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} \sum_{l=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} u_C(x, y) e^{-jq\omega_x \Delta_x} e^{-jl\omega_y \Delta_y}. \quad (7)$$

Однако применение последовательного сканирования точкой фокусировки требует больших вычислительных ресурсов и временных затрат, что существенно снижает эффективность применения такого метода при проведении работ в реальном масштабе времени.

В работе [5] рассмотрен быстрый метод восстановления распределения диэлектрических неоднородностей на основе приближения однократного рассеяния в предположении сильного преломления волн на границе раздела сред и метода синтеза апертуры. Принятые допущения в отношении сильно преломляющей среды обеспечивают возможность восстанавливать распределение неоднородностей путем фокусировки РСА на поверхность среды (операцией свертки) и обратного преобразования Фурье. Результаты применения данного метода [5] показывают, что эффективное применение данного метода возможно только на малой глубине (до 10 см). Такие результаты связаны с затуханием сигнала в среде и возрастанием методических погрешностей с увеличением глубины.

Томографический метод. Под томографией понимается реконструкция внутреннего содержания подповерхностных объектов. Радиолокационное (радиотомографическое) изображение, учитывающее распределение нормализованных токов поляризации, локализованных в объекте, представляет собой двумерное преобразование Фурье от рассеянного поля электромагнитной волны интенсивностью $J(x, y)$, а с учетом теоремы о смещении и характеристик заглубленного объекта формируется в соответствии с выражением [3]:

$$S_T(\omega_x, \omega_y) = \frac{\Delta_x \Delta_y}{4\pi^2} \sum_{g=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} \sum_{l=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} J(x, y, d_m, \varepsilon_m) e^{-jq\omega_x \Delta_x \sin(\theta_{ts})} e^{-jl\omega_y \Delta_y \cos(\theta_{ts})}, \quad (8)$$

где d_m — параметры мины, описывающие ее размеры и форму;

ε_m — диэлектрическая проницаемость мины;

θ_{ts} — корректирующая поправка.

Существенным недостатком пространственно-спектрального метода является низкая разрешающая способность по глубине и возможность получения только двумерного изображения. К достоинствам относится простота данного алгоритма.

Метод миграции. Метод миграции позволяет восстанавливать двухмерное (трехмерное) радиолокационное изображение [3]. Сбор информации об участке местности осуществляется с использованием сканирующей антенны [3]. Зарегистрированный сигнал имеет вид:

$$u_M(x, y) = \sum_{g=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} \sum_{r=-\frac{N-1}{2}}^{\frac{N-1}{2}} W_{Mg,r} f(x+g\Delta_x, y+r\Delta_y) \exp^{-i2\pi k \sqrt{(g\Delta_x)^2 + (r\Delta_y)^2}}, \quad (9)$$

где W_M — весовая функция;

k — волновое число, учитывающее распространение волны к рассеивателям и обратно.

Алгоритм восстановления радиолокационного изображения методом дальностной миграции может быть описан следующим выражением [3]:

$$S_M(\omega_x, \omega_y) = \frac{\Delta_x \Delta_y}{4\pi^2} \sum_{q=-\frac{K-1}{2}}^{\frac{K-1}{2}} \sum_{l=-\frac{L-1}{2}}^{\frac{L-1}{2}} u_M(x, y) e^{-jq\omega_x \Delta_x} e^{-jl\omega_y \Delta_y}. \quad (10)$$

Недостатками данного метода являются низкая разрешающая способность по глубине (однако выше, чем у пространственно-спектрального метода) и сложность обработки данным подобным методом.

Адаптивный метод спектрального анализа. Основываясь на методе максимального правдоподобия, предложенным Дж. Кейпоном [10–12] для сильно коррелированных сигналов, к которым можно отнести сигналы, отраженные от заглубленных объектов, достигается возможность реализовать эффект «сверхразрешения». В случае формирования радиолокационного изображения, когда сбор информации осуществляется с использованием сканирующей антенной системы [1], соответствующая максимально достоверная оценка радиолокационного изображения наблюдаемого объекта формируется за счет нахождения матрицы комплексных синусоид S_C , благодаря которой результат обработки отраженного сигнала имеет максимальную мощность. Дополнительно в целях компенсации существующих искажений

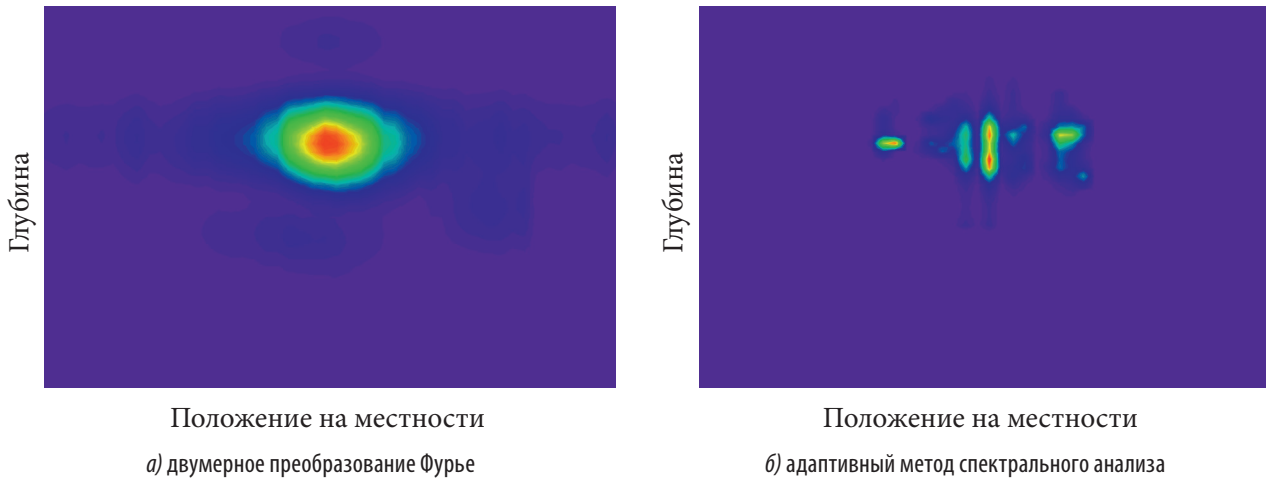


Рис. 2. Радиолокационное изображение заглубленного объекта, полученное с помощью:
 а) двумерного преобразования Фурье;
 б) адаптивного метода спектрального анализа

принятый сигнал $f(t_1, t_2)$ взвешивается весовой функцией W_A , параметры которой определяются исходя из условий сканирования и свойств окружающей среды, в результате аналогично выражению (6) формируется сигнал $u_A(t_1, t_2)$. Алгоритм обработки в этом случае имеет вид:

$$S_A(\omega_1, \omega_2) = \left[\frac{\Delta_1 \Delta_2}{4\pi^2} \sum_{q=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{S}_c^{<l>T} \mathbf{Q}^q \mathbf{S}_c^{<l>} \right]^{-1}, \quad (11)$$

где $\mathbf{Q} = \mathbf{R}^{-1}$ — обратная блочная корреляционная матрица принятого сигнала $u_A(t_1, t_2)$;
 \mathbf{Q}^q — квадратная матрица, q -й блок блочной матрицы \mathbf{Q} ;
 \mathbf{S}_c — матрица комплексных частот (синусоид);
 $<l>$ — оператор выделения столбца матрицы;
 T — оператор транспонирования.

В качестве примера на рис. 2 приведены радиолокационные изображения заглубленного объекта (объект в форме диска диаметром порядка 30 см и толщиной 9 см), полученные в условиях ($P_0 = 50$ мВт, $\lambda_{cp} = 0,2$ м, $\Delta f_M = 1$ ГГц, $T_0 = 10,23$ мкс, $\epsilon_s = 5$, $r_s \approx 0,28$ м, $r_m \approx 0,38$ м) с учетом алгоритмов обработки, приведенных в [1].

Выводы.

Выбор метода обработки зависит от особенностей решаемой задачи. При решении задачи обнаружения на малой глубине наряду с прочими целесообразно использовать относительно

быстрый метод, основанный на синтезе апертуры антенны. При этом обеспечивается разрешающая способность до сантиметра. Однако при увеличении глубины зондирования данный метод становится малоэффективным ввиду больших потерь в грунте на высоких частотах (порядка 10 ГГц). В то же время методы голографии и дальностной миграции позволяют восстанавливать радиолокационное изображение объектов, находящихся на большой глубине. Эти методы характеризуются низкой разрешающей способностью для случая формирования радиолокационного изображения в реальном масштабе времени. Для повышения разрешающей способности без повышения частоты зондирующего сигнала и существенного увеличения вычислительных затрат появляется необходимость комплексирования методов восстановления с эффектом «сверхразрешения» по глубине.

Таким образом, для мобильных компактных радиолокаторов подповерхностного зондирования, учитывая практический опыт [1], целесообразно выбрать метод максимального правдоподобия как обеспечивающего формирование наиболее качественного радиолокационного изображения в реальном масштабе времени.

Литература:

1. Чугай, К. Н. Современный подход к обработке сложных сигналов в системе подповерхностного зондирования / К. Н. Чугай, С. А. Савенко // Наука и военная безопасность. — 2015. — № 1. — С. 39–43.

2. Финкельштейн, М. И. Радиолокация слоистых земных покровов / М. И. Финкельштейн [и др.]; под ред. М. И. Финкельштейна. — М.: Сов. радио, 1977. — 176 с.
3. Вопросы подповерхностной локации. Коллективная монография / под ред. А. Ю. Гринева. — М.: Радиотехника, 2005. — 416 с.
4. Суханов, Д. Я. Метод наклонной фокусировки в подповерхностной радиолокации / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Журнал технической физики. — 2006. — Т. 76, вып. 7. — С. 64–68.
5. Суханов, Д. Я. Многокурсовое зондирование в подповерхностной радиотомографии и определение показателя преломления фоновой среды / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Журнал радиоэлектроники. — Электронные данные. — 2006. — № 1.
6. Финкельштейн, М. И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М. И. Финкельштейн, В. А. Кутев, В. П. Золотарев / под ред. М. И. Финкельштейна. — М.: Недра, 1986. — 128 с.
7. Семенчук, В. Е. Реконструктивная интерпретация данных подповерхностного зондирования / В. Е. Семенчук, С. П. Лукьянов, А. С. Карауш, Р. В. Потемин // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов четвертой МК. — Воронеж: 1998. — С. 52–64.
8. Гайкович, К. П. Микроволновая подповерхностная голография сплошных диэлектрических объектов / К. П. Гайкович, Е. С. Максимович, В. А. Бадеев // Журнал радиоэлектроники. — Электронные данные. — 2012. — № 1.
9. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях / Ж. Макс. — М.: Мир, 1983. — Т. 1. — 312 с.
10. Гринкевич, А. В. Применение высокоразрешающих адаптивных методов спектрального анализа для получения глубинного портрета зондируемого участка поверхности / А. В. Гринкевич // Доклады БГУИР. — 2006. — № 3. — С. 32–40.
11. Гейбриел, У. Ф. Спектральный анализ и методы сверхразрешения с использованием адаптивных решеток / У. Ф. Гейбриел // ТИИЭР, 1980. — Т. 68. — № 6. — С. 19–31.
12. Янушкевич, В. Ф. Сверхразрешение источников излучения на основе метода Кейпона / В. Ф. Янушкевич, А. О. Бездель // Вестник Полоцкого государственного университета. — 2013. — № 12. — С. 34–38.

УДК 657.922

ПРИНЦИПЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА СТОИМОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА ПРИМЕРЕ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ

IDENTIFICATION PRINCIPLES AND CALCULATING METHODS OF MATERIAL VALUE THROUGH THE EXAMPLE OF CABLE PRODUCTS

П. В. Ануфриев,

гл. специалист по экспертизе и сертификации службы экспертизы и сертификации Белорусской торгово-промышленной палаты, аспирант БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь

У. В. Махитка,

специалист по оценке ООО «Центр оценки», магистрант БНТУ, г. Минск, Республика Беларусь

P. Anufryieu,

Chief specialist on expertise and certification of expertise service and certification of Belarusian Chamber of Commerce and Industry, postgraduate of the BNTU, Minsk, Republic of Belarus

U. Makhitka,

Value analyst of "Assesment center" LLC, Master's degree student of the BNTU, Minsk, Republic of Belarus

Дата поступления в редакцию — 24.10.2017 г.

В статье описаны принципы идентификации кабельной продукции, в том числе общие правила маркировки и методики определения геометрических параметров кабеля, даны определения основным терминам и изучено влияние технического состояния кабеля на вид определяемой стоимости. Материал может быть полезен при проведении товарных и судебных экспертиз, идентификации при выявлении, постановке на баланс, дальнейшем учете в хозяйственной деятельности, определении рыночной и скраповой стоимости кабеля.

The article describes the principles of identification of cable products, including general rules of marking and methods of determining the geometric parameters of cable, defines the main terms and examines the impact of the technical condition of cable