

УДК621.371.3

DOI: 10.34046/aumsuomt101/11

МЕТОДИКА ПО ОЦЕНКЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ РАДИОСИГНАЛА BLUETOOTH ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СИГНАЛА СКВОЗЬ СУДОВЫЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПЕРЕБОРКИ

*М.С. Каменев, аспирант**Д.А. Акмайкин, кандидат физико-математических наук, доцент**А.В. Гамс, аспирант*

Спасение пассажиров на судах является актуальной и в тоже время сложной проблемой. Поиск людей в закрытом помещении со сложной инфраструктурой требует больших усилий. Решением этой проблемы видится создание системы внутрисудовой навигации на основе Bluetooth технологии, в качестве опорных станций которой предлагается использовать сигнал Bluetooth маяков с излучением сигнала на частоте 2,4 ГГц вертикальной поляризации. Данная статья посвящена построению методики оценки затухания радиосигнала Bluetoothсквозь судовые переборки. Рассматриваются существующие методики оценки ослабления сигнала при прохождении через препятствия различной толщины и структуры. Учитывалось расстояние между передатчиком и приемником сигнала, углами их взаимного расположения относительно препятствия. В работе проведен анализ применимости и точности различных методик, а также сравнение расчетных результатов с практическими измерениями на судне. Эксперимент показал уровень затухания сигнала от Bluetooth маяков до приемника. Был проведен анализ совпадения уровня затухания экспериментального сигнала в сравнении с рассчитанным по методике, предложенной в статье. Кроме того, показано, что можно с помощью теоретических расчетов оценить предполагаемый уровень затухания сигнала в зависимости от свойств и параметров судовых переборок, а также спрогнозировать расположение сети приемников Bluetoothсигнала на судне и разрешить вопрос о необходимости установки дополнительных Bluetooth-маяков или её отсутствии для стабильной работы системы внутрисудового позиционирования.

Ключевые слова: Пассажирский транспорт, эвакуация, спасение пострадавших, навигация в помещениях, Bluetooth, радиомаяк, препятствия, радиопроницаемость, распространение сигнала, ослабление радиосигнала

METHOD FOR ESTIMATING THE POWER LOSS OF THE BLUETOOTH RADIO SIGNAL WHEN THE SIGNAL PASSES THROUGH THE SHIP'S METAL BULKHEADS

M.S. Kamenev, D. A. Akmaikin, A. V. Gams

Rescue of passengers on ships is an urgent and at the same time complex problem. Finding people in an enclosed space with complex infrastructure takes a lot of effort. The solution to this problem is the creation of an on-board navigation system based on Bluetooth technology, as reference stations of which it is proposed to use the signal of Bluetooth beacons with the emission of a signal at a frequency of 2.4 GHz of vertical polarization. This article is devoted to the construction of a methodology for assessing the attenuation of a Bluetooth radio signal through ship's bulkheads. Existing techniques for assessing signal attenuation when passing through obstacles of various thicknesses and structures are considered. The distance between the transmitter and receiver of the signal and the angles of their relative position relative to the obstacle were taken into account. The paper analyzes the applicability and accuracy of various techniques, as well as compares the calculated results with practical measurements on board. The experiment showed the attenuation level of the signal from the Bluetooth beacons to the receiver. An analysis was made of the coincidence of the attenuation level of the experimental signal in comparison with that calculated by the method proposed in the article. In addition, it was shown that it is possible, using theoretical calculations, to estimate the expected level of signal attenuation depending on the properties and parameters of ship bulkheads, as well as to predict the location of the network of Bluetooth signal receivers on the ship and resolve the issue of the need to install additional Bluetooth beacons or its absence for stable operation of the on-board positioning system.

Key words: Passenger transport, evacuation, victim rescue, indoor navigation, Bluetooth, radio beacon, obstacles, radio transmission, signal propagation, radio signal attenuation.

Введение

На пассажирском транспорте регулярно происходит множество аварий различного характера: пожары, посадки на мель, столкновения, потеря остойчивости, выход из строя оборудования и прочее. Но, несмотря на различность вышеуказанных причин, зачастую это влечет за собой одни и те же результаты: гибель судна, пассажиров и членов экипажа [1]. И, хотя части послед-

ствий можно бы было избежать благодаря средствам, а также различным способам защиты, охраны, предупреждения и спасения людей, опасность возникновения аварии не исчезает. Поэтому крайне важно в кратчайший срок организовать эвакуацию, найти и спасти пострадавших, но на огромных пассажирских морских лайнерах это практически невозможно обеспечить без данных о местоположении пострадавших, а также чётким

указаниям каждому эвакуирующемуся пассажиру. Следовательно, появляется явная необходимость определения местоположения, количества, а также наличия автоматизированной системы получения персональных эвакуационных указаний. Поставленная задача может быть решена при помощи внутрисудовых систем позиционирования и идентификации. В качестве средства определения местоположения и идентификации для такой системы в работе предлагается использование Bluetooth технологии [2].

В связи с тем, внутрисудовые переборки состоят из металла разных толщин в зависимости от класса огнестойчивости и водонепроницаемости. Соответственно проникаемость радиосигнала через них будет существенно различаться и, следовательно, появляется необходимость оценки достаточности мощности передачи полезного сигнала Bluetooth-маяком, являющимся одной из составляющих частей системы внутрисудового позиционирования [3].

Теоретическая часть

Величина сигнала зависит как от расстояния до источника сигнала, так и от его частоты [4]. Существует ряд моделей для оценки ослабления Bluetooth-сигнала при распространении внутри помещения [5].

В работе предложена модель, в которой потери на трассе определяются соотношением

$$L(r) = L(r_0) + 10n \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + X_\sigma,$$

где L – ослабление сигнала, n – коэффициент ослабления при прохождении волны через однородную среду; X_σ – случайная величина, подчиняющаяся нормальному распределению с дисперсией σ , r – расстояние от передатчика к приемнику, r_0 – эталонное расстояние.

В других моделях [6] потери на трассе определяются соотношением

$$L(d) \approx L_p \left(\frac{d}{d_0}\right)^{-n},$$

где L_p – потери при распространении на трассе прямой видимости длиной d_0 ; d – расстояние между передатчиком и приемником.

В некоторых моделях значение n является постоянной величиной, в других – зависит от расстояния. Например, для расстояний до 10 м $n = 2$, в интервале расстояний $10 < d < 20$ м $n = 3$, для $20 < d < 40$ м $n = 6$, при $d > 40$ м $n = 12$.

Однако названные модели не учитывают ослабления сигнала из-за частичного отражения при углах падения, отличных от нормального [7], и затухания внутри препятствия с ненулевой тол-

щиной и некоторой диэлектрической проницаемостью ϵ . Это может привести к существенной ошибке в оценке уровня сигнала, особенно при достаточно больших углах падения и толщине препятствий [8].

Общеизвестным способом расчета величины затухания сигнала является следующая формула:

$$L = 20 \lg\left(\frac{4\pi d_0 f}{c}\right) + 10k \lg\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (1)$$

где k – коэффициент ослабления, который, в частности, равен 2 для открытого пространства; d – расстояние от точки доступа до точки передачи; f – частота сигнала; c – скорость света; d_0 – эталонное расстояние, равное 1 м. Из формулы (1) непосредственно вытекает, что с возрастанием частоты передаваемого сигнала увеличивается его затухание.

При наличии на пути распространения сигнала препятствия конечной толщины d его траектория изменяется: вместо прямой она становится ломаной, как показано на рис. 1.

Источник сигнала находится в точке O_1 на расстоянии h_1 от препятствия, приемник – в точке O_2 на расстоянии h_2 от препятствия. Толщина препятствия составляет t_1 . Сигнал, падая под углом α к нормали препятствия, проходит расстояние H_1 . Далее сигнал, преломляясь на границе раздела двух сред, распространяется под углом β к нормали препятствия и в препятствии преодолевает расстояние T_1 . После повторного преломления на границе двух сред сигнал, распространяясь в пространстве под углом α к нормали препятствия, проходит расстояние H_2 . Соответственно смещение сигнала по отношению к нормальному падению составит H .

Общее затухание в точке O_2 будет определяться следующей формулой:

$$L = L_{H_1} + L_0 + L_{H_2},$$

где L_{H_1} и L_{H_2} – затухание, вызванное прохождением участка открытого пространства H_1 и H_2 соответственно; L_0 – затухание, связанное с прохождением сигнала через препятствие толщиной T_1 .

Таким образом, авторами предложена формула оценки затухания сигнала при прохождении препятствия:

$$L = 20 \lg\left(\frac{4\pi d_0 f}{c}\right) + 20 \lg\left(\frac{H_1 + H_2 + T_1^{0.5k_m}}{d_0}\right),$$

где k_m – коэффициент ослабления материала стены.

Другим важным моментом при прохождении сигнала через препятствие выступает учет потери мощности из-за отражения на границах, зависящей от угла падения [9].

Большинство антенн, используемых в Bluetooth, являются антеннами с линейной поляризацией, горизонтальной или вертикальной. Чаще применяется вертикальная поляризация [10]. Таким образом, с учетом вертикальной поляризации волн затухания L_{O_1} и L_{O_2} вызванные отражением части волны от границы двух сред будут определяться по формулам:

$$L_{O_1} = 10 \lg \left(\frac{P}{P_{np}} \right) = 10 \lg \left(\frac{(n_1 \cos \beta + n_2 \cos \alpha)^2}{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta} \right)$$

$$L_{O_2} = 10 \lg \left(\frac{P}{P_{np}} \right) = 10 \lg \left(\frac{(n_2 \cos \beta + n_1 \cos \alpha)^2}{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta} \right)$$

где P и P_{np} – мощность сигнала до отражения от границы двух сред и после прохождения границы двух сред; n_1 и n_2 – показатели преломления среды 1 и среды 2 соответственно.

Таким образом, общее затухание сигнала при прохождении расстояния от передатчика к приемнику будет определяться формулой

$$L = 20 \lg \left(\frac{4\pi d_0 f}{c} \right) + 20 \lg \left(\frac{H_1 + H_2 + T_1^{0.5k_m}}{d_0} \right) + 20 \lg \left(\frac{(n_1 \cos \beta + n_2 \cos \alpha)^2}{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta} \right) \quad (2)$$

В случае если количество стен будет k и материал стен везде одинаков, формула (2) принимает вид:

$$L = 20 \lg \left(\frac{4\pi d_0 f}{c} \right) + 20 \lg \left(\frac{H_1 + H_2 + T_1^{0.5k_m}}{d_0} \right) + 20 \lg \left(\frac{(n_1 \cos \beta + n_2 \cos \alpha)^2}{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta} \right) \sum_{i=1}^k i \quad (3)$$

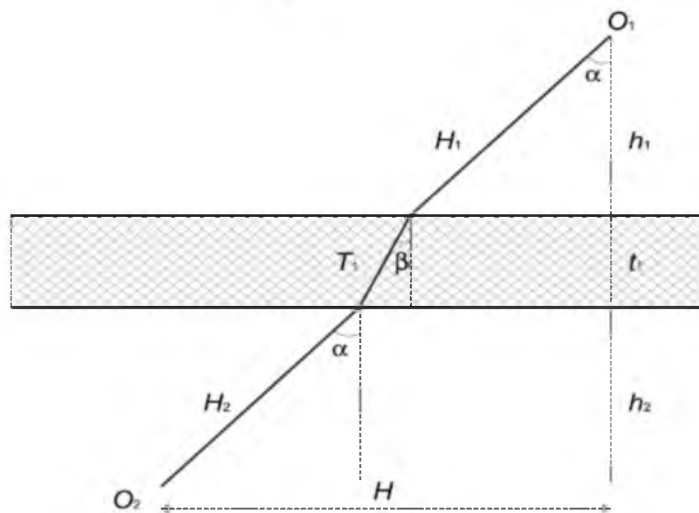


Рисунок 1 - Траектория распространения Bluetooth-сигнала через препятствие

Соотношение между углом падения волны и углом преломления (рис. 1) определяется следующим выражением:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

В диапазоне частот 2÷5 ГГц действительная часть диэлектрической проницаемости судового

металла меняется слабо и составляет $\epsilon \approx 3,5 \div 4,0$, поэтому при расчетах можно брать $n_1 = 1$ (воздух), $n_2 = 1,9 \div 2,0$ (металлическая переборка) [11].

Таким образом, формула (4) принимает вид $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = 2$

Формула (3) не учитывает многократного переотражения волн на границах раздела. Для оценки его влияния воспользуемся формулой для коэффициента прохождения при прохождении D электромагнитной волны через плоский слой толщиной T_1 [6, 7]:

$$D = \frac{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta \cos(k_0 T_1 (n_1 - n_2) \cos \alpha)}{(n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta)^2 - (n_1 \cos \alpha - n_2 \cos \beta)^2 \cos(2k_0 T_1 n_2 \cos \beta)}$$

где k_0 – волновое число, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$

Исходя из вышесказанного, ослабление волны при прохождении стены толщиной T_1 будет определяться как

$$L = 10 \lg \left(\frac{(n_1 \cos \alpha + n_2 \cos \beta)^2 - (n_1 \cos \alpha f - n_2 \cos \beta)^2 \cos(2k_0 T_1 n_2 \cos \beta)}{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta \cos(k_0 T_1 (n_1 - n_2) \cos \alpha)} \right)^2 \quad (5)$$

Для сравнения проведем расчет зависимости ослабления электромагнитной волны с частотой 2,4 ГГц при прохождении плоского слоя от угла падения при разных значениях толщины слоя по формулам (3) и (5), результаты которого приведены на рис. 2.

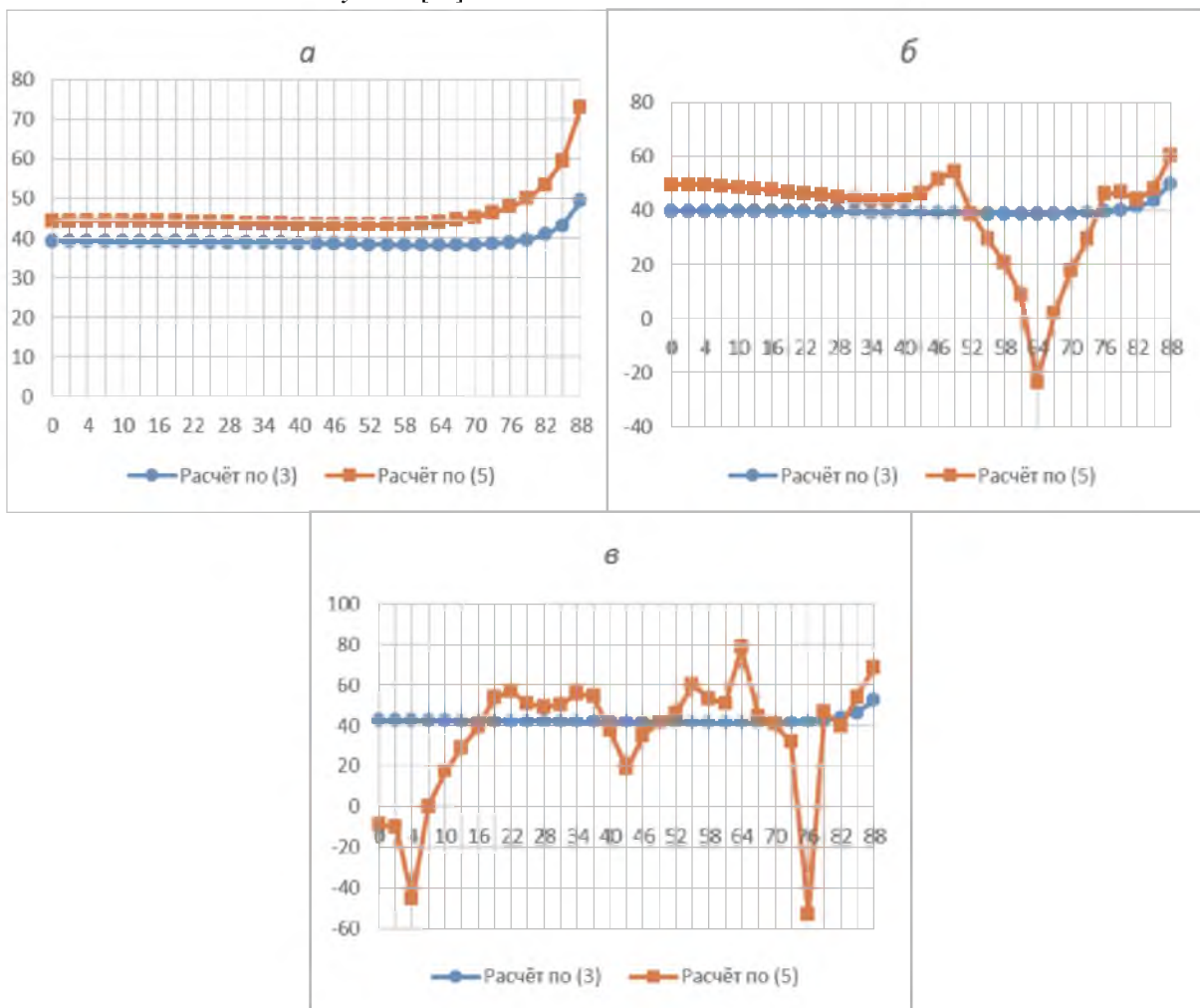
Из рис. 2 видно, что при уменьшении толщины препятствия разница в результатах вычисления по формулам (3) и (5) исчезает. Это связано с тем, что формула (5) не учитывает ослабления волны при прохождении расстояния внутри препятствия, а дает точный его расчет при толщине препятствия, сравнимого с длиной волны [12]. Однако с возрастанием толщины препятствия больший вклад в затухание будет вносить ослабление при прохождении расстояния внутри препятствия, и соответственно при увеличении толщины препятствия формула (5) будет давать большую ошибку.

Таким образом, ослабление сигнала при распространении волны из точки O_1 в точку O_2 будет определяться следующей формулой

$$L = 20 \lg \left(\frac{4\pi d_0 f}{c} \right) + 20 \lg \left(\frac{(H_1 + H_2) / \cos \alpha + (t_1 / \cos \beta)^{0.5k_m}}{d_0} \right) + 20 \lg \left(\frac{(n_1 \cos \beta + n_2 \cos \alpha)^2}{4n_1 n_2 \cos \alpha \cos \beta} \right) \quad (6)$$

На рис. 2 видно, что переотражение радиоволны может ее как ослаблять (пики на графике), так и усиливать (провалы). Эффект ослабления происходит при определенных соотношениях между углом падения и частотой сигнала, изменение одного параметра при постоянном другом позволяет избежать пика затухания [13]. Так как

Bluetooth-маяки одновременно работают с несколькими частотными каналами [14], то при детектировании ослабления мощности радиосигнала происходит автоматическое переключение на другой канал, что позволяет избежать пика [15].



Толщина препятствий: 0,000071 м (а), 0,001 м (б) и 0,0036 м (в)

Рисунок 2 - Ослабление сигнала при прохождении препятствия

Эксперимент

Для оценки эффективности формулы (6) был проведен эксперимент по ослаблению Bluetooth-радиоволны. В точке O_1 располагалась Bluetooth-маяки, а в точке O_2 – приемник сигнала, как показано на рис. 3. Толщина переборки, через которую проходил сигнал, составляла 0,1 см. Далее измерялось ослабление сигнала при различных параметрах H_1 , H_2 , α . Результаты измерений приведены в табл. 1.

Из таблицы видно, что характер зависимости экспериментальных данных и данных, рассчитанных по формуле (6), одинаков.

Разность расчета по формуле (6) с экспериментом составляет не более 8 %. В то же время разность расчета по формуле (5) с экспериментом доходит до 20 %. В нашем случае ослабление сигнала вычисляется в децибелах с учетом того, что это степенная зависимость, погрешность в 20 % даст очень большую ошибку при расчете мощности сигнала в точке.

Таким образом, в дальнейшем следует использовать формулу (6) для оценки ослабления радиосигнала при прохождении препятствия.

Таблица 1 - Результаты измерений ослабления сигнала и погрешности вычислений

α , град	Измеренное ослабление L, дБ	Рассчитанное по (3) L, дБ	Относительная разность рассчитанных данных и измерений	Рассчитанное по (5) L, дБ	Относительная разность рассчитанных данных и измерений
$H_1 = 0,6\text{м}, H_2 = 1,1\text{м}$					
0	46	45,94163	0,001	49,332147	0,072
15,2	46	46,16853	0,004	48,154117	0,047
21,5	46	46,40278	0,009	47,646701	0,036
24	47	46,52089	0,01	47,59363	0,013
31,5	47	46,97095	0,001	48,372039	0,029
39	48	47,58981	0,009	51,814288	0,079
$H_1 = 0,6\text{м}, H_2 = 0,2\text{м}$					
0	40	39,68175	0,008	42,78497	0,07
29	40	40,52079	0,013	41,36819	0,034
39	42	41,28584	0,017	45,26711	0,078
44	43	41,80314	0,028	51,65659	0,201
55	44	43,41623	0,013	47,46928	0,079
66	46	46,19512	0,004	46,28881	0,006
$H_1 = 0,025\text{м}, H_2 = 0,2\text{м}$					
0	34	29,93065	0,12	31,76682	0,066
59	37	33,97257	0,082	34,07904	0,079
63	37	34,91843	0,056	33,97211	0,082
71	39	37,75156	0,032	40,85897	0,048
79	46	43,34925	0,058	56,83216	0,235
82	49	47,21011	0,037	53,27758	0,087
$H_1 = 0,025\text{м}, H_2 = 1,1\text{м}$					
0	22	42,4874	0,012	45,74622	0,089
22	22	42,96166	0,023	44,04128	0,049
29	23	43,33365	0,008	44,32944	0,031
33	23	43,60495	0,014	45,18668	0,051
43	24	44,51658	0,012	52,76162	0,199
51	25	45,5739	0,013	56,95515	0,266

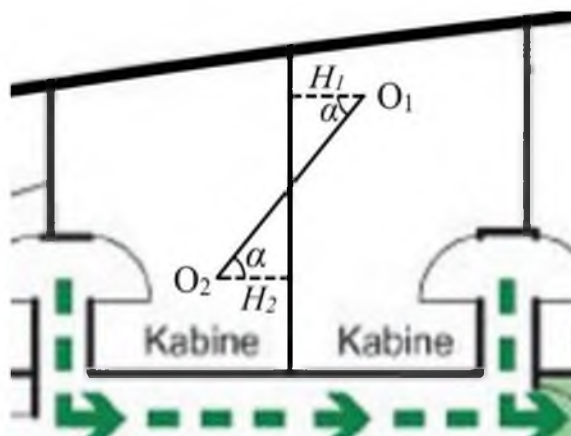


Рисунок 3 – Схема проведения эксперимента

Заключение

Можно сделать вывод, что предложенная формула учитывает, как эффект затухания при распространении сигнала на расстояние, так и эффект отражения на границах препятствия. Ее использование позволяет получить результаты, находящиеся в пределах 3÷5 % от измеряемых. Формула может применяться для быстрой оценки ослабления мощности Bluetooth-сигнала при распространении внутрисудовых помещений, что, в свою очередь, помогает оперативно разрешить вопрос о необходимости установки дополнительных Bluetooth-маяков или её отсутствии для стабильной работы системы внутрисудового позиционирования.

Литература

1. Каменев М.С. Практический эксперимент по отработке снятия первичных данных для составления радиокарты помещения // Морские исследования на Дальнем Востоке: сборник докл. Всерос. конф. (Владивосток, 14-15 марта 2019 г.). – Владивосток, 2019.
2. Гавриленко В. Г., Япшов В. А. Передача информации по беспроводным сетям в условиях пересеченной местности. – Н. Новгород, 2007. – С. 112.
3. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. IEEE press. 2001.
4. Rodd S. F., Math M.M. // J. of Computer Applications. 2009. Vol. 2. № 2. April – June. P. 24.
5. Bluetooth technology. URL: <https://www.bluetooth.com/> (дата обращения 11.08.2021)
6. Wang, Y.; Yang, X.; Zhao, Y.; Liu, Y.; Cuthbert, L. Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods. In Proceedings of the 2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 11–14 January 2013; pp. 837–842.
7. Danis, F.S.; Cemgil, A.T. Model-based localization and tracking using bluetooth low-energy beacons. Sensors (Switzerland) 2017, 17, 2484.
8. Рощан П., Лизри Д. Основы построения беспроводных локальных сетей стандарта 802.11. – М., 2004. – С. 304.
9. Wu, T.; Xia, H.; Liu, S.; Qiao, Y. Probability-based indoor positioning algorithm using beacon sensors (Switzerland) 2019, 19, 5226.
10. Cantón Paterna, V.; Calveras Augé, A.; Paradells Aspas, J.; Pérez Bullones, M.A. A Bluetooth Low-Energy Indoor Positioning System with Channel Diversity, Weighted Trilateration and Kalman Filtering. Sensors (Basel) 2017, 17, 2927.
11. Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 4. Оптика. – М., 1980. – С. 418.
12. Rozum, S.; Sebesta, J. SIMO RSS measurement in Bluetooth low power indoor positioning system. In Proceedings of the 2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Prague, Czech Republic, 19–20 April 2018; Volume 1401, pp. 1–5.
13. Бернинг П.Х. // Физика тонких пленок: в 2 т. / под ред. Г. Хасса. – М., 1967. Т. 1. – С. 91.
14. Bluetooth SIG, I. Mesh Networking Specifications. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications/> (дата обращения 13.08.2021)
15. Zhuang, Y.; Yang, J.; Li, Y.; Qi, L.; El-Sheimy, N. Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. Sensors (Switzerland) 2016, 16, 596.

References

1. Kamenev M.S. Prakticheskiyeksperimentpootrabotkesnyatiyapervichnykhdannyyhdlyasostavleniyaradiokartypomeshcheniya // MorskiesissledovaniyanDal'nemVostoke: sbomikdokl. Vseros.konf. (Vladivostok, 14—15 marta 2019 g.). – Vladivostok 2019.
2. Gavrilenko V. G., Yashnov V. A. Peredachainformatsiipobesprovodnymsetyam v usloviyakhperesechennoymestnosti. N. Novgorod, 2007. S. 112.
3. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. IEEE press. 2001.
4. Rodd S. F., Math M.M. // J. of Computer Applications. 2009. Vol. 2. № 2. April – June. R. 24.
5. Bluetooth technology. URL: <https://www.bluetooth.com/> (data obrashcheniya 11.08.2021)
6. Wang, Y.; Yang, X.; Zhao, Y.; Liu, Y.; Cuthbert, L. Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods. In Proceedings of the 2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 11–14 January 2013; pp. 837–842.
7. Danis, F.S.; Cemgil, A.T. Model-based localization and tracking using bluetooth low-energy beacons. Sensors (Switzerland) 2017, 17, 2484.
8. Roshan P., Lieri D. Osnovypostroyeniya besprovodnykhlokal'nykhseteystandarta 802.11. M., 2004. S. 304.
9. Wu, T.; Xia, H.; Liu, S.; Qiao, Y. Probability-based indoor positioning algorithm using beacon sensors (Switzerland) 2019, 19, 5226.
10. Cantón Paterna, V.; Calveras Augé, A.; Paradells Aspas, J.; Pérez Bullones, M.A. A Bluetooth Low-Energy Indoor Positioning System with Channel Diversity, Weighted Trilateration and Kalman Filtering. Sensors (Basel) 2017, 17, 2927.
11. Sivukhin D.V. Obshchiy kurs fiziki: v 5 t. T. 4. Optika. M., 1980. S. 418.
12. Rozum, S.; Sebesta, J. SIMO RSS measurement in Bluetooth low power indoor position-ingsystem. In Proceedings of the 2018 28th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), Prague, Czech Republic, 19–20 April 2018; Volume 1401, pp. 1–5.
13. Berning P.Kh. // Fizikatonkikhplenek: v 2 t. / pod red. G. Khassa. M., 1967. T. 1. S. 91.
14. Bluetooth SIG, I. Mesh Networking Specifications. URL: <https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications/> (data obrashcheniya 13.08.2021)
15. Zhuang, Y.; Yang, J.; Li, Y.; Qi, L.; El-Sheimy, N. Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. Sensors (Switzerland) 2016, 16, 596.