

УДК 004.738.2

*Стаття присвячена виявленню залежності впливу лісових масивів на дальність зв'язку в бездротових сенсорних мережах ZigBee. Обчислено згасання радіосигналу в умовах лісового масиву*

*Ключові слова: ZigBee, сенсорні мережі, дальність зв'язку, лісовий масив*

*Стаття посвящена выявлению зависимости влияния лесных массивов на дальность связи в беспроводных сенсорных сетях ZigBee. Вычислено затухание радиосигнала в условиях лесного массива*

*Ключевые слова: ZigBee, сенсорные сети, дальность связи, лесной массив*

*Article is devoted to the influence of forest depending on distance communication in wireless sensor networks, ZigBee. Calculate the damping signal in forest*

*Key words: ZigBee, sensor networks, communication range, forest*

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ НА ДАЛЬНОСТЬ СВЯЗИ В СЕТЯХ ZIGBEE

**П. В. Галкин**

Аспирант, ассистент\*

Контактный тел.: (057) 702-14-94, 050-874-83-23

E-mail: galkinletter@ukr.net

**Л. В. Головкина**

Доцент\*

Контактный тел.: (057) 702-14-94

E-mail: glvvlg@ukr.net

**А. С. Борисенко**

\*Кафедра проектирования и эксплуатации электронных аппаратов

Харьковский национальный университет

радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61066

Контактный тел.: (057) 702-14-94

E-mail: lubimaja\_zajka@bk.ru

## 1. Введение

Сегодня чрезвычайно актуально внедрение современных беспроводных сенсорных сетей в системы промышленной автоматизации и систем интеллектуального дома, которое за счет комплекса программно-аппаратных средств информационно-коммутиционной среды приведет к значительной эффективности их функционирования и надежности. Использование беспроводных технологий предполагает гибкое и быстрое изменение всей сети. Надежность работы беспроводных сенсорных сетей ZigBee в значительной степени зависит не только от конфигурации самой сети (ее топологии и возможности самоорганизации), но и особенностей качества связи на физическом уровне, которое значительно колеблется в зависимости от условий эксплуатации.

Сети ZigBee развертываются в различных условиях, а производители указывают дальность действия приемопередатчиков для условий открытого пространства, поэтому необходимо исследовать дальность связи в реальных условиях. Для достижения этой цели были проведены исследования по определению влияния лиственного лесного массива на дальность связи.

## 2. Постановка задачи исследования

Ранее многочисленные исследования характеристик маломощных беспроводных каналов связи показали, что соединения между узлами асимметричны, т.е. вероятность успешного приема узлом А пакета от узла В не равна вероятности успешной передачи в обратном направлении. Такие изменения обусловлены влиянием эффектов многолучевого распространения сигналов, а причиной асимметрии является разброс выходной мощности передатчиков и уровня собственных шумов приемников из-за технологических особенностей аппаратной реализации узлов.

Часто используемая модель основана на приведенных в работе [1] выражениях, аналитически описывающих эти эффекты, и предназначенная для сетей ZigBee, которые эксплуатируются внутри помещений, а не на открытом пространстве в условиях прямой видимости между узлами или в лесных массивах.

Модель логарифмически-нормального распределения потерь в тракте имеет вид

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + N(0, \sigma_{ch}^2) = \overline{PL}(d) + N(0, \sigma_{ch}^2), (1)$$

где  $d$  – расстояние между передатчиком и приемником (м);

$d_0$  – эталонное расстояние (м);  $\alpha$  – показатель степени потерь в тракте;

$N(0, \sigma_{ch}^2)$  – случайная гауссова переменная с нулевым средним и дисперсией  $\sigma_{ch}^2$ , дБ.

В модели не учитывается мобильность узлов (они неподвижны), и динамика объектов окружения, а также предполагается, что все соединения между узлами имеют одинаковое затухание на эталонном расстоянии  $PL(d_0)$  и показатель степени потерь в тракте  $\alpha$ .

При фиксированном расстоянии  $d$  соединения имеют равные средние потери  $\overline{PL}(d)$  и могут отличаться между собой только значением случайной величины  $N(0, \sigma_{ch}^2)$ , отражающей влияние эффектов замирания. При этом затухание между каждой парой узлов предполагается постоянным во времени.

Разброс значений выходной мощности и уровня шумов приемо-передатчиков описывается с помощью нормального распределения. Тогда при расстоянии  $d$  между передатчиком и приемником отношение сигнал-шум на входе приемника равно

$$\gamma(d) = N(\overline{P}_t, \sigma_t^2) - PL(d) - N(\overline{P}_n, \sigma_n^2) \text{ [дБ]}, (2)$$

где  $\overline{P}_t$  – средняя (номинальная) выходная мощность передатчика, дБм;  $\sigma_t^2$  – дисперсия выходной мощности;  $\overline{P}_n$  – средний (номинальный) уровень шумов приемника, дБм;  $\sigma_n^2$  – дисперсия уровня шумов.

Для упрощения модели принимается, что уровень шумов определяется только тепловым шумом (при этом температура постоянна) и особенностями аппаратной реализации конкретного узла. Учитывая независимость случайных переменных  $N(\overline{P}_t, \sigma_t^2)$ ,  $N(\overline{P}_n, \sigma_n^2)$  и  $N(0, \sigma_{ch}^2)$  выражения (1) и (2) приводят к модели

$$\gamma(d) = \overline{P}_t - \overline{PL}(d) - \overline{P}_n + N(0, \sigma^2), \text{ дБ}, (3)$$

где  $\sigma^2 = \sigma_t^2 + \sigma_n^2 + \sigma_{ch}^2$ .

Последнее слагаемое в формуле (3) отражает случайную составляющую, вызванную как параметрами окружающей среды, так и аппаратными особенностями узла, и характеризуется общей дисперсией отношения сигнал-шум  $\sigma^2$ .

Для определения в реальных условиях дальности надежной связи следует воспользоваться другим общеизвестным подходом [2, 3]. Мощность полезного сигнала в точке приема определяется выражением

$$P_{\text{прм}} = (P_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прд}} \cdot G_{\text{прм}} \cdot \lambda^2) / ((4\pi d)^2 \cdot L_{\text{доп}} \cdot Z) (4)$$

Это же выражение в децибелах имеет вид

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{прд}} + G_{\text{прд}} + G_{\text{прм}} + 20 \lg \lambda - 20 \lg(4\pi) - 20 \lg d - L_{\text{доп}} - Z_3$$

В этих выражениях используются следующие параметры радиолинии:

$P_{\text{прд}}$  – выходная мощность передатчика (в дБ);  
 $G_{\text{прд}}$  и  $G_{\text{прм}}$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, коэффициенты усиления типовых антенн имеют значения от 2 до 12 дБ и выше;  
 $\lambda$  – длина волны;

$d$  – дальность передачи;

$L_{\text{доп}}$  – дополнительные потери, обусловленные целым комплексом причин, включая ослабление сигнала в соединителях, обычно полагают  $L_{\text{доп}} = 5-10$  дБ;

$Z_3$  – запас помехоустойчивости к внешним помехам, величина которого определяется электромагнитной обстановкой в районе размещения, задается в пределах от 5 до 15 дБ.

Принимая во внимание, что потери в свободном пространстве определены для данной длины волны  $\lambda$  и расстояния  $d$  при постоянном и известном значении коэффициентов усиления передающей и приемной антенн, пренебрегая потерями в соединителях (не более 0,5 дБ), обозначив затухание радиосигнала в листве, стволах, ветвях лесных массивов как  $Z$ , получим мощность полезного сигнала в точке приема,:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{прд}} + G_{\text{прд}} + G_{\text{прм}} - 20 \lg(\lambda / 4\pi d) - Z$$

Наибольший интерес вызывает исследование реального уровня полезного сигнала в точке приема и вычисление затухания радиосигнала  $Z$  за счет лесного массива. Если провести измерения при всех принятых ранее условиях, но в «свободном пространстве», то результирующее ослабление сигнала можно определить в виде:

$$Z = P_{\text{прм1}} - P_{\text{прм2}}, (5)$$

где  $P_{\text{прм1}}$  и  $P_{\text{прм2}}$  – мощность полезного сигнала в точке приема при отсутствии и наличии лесных насаждений.

Радиоволна в процессе распространения в пространстве занимает объем в виде эллипсоида вращения с максимальным радиусом в середине пролета, который называют зоной Френеля. Естественные (земля, холмы, деревья) и искусственные (здания, ограда) преграды, попадающие в это пространство ослабляют сигнал. Эффективность механизма маршрутизации ZigBee зависит как от параметров окружающей среды, так и от характеристик приемопередатчиков. Радиусы всех зон Френеля уменьшаются при приближении к конечным участкам трассы и имеют наибольшее значение на середине трассы.

Для определения радиуса 1-й зоны Френеля в самой широкой части распространения можно воспользоваться формулой:

$$r = \sqrt{\frac{d1(d-d1)\lambda}{d}}, (6)$$

где  $d1$  – часть пространства по линии визирования.

Для определения зоны Френеля необходимо было выяснить на каком расстоянии в свободном пространстве осуществляется надежная связь. Для этого первый проведенный эксперимент должен был определить дальность связи на основании ее качества (по количеству принятых пакетов данных от расстояния

между модулями для свободного пространства и отобразить затухания сигнала от расстояния для свободного пространства). Во всех проведенных экспериментах размер пакета – 32 байта.

### 3. Экспериментальные исследования

Экспериментальная аппаратура: Для проведения исследований использовались приемопередатчики XBee производства компании Digi (MaxStream) и соответствующие отладочные комплекты, см. рис. 1.

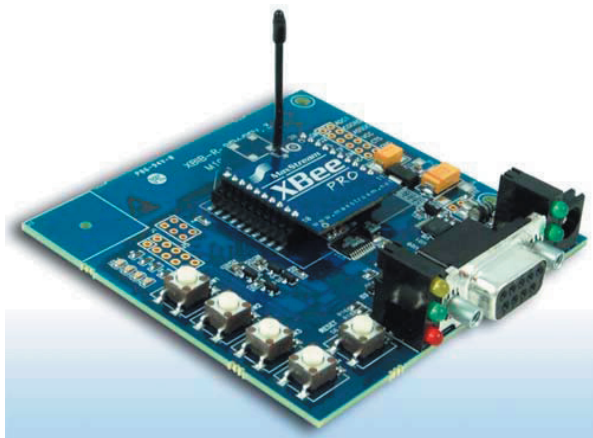


Рис. 1. Внешний вид отладочного комплекта для модуля XBee, используемого в эксперименте

Основные параметры модуля XBee:

- максимальная выходная мощность – 1 мВт;
- чувствительность приемника – -92 дБм;
- коэффициент усиления антенны ANT 2.4 A24-NASM-450 RPSMA-M – 2,1 дБ.

Для исследования параметров передачи беспроводных модулей XBee применялись два модуля, см. рис. 2.

Эксперименты проводились несколько раз, в одинаковых условиях, с перерывом между экспериментами в 15 минут. Высоты расположения антенн передающего и приемного устройств составляли 1 метр от поверхности земли (не менялась в процессе эксперимента).



Рис. 2. Набор оборудования, задействованного в эксперименте

Полученные результаты в ходе экспериментов были усреднены и представлены в табл. 1 и на рис. 3, 4.

Таблица 1

Экспериментальные данные для свободного пространства

№ Опыта	Временной интервал между пакетами, мс	Пакеты			Уровень сигнала на входе приемника, дБ	Расстояние между модулями, м
		Принятые, кол.	Непринятые кол.	Процент принятых пакетов, %		
1	100	10	0	100	-40	0
2		10	0	100	-61	6
3		10	0	100	-67	12
4		10	0	100	-65	18
5		10	0	100	-73	24
6		10	0	100	-71	30
7		9	1	90	-74	36
8		10	0	100	-81	42
9		10	0	100	-80	48
10		9	1	90	-81	54
11		10	0	100	-83	60
12		10	0	100	-84	66
13		10	0	100	-82	72
14		10	0	100	-85	78
15		10	0	100	-87	84
16		7	3	70	-91	90
17		7	3	70	-90	96
18		10	0	100	-84	102
19		5	5	50	-92	108
20		7	3	70	-92	114
21		7	3	70	-89	120
22		2	8	20	-89	124
23		6	4	60	-91	130
24		0	10	0	-104	136
25		0	10	0	-104	140
26		0	10	0	-104	146

Проанализировав полученные практические результаты можно сделать вывод, что рекомендуемым расстоянием между узлами для свободного пространства является расстояние 60 метров.

Принимая во внимание, что на расстоянии 60 м в условиях свободного пространства отсутствие неправильно принятых пакетов минимально, а характер затухающего процесса (см. линию на рис. 4 для определения затухания) – относительно постоянен, то для ZigBee в середине этого расстояния (самая широкая часть) определим радиус зоны Френеля для частоты 2.4 ГГц, который составляет  $1,369\text{ м} \approx 1,4\text{ м}$ . Вся зона соответственно имеет диаметр 2,8 м.

В формировании поля в точке приема, участвует часть пространства, охватывающая (8–12) зон Френеля. Такая область называется областью существенно участвующей в переносе энергии от одной точки пространства в другую. В результате взаимной компенсации совокупное действие всех зон Френеля эквивалентно действию 1/3 первой зоны

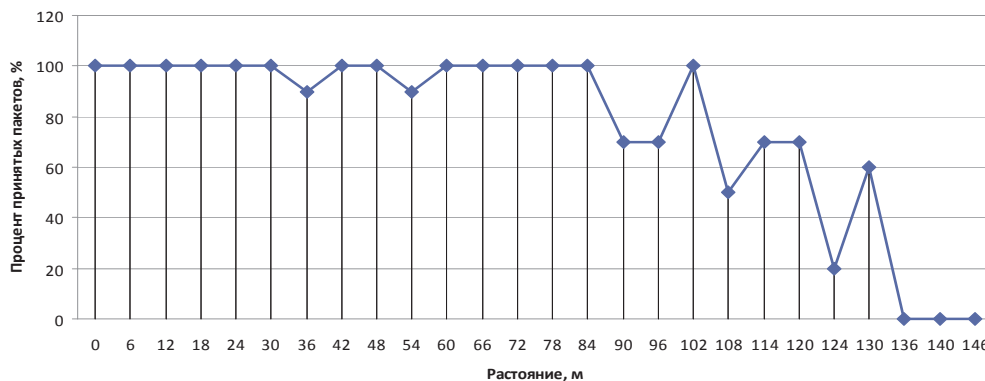


Рис. 3. Зависимость процента принятых пакетов от расстояния для свободного пространства

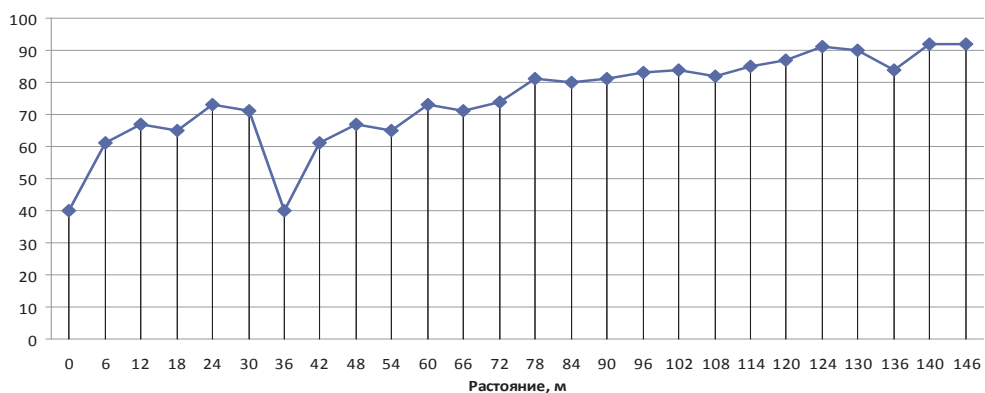


Рис. 4. Уровень сигнала на входе приемника, дБ, для свободного пространства

Френеля (по площади), радиус которой определяется как

$$r = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{d_1(d-d_1)\lambda}{d}}, \quad (7)$$

и равен 0,79 м, диаметр соответственно 1,58 м. Эта зона является минимальной зоной, при которой напряженность поля в точке приема равна напряженности поля в свободном пространстве.

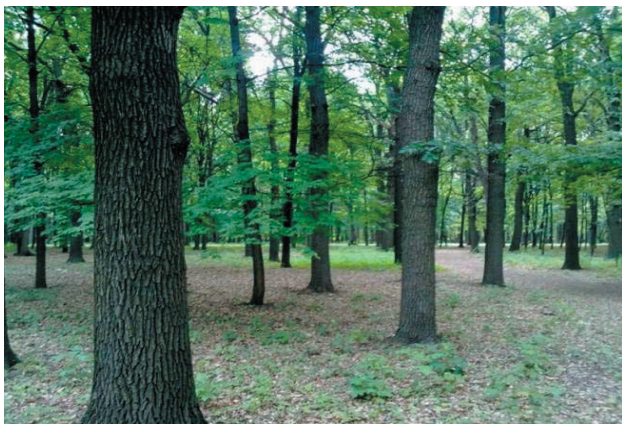


Рис. 5. Лесной массив смешанного типа в г. Харькове

В общем случае зависимость отношения напряженности поля  $E$  к полю в свободном пространстве  $E_0$

от параметра величины просвета [3],  $\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{H}{r}$  показывает, что если все зоны Френеля перекрыты наполовину ( $H = 0$ ), напряженность поля в точке приема составляет  $0,5 E_0$ . При увеличении степени закрытия трассы ( $H < 0$ ) поле в точке приема быстро падает, а с увеличением просвета ( $H > 0$ ) поле растет до величины  $1,16 \cdot E_0$ , а затем осциллируя, приближается к полю свободного пространства.

Таким образом при проведении эксперимента по определению влияния лесного массива на дальность связи беспроводных модулей ZigBee необходимо было учесть диаметры зон Френеля: от 1,58м до 2,8м.

Эксперименты проводились в городе Харькове в лесном массиве смешанного типа (см. рис. 5), имеющем

деревья с разными диаметрами стволов деревьев, что отражено на трассе эксперимента (см. рис. 6).

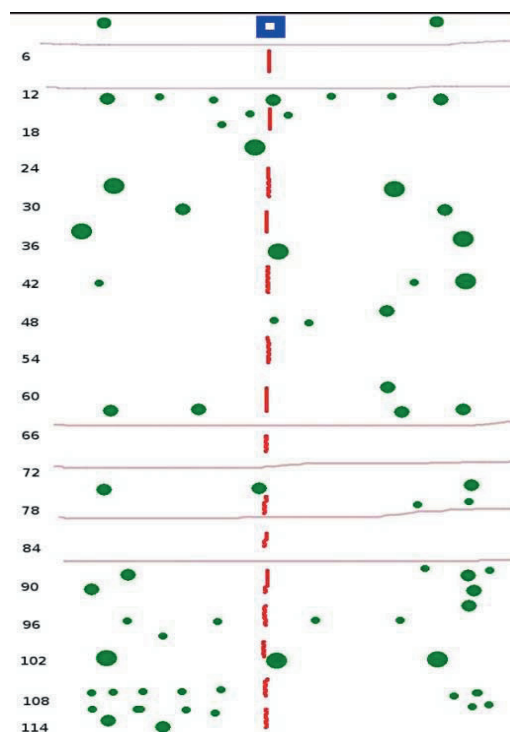


Рис. 6. Трасса проведения эксперимента



В качестве параметров передачи было выбрано количество пакетов данных – 15, их размер – 32 байта, уровни сигнала в точке приема, коэффициенты затухания в лесном массиве.

На рис. 6 изображена трасса проведения эксперимента, пунктирной линией изображен путь перемещения передвижного модуля.

Для устранения случайных факторов, было принято решение о проведении двух основных измерений в разные дни, но при одних и тех же определяющих условиях (место проведения, количественные параметры передаваемой информации – размер пакета, временной интервал между пакетами). Результаты измерений приводятся соответственно в табл. 2, 3, и соответствующие им графики на рис. 7, 8, 9, 10.

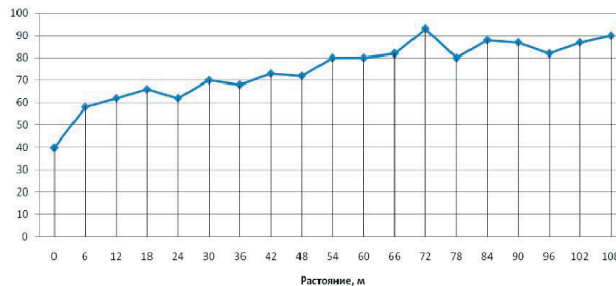


Рис. 8. Уровень сигнала на входе приемника, дБ, при влиянии лесного массива

В условиях влияния лесного массива среднее значение (при оценке графической зависимости) затухания составило 0,333 дБ/м.

Таблица 2

Экспериментальные данные (1) для условий лесного массива

№ Опыта	Временной интервал между пакетами, мс	Пакеты			Уровень сигнала на входе приемника, дБ	Расстояние между модулями, м
		Принятые, кол.	Непринятые кол.	Процент принятых пакетов, %		
1	100	15	0	100	-40	0
2		15	0	100	-58	6
3		15	0	100	-62	12
4		15	0	100	-66	18
5		15	0	100	-62	24
6		15	0	100	-70	30
7		15	0	100	-68	36
8		15	0	100	-73	42
9		15	0	100	-72	48
10		15	0	100	-80	54
11		15	0	100	-80	60
12		13	2	100	-82	66
13		5	10	33	-93	72
14		15	0	100	-80	78
15		12	3	80	-88	84
16		15	0	100	-87	90
17		8	7	53	-82	96
18		13	2	86	-87	102
19		2	13	13	-90	108

Таблица 3

Экспериментальные данные (2) для условий лесного массива

№ Опыта	Временной интервал между пакетами, мс	Пакеты			Уровень сигнала на входе приемника, дБ	Расстояние между модулями, м
		Принятые, кол.	Непринятые кол.	Процент принятых пакетов, %		
1		15	0	100	-40	0
2		15	0	100	-55	6
3		15	0	100	-57	12
4		15	0	100	-60	18
5		15	0	100	-66	24
6		15	0	100	-65	30
7		15	0	100	-70	36
8		15	0	100	-72	42
9		15	0	100	-70	48
10		15	0	100	-75	54
11		14	1	93	-80	60
12		15	0	100	-80	66
13		11	4	73	-84	72
14		15	0	100	-80	78
15		12	3	80	-83	84
16		6	9	40	-85	90
17		7	8	47	-90	96
18		10	5	67	-86	102
19		15	0	100	-85	108

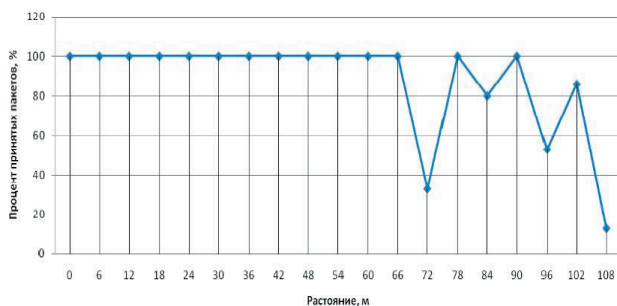


Рис. 7. Зависимость процента принятых пакетов от расстояния при влиянии лесного массива

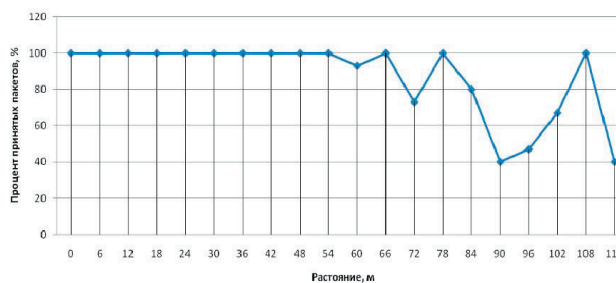


Рис. 9. Зависимость процента принятых пакетов от расстояния при влиянии лесного массива

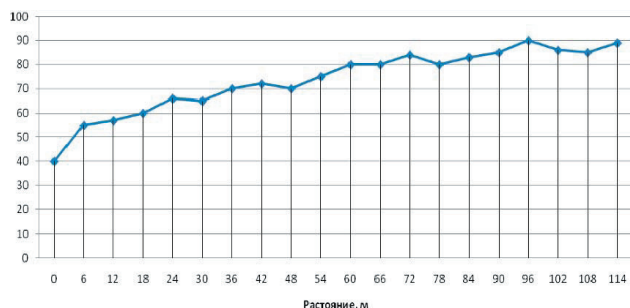


Рис. 10. Уровень сигнала на входе приемника, дБ, при влиянии лесного массива

В условиях влияния лесного массива среднее значение (при оценке графической зависимости) затухания составило 0,357 дБ/м. Следовательно, по результатам усредненных значений экспериментов (1) и (2), среднее значение составляет 0,345 дБ/м.

Для вычисления затухание радиосигнала  $Z$  в условиях лесного массива воспользуемся формулой (5) и результатами экспериментов. Представим в табл. 4 расчетные и экспериментальные данные.

Таблица 4

Результаты эксперимента и расчетные данные

Уровень сигнала на входе приемника (1) эксперимент, дБ	Уровень сигнала на входе приемника (2) эксперимент, дБ	Средний уровень сигнала на входе приемника, дБ	Уровень сигнала на входе приемника, для свободного пространства, дБ	Разница, дБ	Расстояние между модулями, м
-40	-40	-40	-40	0	0
-58	-55	-56,5	-61	4,5	6
-62	-57	-59,5	-67	7,5	12
-66	-60	-63	-65	2	18
-62	-66	-64	-73	9	24
-70	-65	-67,5	-71	3,5	30
-68	-70	-69	-74	5	36
-73	-72	-72,5	-81	8,5	42
-72	-70	-71	-80	9	48
-80	-75	-77,5	-81	3,5	54
-80	-80	-80	-83	3	60
-82	-80	-81	-84	3	66
-93	-84	-88,5	-82	4,5	72
-80	-80	-80	-85	5	78
-88	-83	-85,5	-87	2,5	84
-87	-85	-86	-91	5	90
-82	-90	-86	-90	4	96
-87	-86	-86,5	-84	2,5	102
-90	-85	-87,5	-92	4,5	108
Среднее значение затухания в лесном массиве				4,805	

#### 4. Выводы

Результаты вычисления затухания в лесном массиве показали, что эта величина составляет 4,805 дБ. Если принять во внимание, что в лесном массиве должно наблюдаться более быстрое затухание сигналов, то результаты эксперимента показали обратное, в 90 процентах измерений лесной массив способствует передаче информации, так как уровень сигнала для свободного пространства был ниже, чем для условий в лесном массиве.

#### Литература

1. Zuniga M. An analysis of unreliability and asymmetry in low-power wireless links. [Текст] / М. Zuniga, В. Krishnamachari // ACM Transactions on Sensor Networks. – 2007. – Vol. 3, No. 2. – p. 1 – 34.
2. Калинин, А.И. Распространение радиоволн и работа радиотрасс [Текст] / А.И. Калинин, Е.Л. Черенкова. – М. : Связь, 1971. – 439 с.
3. Черенкова, Е.Л. Распространение радиоволн [Текст] / Е.Л. Черенкова, О.В. Чернышев. – М. : Радио и связь, 1984. – 272с.