

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ *MIMO* КАНАЛА СВЯЗИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЕГО КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

### Аннотация:

В статье рассмотрен способ прогнозирования характеристик цифровой *MIMO* системы передачи информации в конкретном помещении на основании характеристик канала распространения. Описана методика проведения эксперимента для получения импульсных характеристик канала, а также методика обработки полученных результатов. Приведены физические и информационные характеристики исследуемого канала связи системы *MIMO*.

### Введение

Для прогнозирования характеристик системы связи необходимо иметь информацию о канале распространения. Существующие модели в качестве исходных данных используют различные характеристики канала. Для закрытых помещений такими характеристиками зачастую являются расстояния до стен, потолка и пола, электрические характеристики материала, из которого изготовлены (или покрыты) стены, пол и потолок.

Для имитационной модели, описанной в статье [1], исходными данными, характеризующими канал, являются его импульсные характеристики. Поскольку система состоит из нескольких антенн, как на приёмной стороне, так и на передающей, то и характеристики канала нужно иметь для всех пар передающая антенна – приёмная антенна. Для системы *MIMO* 2x2 таких пар будет 4.

Рассматриваемая модель также позволяет определять скрытность и помехоустойчивость системы. Для этого используется модель отводного канала, предложенная Вайнером в работе [2] и расширенная в работе [1] для применения в беспроводной системе *MIMO*. Для получения характеристик защищённости необходимо задать в модель канала связи импульсные характеристики между антенной отводного канала и каждой антенной приёмника и передатчика.

**Целью работы** является создание экспериментальной установки, методики измерения и обработки физических характеристик *MIMO* канала распространения, а также получение информационных характеристик системы передачи информации на основе полученных экспериментальных данных.

### Методика проведения эксперимента

Для оценки защищённости по методу, предложенному в [1], необходимо знать характеристики среды распространения, а именно – импульсные характеристики. Под импульсной характеристикой среды следует понимать сигнал на выходе приёмной антенны при подаче на вход передающей антенны дельта-импульса. Поскольку дельта-импульс является математической абстракцией и физически не может быть реализован, то для получения требуемых характеристик нужно сделать некоторые допущения.

Например, для измерения импульсной характеристики авторы работы [3] в своём эксперименте заменили дельта-функцию амплитудно модулированным импульсом длительностью 10 нс, частота несущего сигнала 1,5 ГГц. Схема эксперимента проведённого ими приведена на рис. 1. В результате на осциллографе были получены диаграммы затухания мощности рис. 2. В качестве излучателя была выбрана коническая антенна с равномерной диаграммой направленности в горизонтальной плоскости. Ей было отдано предпочтение перед диполем из соображений широкополосности. Для измерения задержки осциллограф и генератор были синхронизированы через коаксиальный кабель.

Недостатком такого метода является требование жесткой синхронизации времени генератора импульсов и осциллографа, что особенно сложно выполнить на больших расстояниях между приборами.

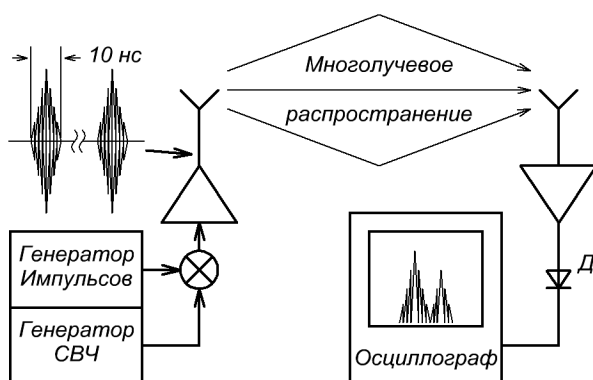


Рис. 1

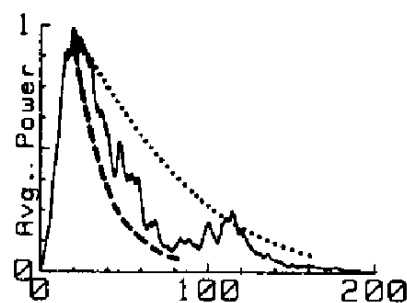
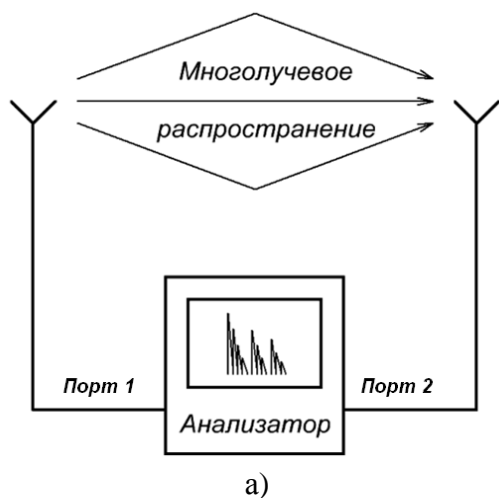


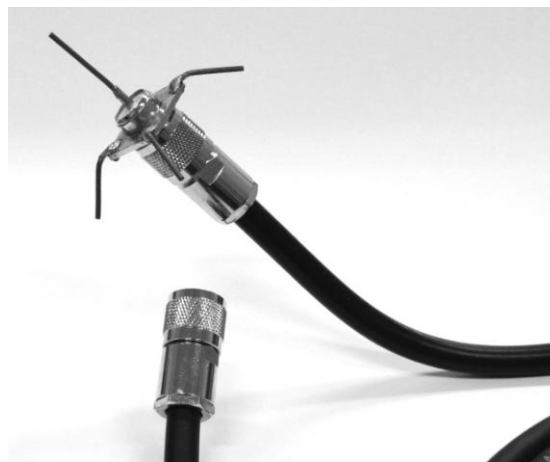
Рис. 2

Подобные результаты были получены позже – в 1998 году Джонасом Мидбо для диапазона 5 ГГц [4]. Их методика измерения отличалась от приведённой выше. Измерения проводились не во временной, а в частотной области. Импульсная характеристика канала была получена применением окна Ханнинга и обратного БПФ к частотной характеристике. Частотная характеристика, в свою очередь, была получена при помощи анализатора HP8722. К выходу анализатора был подключен усилитель мощности, а ко входу – маломушмящий усилитель. В качестве антенн использовались полуволновые вибраторы. Значения амплитуды и фазы были измерены на 201 частоте лежащих в пределах 5.14 – 5.3 ГГц.

В представленной работе для получения экспериментальных данных использовался более простой метод на основе векторного анализатора фирмы Rohde&Schwarz ZVR1127.8551.61. Схема измерения представлена на рис. 3,а.



а)



б)

Рис. 3

Для оценки защищённости необходимо получить 8 импульсных характеристик: между антеннами А и В, А и С, а также между антеннами С и В. Измерения частотных характеристик проводились следующим образом. Порт 1 прибора устанавливался в режим генерации тестового сигнала, а Порт 2 – в режим приема. К этим портам были подключены два несимметричных четвертьволновых вибратора, установленных на высоте 0,85 м (рис. 3,б).

Экспериментальные измерения проводились в помещении лаборатории главного корпуса ХНУРЭ высотой 5 м, имеющем кирпичные стены с деревянными перекрытиями. Лаборатория обставлена деревянными шкафами, стульями и столами, на которых по периметру установлены мониторы и измерительные установки для лабораторных работ. На рис. 4 изображен план данного помещения, на котором точками указаны места установки антенн:  $A_1$  и  $A_2$  являются антеннами передатчика;  $B_1$  и  $B_2$  – антенны приёмника;  $C$  – антенна отводного канала.

Перед проведением измерений анализатор был откалиброван в соответствии с рекомендациями, приведёнными в руководстве по эксплуатации анализатора *Rohde&Schwarz*. Прибор был настроен на измерение характеристик в частотной области  $1024$  точек (в полосе частот  $2 - 2.8$  ГГц) и преобразование во временную область полученных результатов. Антенны были подключены к прибору при помощи кабелей *RG-8* длиной  $3$  м с разъёмами *N*. Расстояние между приёмными и передающими антеннами –  $3$  м, расстоянием между антеннами приёмника, а также антеннами передатчика составляло  $80$  мм. Расстояние между передающей антенной и антенной отводного канала составляло около  $1$  м. Усреднение данных проводилось автоматически по результатам  $64$  измерений. Во время измерений обстановка в помещении не изменялась.

### Обработка результатов измерений

В результате измерения были получены восемь массивов данных:  $H11$  – импульсная характеристика между антеннами  $A_1$  и  $B_1$ ;  $H12$  – характеристика между антеннами  $A_2$  и  $B_1$ ;  $H21$  – характеристика между антеннами  $A_1$  и  $B_2$ ;  $H22$  – характеристика между антеннами  $A_2$  и  $B_2$ ;  $Hw1$  – характеристика между антеннами  $A_1$  и  $C$ ;  $Hw2$  – характеристика между антеннами  $A_2$  и  $C$ ;  $Hz1$  – характеристика между антеннами  $C$  и  $B_1$ ;  $Hz2$  – характеристика между антеннами  $C$  и  $B_2$ .

Результаты измерения импульсной характеристики  $H11$  изображены на рис. 6 серым цветом. Согласно кластерной модели канала все импульсы можно разделить на группы. Количество этих групп (кластеров) постоянно для одного помещения и в реальных условиях находится в пределах от 2 (небольшие комнаты) до 6 (большие помещения и открытые пространства). Первое, что необходимо определить – это количество кластеров в исследуемом помещении. Поскольку математическое ожидание амплитуды импульсов в пределах кластера затухает экспоненциально во времени [3, 4], то начало кластера можно определить по выделяющимся импульсам. Первый кластер начинается с первого импульса (время прихода –  $7,38$  нс), как видно из графика – второй кластер начинается в  $17,4$  нс, а третий – в  $25,03$  нс.

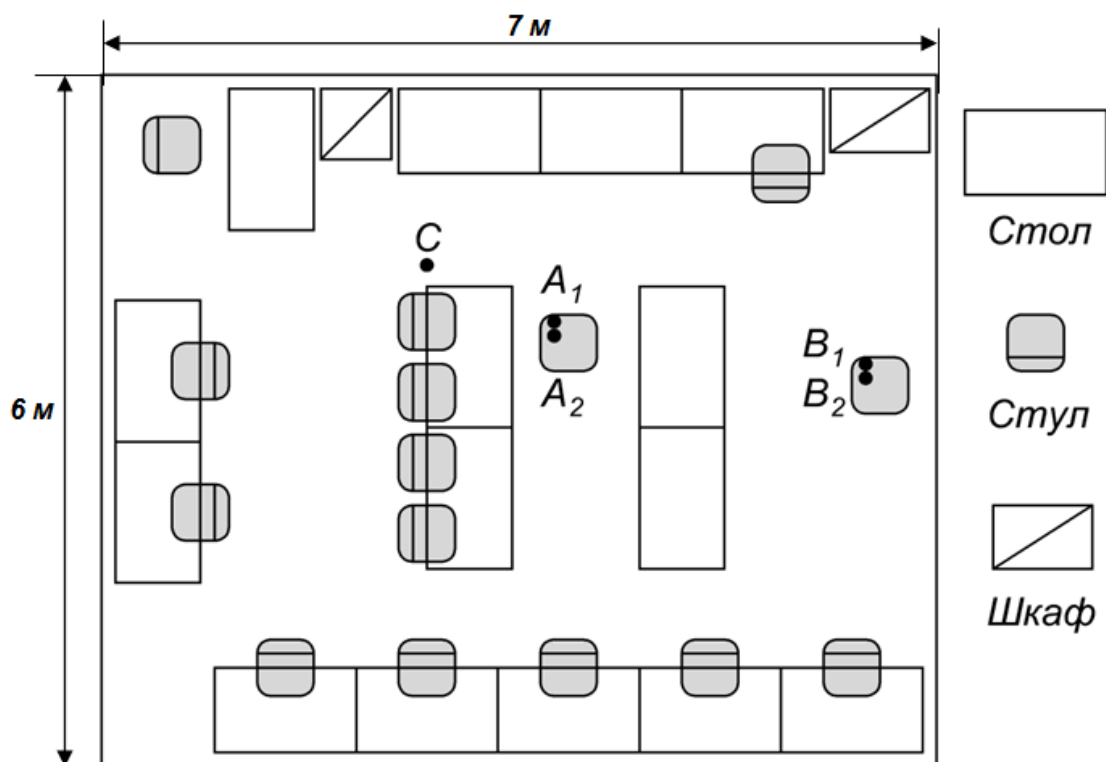


Рис. 4

Также известно, что в пределах кластера интервалы прихода импульса постоянны. Таким образом, второй шаг – нахождение интервала прихода импульсов для каждого кластера. Для этого составим таблицу, с интервалами между импульсами для каждого кластера:

Таблица 1

Кластер 1		Кластер 2		Кластер 3	
Время прихода, нс	Интервал прихода, нс	Время прихода, нс	Интервал прихода, нс	Время прихода, нс	Интервал прихода, нс
7,38	-	17,4	-	25,03	-
9,58	2,2	18,53	1,13	26,92	1,89
10,85	1,27	19,75	1,22	28,51	1,59
12,45	1,6	21,4	1,65	31,7	3,19
13,53	1,08	22,04	0,64	-	-
15,67	2,14	23,25	1,21	-	-
16,27	0,6	-	-	-	-

Можно заметить, что некоторые интервалы превышают остальные значения примерно в два раза, например в первом кластере  $2,2$  нс и  $2,14$  нс, в то время как остальные  $1,08$  нс и  $1,27$  нс. В этом случае можно допустить, что между двумя этими импульсами есть ещё один с нулевой амплитудой (рис. 5, 2-й и 7-й импульсы черным цветом). Кроме того есть импульсы, интервал между которыми очень мал (например  $0,6$  нс). В таких случаях можно предположить, что это один импульс (8-й импульс на рис. 5).

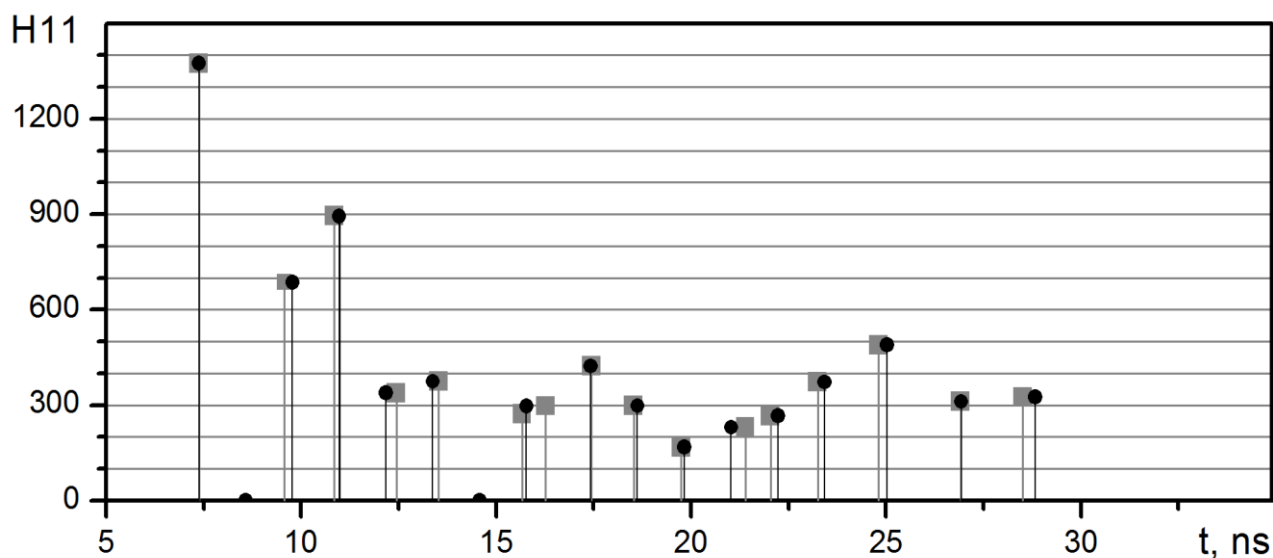


Рис. 5

Таким образом, получаем количество импульсов в первом кластере равное 8 (плюс два нулевых, минус один обобщенный). Чтобы получить интервал – вычитаем из времени прихода последнего импульса –  $15,97$  нс (среднее между  $15,67$  нс и  $16,27$  нс) время прихода первого импульса ( $7,38$  нс) и делим на количество интервалов – 7 (на единицу меньше, чем количество импульсов). В результате получаем  $1,22$  нс. Затем, при необходимости, это значение корректируем. Как альтернатива этому методу можно воспользоваться аппроксимацией по методу наименьших квадратов.

Применив описанный выше способ ко всем каналам получим необходимый для моделирования канала связи *MIMO* набор параметров. Эти данные сведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2

Канал	Номер кластера	Время прихода первого импульса кластера, <i>нс</i>	Интервал прихода импульсов в кластере, <i>нс</i>
<i>H11</i>	1	7,38	1,2
	2	17,4	1,2
	3	25,03	1,9
<i>H21</i>	1	7,28	1,14
	2	14,88	1,4
	3	23,66	1
<i>H12</i>	1	7,28	1,25
	2	15,25	1,6
	3	22,36	1,79
<i>H22</i>	1	7,22	2
	2	17,99	0,7
	3	24,75	2,25

Таблица 3

Канал	Номер кластера	Амплитуда импульса, <i>мкВ</i>							
		1	2	3	4	5	6	7	8
<i>H11</i>	1	1374	0	685,6	893,6	338,2	373,9	0	297,3
	2	422,6	297,8	167,4	230,8	266	372,2	-	-
	3	488,8	311,3	324,6	-	-	-	-	-
<i>H21</i>	1	1314	321,8	437,7	0	524,3	245	-	-
	2	610,8	216	392,9	0	295,3	-	-	-
	3	472,4	265	0	260,1	260,1	264,4	-	-
<i>H12</i>	1	1276	0	529,8	492,4	267,6	357,6	362,6	-
	2	455	0	219,8	208	227,4	221,5	-	-
	3	496,5	329,4	233,3	263,3	196,4	0	234,5	237,2
<i>H22</i>	1	1287	617,4	228	545,3	254,7	-	-	-
	2	338,8	279	312,7	297,7	-	-	-	-
	3	422,9	0	264,2	204,1	-	-	-	-

### Моделирование системы

Полученные выше характеристики были использованы для моделирования качества системы связи *MIMO 2x2* с модуляцией *BPSK*. Результаты моделирования приведены на графиках (рис. 6). Черной пунктирной линией обозначен график Гауссового интеграла ошибок для используемого вида модуляции. Черной сплошной линией обозначен график, отображающий результаты моделирования первого канала. Черными точками обозначена линия, характеризующая количество битовых ошибок во втором канале моделируемой системы передачи информации.

Как видно из рис. 6 – в первом канале (сплошная черная линия) уровень битовых ошибок  $P_0$  почти описывает Гауссов интеграл ошибок, а во втором канале количество ошибок несколько больше. Это обусловлено тем, что в реальном помещении матрица канала может быть слабо обусловленной, а это, в свою очередь, приведёт к большим ошибкам при разделении каналов на приёмной стороне.

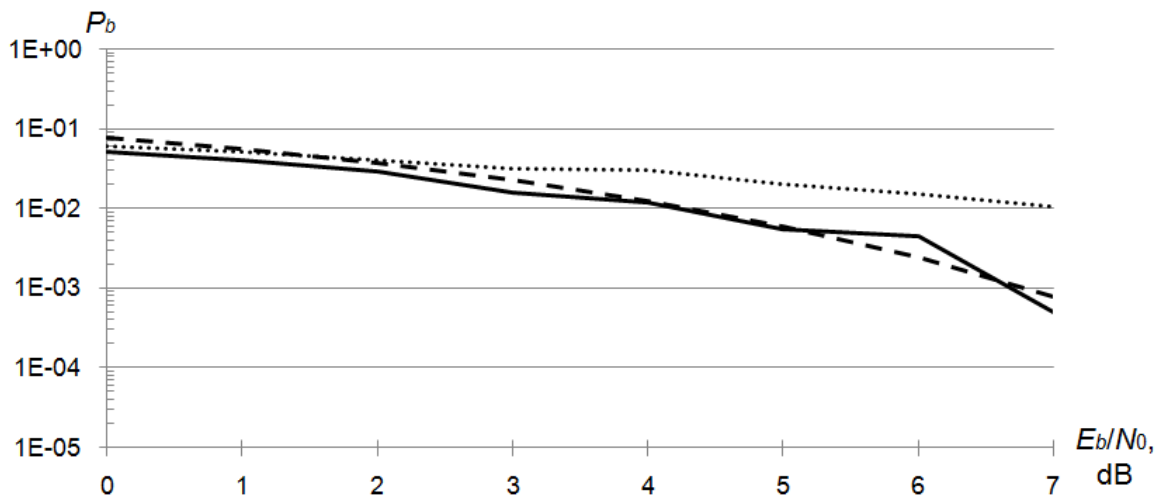


Рис. 6

### Заключение

Были проведены экспериментальные исследования характеристик канала распространения радиоволн в закрытом помещении для системы *MIMO* 2x2 с отводным каналом. Также приведены несколько методик проведения подобных измерений.

Описана усовершенствованная методика обработки результатов измерений для приведения к виду, позволяющему использовать их для моделирования системы цифровой системы передачи информации с использованием имитационной модели [1]. Приведены результаты обработки полученных характеристик канала.

Полученные данные были использованы для моделирования беспроводной цифровой системы передачи информации с технологией *MIMO*. Получена характеристика качества системы связи.

### Список литературы:

1. Кузнецов А.А. Цона А.И. Приближенный анализ защищенности системы *MIMO* на основе кластерной модели отводного канала. Часть I: Модель // Радиотехника: Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2011. – Вып. № 164.
2. Wyner A.D. The wire-tap channel // Bell System Technical Journal. – 1975. – Vol. 54, № 8. – pp. 1355–1387.
3. Saleh A.A.M., Valenzuela R.A. A statistical model for indoor multipath propagation // IEEE J. Select. Areas Comm. – 1987. – Т. 5. – P. 128–137.
4. Medbo J., Schramm P. Channel models for HIPERLAN-2 // ETSI/BRAN document no. 3ERI085B. – 1998.

Харьковский национальный университет  
радиоэлектроники

Поступила в редколлегию