МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

ИНТЕРНЕТ/WI-FI ТЕХНОЛОГИИ

РЕФЕРАТ

студента 2 курса 251 группы
направления 09.03.04 — Программная инженерия
факультета КНиИТ
Григорьева Данилы Евгеньевича

Проверено:

доцент, к. ф.-м. н. _____ Черкассова О. А.

Саратов 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

На заре развития компьютерных сетей, когда встала необходимость обеспечения обмена разнообразными данными между различными сетевыми устройствами, для задания единообразного способа передачи информации возникли различные соглашения интерфейса — протоколы передачи данных — а Международная организация по стандартизации (ИСО) представила модель сетевых протоколов OSI/ISO (также OSI), которая разделила различные уровни взаимодействия систем и, таким образом, стала путеводной звездой при разработке будущих протоколов, эталонной моделью взаимосвязи открытых систем. Она состоит из семи уровней, каждый из которых выполняет определённые задачи. Эти уровни, начиная с нижнего, самого нигкоуровневого, включают:

1. Физический уровень (У1)
2. Канальный уровень (У2)
3. Сетевой уровень (У3)
4. Транспортный уровень (У4)
5. Сеансовый уровень (У5)
6. Представительский уровень (У6)
7. Прикладной уровень (У7)

Каждый уровень модели OSI отвечает за свою часть процесса передачи данных, обеспечивая абстракцию и независимость от конкретных технологий.

Физический уровень является первым и самым низким уровнем модели OSI. Он отвечает за передачу необработанных битов данных по физическим носителям, таким как кабели и радиоволны. Он определяет способы передачи битов по физическим носителям, включая медные и оптоволоконные кабели, беспроводные каналы. Также У1 описывает электрические, механические и функциональные характеристики для активации и поддержания соединений между устройствами связи. Собственно, здесь определяются и сами физические носители, коих немалое количество от коаксиального кабеля до оптоволокна и любой беспроводной среды.

Следующий за ним канальный уровень обеспечивает контроль стабильности физического канала связи и непосредственно общение между узлами одного сегмента локальной сети. На втором уровне модели OSI данные делятся на кадры, содержащие полезную нагрузку — данные — и служебную информацию — метаданные (это, в частности, могут быть сетевые адреса отправителя и получателя). Для обнаружения и даже по мере возможности исправления ошибок передачи, как правило, используются контрольные суммы. Также канальным уровнем определяются правила доступа к физическому носителю, что предотвращает коллизии.

Общепринятые и наиболее распространённые на текущий момент времени стандарты обоих уровней разработаны Институтом инженеров электротехники и электроники США (IEEE). В первую очередь это группа IEEE 802, которая состоит из нескольких наборов стандартов. Один из них — IEEE 802.11. В нём описаны нормы и

правила работы беспроводных компьютерных с использованием радиоволн и видимого света, а сам этот набор известен под торговой маркой Wi-Fi.

В рамках своей работы мною рассмотрен как сам стандарт, так и принцип его работы с физической точки зрения, а, кроме того, мною затронуты некоторые аспекты компьютерной безопасности, связанные с атакой и защитой беспроводных сетей на физическом уровне.

1 Электромагнитные волны

Волна — это процесс переноса энергии без переноса вещества, связанный с колебаниями частиц среды или полей. Механические волны требуют наличие среды для распространения, а примечательное свойство электромагнитных волн состоит в том, что им и вакуум не страшен. Именно они используются в технологиях радиосвязи и, в том числе, на физическом уровне стандартов Wi-Fi.
Электромагнитные волны представляют собой колебания электрического и магнитного полей, которые распространяются в пространстве с конечной скоростью. Основной их источник — это движущиеся с ускорением заряженные частицы.

1.1 Характеристики волны

Любые волны — как механические, так и электромагнитные — обладают пятью основными характеристиками, а именно:

1. Амплитуда A
2. Частота V
3. Период $T = \frac{1}{V}$
4. Длина волны λ
5. Скорость распространения v
6. Фаза

Амплитуда — это максимальное отклонение волны от её равновесного положения, связанная с величиной электрического и магнитного полей. Она напрямую зависит от переносимой волной энергией: чем её больше, тем выше амплитуда.

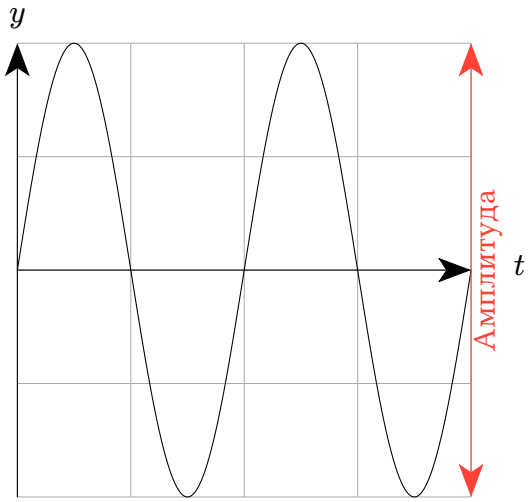

Рисунок 1: Амплитуда колебаний

Если амплитуда определяет энергию волны, то частота и период описывают временные характеристики волн.

Частота — это количество полных колебаний, которые происходят за единицу времени (секунду). Она измеряется в Герцах и, нетрудно догадаться, $1\ \text{Гц} = 1\ \text{с}^{-1}$.

Период — время, которое требуется для завершения одного полного цикла колебания. Само собой, оно измеряется в секундах.

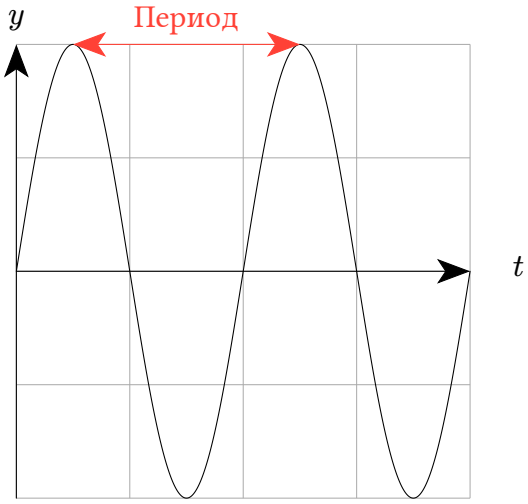

Рисунок 2: Период колебания

Фаза — относительное значение, которое показывает, какая часть перода $\frac{t}{T}$ прошла с момента последнего прохождения функции волны через нуль.

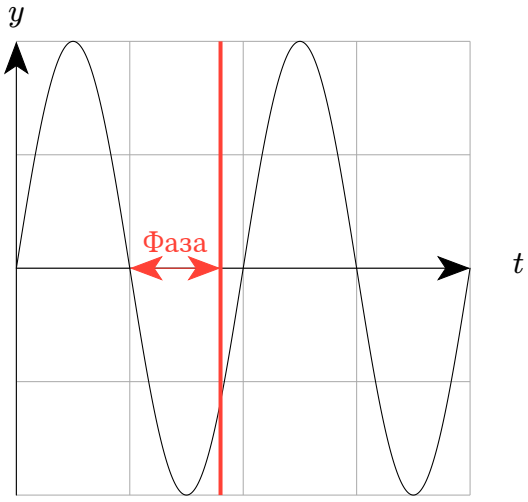

Рисунок 3: Фаза колебания

1.2 Виды электромагнитных волн

Электромагнитные волны возникают при движении заряженных частиц и по частоте колебаний делятся на:

Диапазон		λ	V	**Источники**
Радио	Сверхдлинные	>10км	<30кГц	Атмосферные и магнитосферные явления. Радиосвязь
	Длинные	10км — 1км	30кГц — 300кГц	
	Средние	1км — 100м	3МГц — 30МГц	
	Короткие	100м — 10м	3МГц — 300ГГц	
	Ультракороткие	10м — 1мм	30МГц — 300ГГц	
Инфракрасное излучение		1мм — 780нм	300ГГц — 429ТГц	Излучение молекул и атомов при тепловых и электрических воздействиях
Видимое излучение		780 нм — 380 нм	429 ТГц — 750ТГц	
Ультрафиолет		380 нм — 10 нм	$7,5 \cdot 10^{14}$ Гц — $3 \cdot 10^{16}$ Гц	Излучение атомов под воздействием ускоренных электронов
Рентген		10 нм — 5 пм	$3 \cdot 10^{16}$ Гц — $6 \cdot 10^{19}$ Гц	Атомные процессы при воздействии ускоренных заряженных частиц
Гамма		<5 пм	$> 6 * 10^{19}$ Гц	Ядерные и космические процессы, радиоактивный распад

Table 1: Частотные диапазоны электромагнитного излучения

Конечно, существует технология Li-Fi, которая использует волны видимого света для передачи данных, однако поскольку темой работы является именно Wi-Fi, далее будут рассматриваться именно радиоволны.

1.3 Уравнения Максвелла. Принцип формирования волн

Согласно физическому смыслу уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме,

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \tag{1}$$

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \tag{2}$$

где

- $\vec{E}$ — напряжённость электрического поля
- $\vec{B}$ — магнитная индукция
- $\vec{H}$ — напряжённость магнитного поля
- $\vec{D}$ — электрическая индукция
- $\vec{j}$ — плотность электрического тока
- ρ — объёмная плотность электрического заряда,

изменяющиеся во времени переменные электрическое и магнитное поле вызывают во времени возникновение друг друга, обоюдно поддерживая таким образом существование. В результате образуется отдельная от движущихся зарядов сущность — электромагнитная волна.

Для её возникновения нет необходимости в наличии обоих источников, ведь, поскольку переменное электрическое поле создаёт переменное магнитное и наоборот. Это подтверждается следующими двумя уравнениями Максвела, записанными в интегральной форме:

$$\oint_L \vec{E} dl = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} dS, \tag{3}$$

$$\oint_L \vec{H} dl = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) dS, \tag{4}$$

где
- S — поверхность произвольной формы,
- l — замкнутый контур, которым ограничена поверхность,
- dS — вектор элементарной площадки поверхности S,
- dl — сонаправленный обходу вектор элементарной части контура.

Именно это свойство становится решающим в передаче сигналов волновым способом. Когда электрический заряд колеблется или перемещается, он создаёт переменное электрическое поле вокруг себя. Согласно приведённым выше уравнениям это приводит к появлению магнитного поля в соседних точках пространства. Из уравнений Мксвелла выходит, что электрическое и магнитное поле взаимосвязаны, поэтому создаётся волнообразное изменение электрического и магнитного полей. Таким образом антенна-передатчик излучает электромагнитные волны, которые улавливает приёмник и благодаря явлению электромагнитной индукции преобразует обратно в электрические сигналы, которые в дальнейшем будут обработаны получившим сообщение устройством.

1.4 Свойства волн

Поскольку векторы электрического $\vec{E}$ и магнитного $\vec{H}$ полей взаимно перпендикулярны и оба перпендикулярны волновому вектору $\vec{k}$, электромагнитные волны являются поперечными. Как поперечная, радиоволна обладает такой немаловажной характеристикой как поляризация, связанная с направленным колебанием векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$. Антенны, используемые в устройствах беспроводной связи, имеют линейную поляризацию и различаются на

- **Однополяризационные**, испускающие сигнал в горизонтальной или вертикальной поляризации
- **Двуполяризационные**, передающие данные в обеих поляризациях

От совпадения поляризации приёмника и передатчика зависит стабильность соединения. Если она у них разная, то это ослабит сигнал, так как приёмник будет улавливать только часть энергии, а если поляризации будут ортогональны, то связь будет отсутствовать вовсе.

Здесь важно отметить, что электромагнитным волнам свойственны отражение, преломление и поглощение. При прохождении через различные среды, они будут изменять своё направление в соответствии с коэффициентами преломления. При столкновении с диэлектриком волны будут частично поглащаться материалом и частично отражаться, причём угол падения будет равен углу преломления. Эти свойства могут отрицательно сказаться на качестве связи, особенно если в результате отражения возникнут многолучевые эффекты, ведущие к интерференции.

Кроме этого, примечательное свойство электромагнитных волн состоит в том, что в отличии от механических они могут свободно распространяться даже в вакууме.

2 Аналоговые и цифровые сигналы

Сигнал — это переносящийся в пространстве носитель информации, которым в нашем случае является электромагнитная волна.

Постепенно и непрерывно изменяющийся аналоговый сигнал можно противопоставить цифровому, который изменяется моментально.

Аналоговый сигнал, принимающий бесконечное количество значений в пределах заданного диапазона, бесподобен при передаче непрерывной и плавно изменяющйся информации — видео, звука... Он прост в генерации и обработке и в идеальных условиях обеспечивает высокую точность передачи информации, а также способен распространяться через множество сред. Его серьёзный минус состоит в том, что он подвержен помехам и искажениям.

Цифровой сигнал описывается функцией дискретного времени и принимает конечное число значений. В нашем случае он может быть использован для представления конкретно двоичных данных, то есть набора битов. Его сложнее генерировать, а дискретизация нередко несёт за собой потерю информации. Но зато такой сигнал устойчив к помехам и искажениям, лёгок в обработке и хранении и, что особенно приятно, может быть сжат. Фатальный минус цифрового сигнала состоит в том, что его не получится просто так взять и передать по радио, ведь невозможно обеспечить настолько идеальные колебания.

Сразу вспомним, что, когда речь шла о волнах, мы говорили о периодических колебаниях. Они аналоговым сигналами и синусоида является фундаментальным случаем функции такого сигнала.

2.1 Спектральное разложение

Любой периодический сигнал можно представить в виде суммы гармонических колебаний с различными частотами, что математически обосновывается преобразованием Фурье, в результате которого мы можем разложить непрерывную функцию на сумму бесконечного числа тригонометрических функций:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx) \tag{5}$$

Конечно, на практике используются лишь первые несколько синусоидальных колебаний в силу того, что последующие имеют малые амплитуды и быстро затухают.

2.2 Затухания и полоса пропускания

Затухание — это ослабление сигнала при его прохождении через среду, связанное с постепенным уменьшением амплитуды. Затухание происходит в силу рассеивания, поглощения и других свойств электромагнитной волны.

Оценить степень затухания можно, введя понятие мощности сигнала, которая асимптотически зависит от квадрата амплитуды $O(A^2)$. Измерив отношение мощности исходного и переданного сигнала, мы сможем определить затухание. Для выполнения таких замеров можно использовать спектроанализаторы и радиочастотные анализаторы.

Полоса пропускания — непрерывный диапазон частот, в котором сигнал может быть передан с приемлемым уровнем потерь. Если сигнал передаётся на частоте, не выходящей за минимальные и максимальные рамки полосы, то передача данных будет весьма надёжной.

2.3 Помехи

Помехи могут привести к снижению уровня сигнала, что затрудняет его восприятие приемником. Дело в том, что нежелательные сигналы искажают отправленный нами сигнал.

Атмосферные явления, такие как грозы, могут создавать мощные электрические разряды, которые вызывают значительные помехи в радиосигналах. Эти помехи могут распространяться на большие расстояния и влиять на работу радиосистем, включая сети Wi-Fi. Никуда не убежать и от мусорных сигналов техногенного характера. Электроприборы и устройства, работающие на электричестве, такие как двигатели, сварочные аппараты и другие промышленные установки, создают электромагнитные помехи. В городских условиях уровень таких помех значительно выше из-за большого количества работающих устройств. Кроме того, источником помех может стать сами Wi-Fi устройства. Дело в том, что радиопередающие и приемные устройства также создают собственные шумы, которые могут влиять на качество принимаемого сигнала. Эти шумы могут быть вызваны внутренними процессами в устройствах.

2.4 Пропускная способность

Пропускная способность — это максимальная скорость передачи данных на линии связи, измеряемая в битах в секунду (бит/с). Она зависит от характеристик физической среды, такой как затухание сигнала и полоса пропускания, а также от способа кодирования данных.

Кодирование определяет спектр передаваемых сигналов. Если значимые гармоники сигнала попадают в полосу пропускания линии, то такой сигнал будет хорошо передаваться. Если же значимые гармоники выходят за границы полосы пропускания, то сигнал будет искажаться, что усложнит распознавание информации. В большинстве способов кодирования используются изменение одного или нескольких параметров периодического электрического сигнала — частоты, амплитуды и фазы синусоиды или уровня напряжения/тока последовательности импульсов. Эти параметры называют информационными параметрами сигнала. Периодический сигнал, параметры которого подются изменениям, называют несущим сигналом. Процесс изменения информационных параметров несущего сигнала в соответствии с передаваемой информацией называется модуляцией (кодированием). Измененный в результате кодирования несущий сигнал называют

информационным сигналом. Изменение информационного параметра сигнала происходит через фиксированный интервал времени, называемый тактом. Величина, обратная значению такта, является тактовой частотой линии.

2.5 Модуляция сигнала

Системы связи способны обрабатывать как цифровые, так и аналоговые сигналы. В беспроводных сетях, где компьютеры обмениваются информацией, сигнал представляет собой электромагнитную волну, а данные — это дискретные значения. Для передачи этих данных требуется преобразование двоичных чисел в аналоговый сигнал.

Модуляция — это процесс преобразования цифровых данных в аналоговый сигнал, который затем используется для передачи информации через различные каналы связи. Различные методы модуляции позволяют использовать различные характеристики электромагнитной волны для кодирования и передачи данных, что позволяет достичь различных целей, таких как повышение скорости передачи данных, улучшение устойчивости к помехам и повышение надежности передачи информации.

2.5.1 Амплитудная модуляция

Амплитудная модуляция заключается в изменении амплитуды несущего сигнала в соответствии с информационным сигналом. При этом частота и фаза остаются постоянными. Основным преимуществом AM является простота реализации, что делает ее популярной в радиовещании и других аналоговых системах.

В процессе амплитудной модуляции несущий сигнал смешивается с модулирующим сигналом. Результатом является спектр, содержащий несущую частоту и две боковые полосы (спутники). Эти боковые полосы представляют собой частоты, которые находятся на фиксированном расстоянии от несущей частоты и зависят от амплитуды модулирующего сигнала.

Основным недостатком амплитудной модуляции является ее уязвимость к помехам и шумам. Изменения в амплитуде могут быть вызваны внешними факторами, что приводит к искажению передаваемого сигнала. Поэтому AM часто используется в условиях, где помехи минимальны, и это явно не случай Wi-Fi.

2.5.2 Частотная модуляция

Частотная модуляция, также известная как FM, подразумевает изменение частоты несущего сигнала в зависимости от мгновенных значений модулирующего сигнала. В отличие от амплитудной модуляции, при частотной амплитуда остается постоянной, что обеспечивает более высокую помехозащищённость.

При частотной модуляции максимальное отклонение частоты от несущей называется девиацией. Индекс модуляции определяется как отношение девиации к частоте модулирующего сигнала. Частотно-модулированные сигналы обладают высокой устойчивостью к шумам и интерференции, что делает их идеальными для радиовещания и передачи звука.

Частотная модуляция широко используется в радиовещании (например, FM-радио), телевидении и радиотелефонии. Это связано с тем, что FM-сигналы обеспечивают высокое качество звука и устойчивость к помехам.

2.5.3 Фазовая модуляция

Фазовая модуляция заключается в изменении фазы несущего сигнала в соответствии с информационным сигналом. Как и в случае с FM, амплитуда остаётся постоянной. Фазовая модуляция может быть описана как процесс изменения фазы сигнала на фиксированное значение в зависимости от уровня модулирующего сигнала. Это позволяет передавать информацию с высокой точностью и минимальными потерями.

Фазовая модуляция часто используется в цифровых системах связи, таких как системы передачи данных и беспроводные сети. Она также применяется в некоторых форматах телевидения и радиовещания для улучшения качества передачи.

2.5.4 Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ)

Квадратурная амплитудная модуляция (КАМ) является одной из самых эффективных техник модуляции, используемых в современных системах передачи данных. Она сочетает в себе изменения как амплитуды, так и фазы несущего сигнала, что позволяет значительно увеличить скорость передачи информации. Рассмотрим подробнее принципы работы QAM, ее применение и преимущества.

КАМ основывается на использовании двух несущих сигналов, которые сдвинуты по фазе на 90 градусов ($\frac{\pi}{2}$ радиан). Эти сигналы обычно обозначаются как I (инфаза) и Q (квадратура). Каждый из этих сигналов модулируется по амплитуде своим модулирующим сигналом:

$$S(t) = I(t)\cos(2\pi f_0 t) + Q(t)\sin(2\pi f_0 t), \tag{6}$$

где
- $I(t)$ и $Q(t)$ — модулирующие сигналы
- f_0 — несущая частота
- t — время

В результате получается комбинированный сигнал, который содержит информацию как об изменении амплитуды, так и о фазе.

При формировании КАМ-сигнала количество возможных состояний определяется количеством бит, которые могут быть переданы за один символ. Например, в 16-КАМ используется 16 различных состояний, что позволяет передавать 4 бита информации за один символ. Каждое состояние соответствует определенной комбинации значений амплитуды и фазы для сигналов I и Q.

Созвездие	Бит на символ
16-КАМ	4 бит/символ
64-КАМ	6 бит/символ
256-КАМ	8 бит/символ
1024-КАМ	10 бит/символ
4096-КАМ	12 бит/символ

Table 2: Наиболее часто используемые созвездия КАМ

КАМ позволяет эффективно использовать доступный спектр частот, что приводит к увеличению объема передаваемых данных без необходимости расширять полосу пропускания. И хотя более высокие уровни КАМ требуют лучшего соотношения сигнал/шум, они всё же обеспечивают надёжную и защищённую от помех передачу данных при достаточном уровне сигнала. КАМ весьма универсальна, ведь она может адаптироваться к различным условиям передачи и требованиям к качеству связи,

Для избежания потенциальных ошибок, как правило, в КАМ запрещено использовать одинаковую амплитуду соседним по фазе сигналам.

3 Стандарты Wi-Fi

Характеристики	Спецификации				
	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Принят	сентябрь 1999	сентябрь 1999	июль 2003	сентябрь 2009	январь 2014
Скорость, Мбит/с	≤ 54	≤ 11	≤ 54	≤ 600	≤ 6933
Диапазон, ГГц	5	2,4	2,4	2,4 или 5	5
Ширина канала, МГц	20	22	20 или 22	20 или 40	20, 40, 80, 160 или 80+80
Тип модуляции	OFDM	DSSS, CCK	DSSS, CCK, OFDM	DSSS, CCK, OFDM	OFDM
Антенна	SISO	SISO	SISO	MIMO	MIMO/MU-MIMO
Потоков	1	1	1	1–4	1–8

Table 3: Стандарты Wi-Fi

3.1 Некоторые юридические аспекты

4 Физический уровень

4.1.1 Расширение спектра

4.1.2 Мультиплексирование

4.1.3 Антенны MIMMO

В двухполяризационных антеннах используется технологи MIMO и расшифровывается Multiple Input Multiple Output (несколько входов и выходов). Принцип работы антенн MIMO следующий:

на передающей стороне присутствует делитель потоков, который разбивает данные на подпотоки. Число под потоков равняется числу антенн. Далее идет передача данных по каждой из антенн с различной поляризацией. Это делается для того чтобы сигнал мог быть идентифицирован принимающей стороной на принимающей стороне антенны принимают сигнал. Каждый из передающегося подпотока поступает на антенну в приемнике. Далее из всего потока энергии сигнала каждая антенна принимает только тот подпоток, за который она отвечает. Распределение происходит по закону, которым снабжен каждый сигнал. Вторая технология, которая используется в беспроводных сетях называется AirMax. Различие между Wi-Fi и WiMax в том, что в первом случае станция прослушивает радиосигналы и определяет занятость канала (при свободном канале пакет отсылается), а во втором каждому абоненту выделяется слот для передачи и приема данных. Как следствие, задержек нет, слушать эфир не надо. Количество пользователей в Wi-Fi технологии не более 20, а в WiMax до 120. AirMax решает проблему, когда два клиента посылают сигнал в одно время. Так же задержка передачи голоса и видео уменьшается, так как после опроса абонентов накладывается приорите

5 Канальный уровень

5.1.1 Методы определения и коррекции ошибок

Коды обнаружения ошибок, коды с коррекцией ошибок, протоколы с автоматическим запросом повторной передачи

6 Атаки на беспроводные сети

6.1 Атаки отказа в обслуживании (DoS и DDoS)

Создание широкополосных помех с помощью радио-джаммеров. Это эквивалент DoS-атаки, но только на физическом уровне радиосреды. Противостоять подобного рода атаке средствами инфраструктуры Wi-Fi практически невозможно, если мощность излучения высока

6.2 Разведка и перехваты пакетов

6.2.1 Перехват пакетов

Самый универсальный способ атаки на точку доступа — вычисление ее ключа WPA2 по отдельным сообщениям (M1-M4) из перехваченных хендшейков. Он срабатывает практически всегда, но требует больших затрат (особенно времени). Перехват «рукопожатий» всегда выполняется в режиме мониторинга, который поддерживает далеко не каждый Wi-Fi-чип и драйвер. Для ускорения сбора хендшейков потребуется функция инжекта пакетов, которая деавторизует подключенных к AP клиентов и заставляет их чаще отправлять «рукопожатия». Она и вовсе встречается у единичных Wi-Fi-модулей.

6.3 Атака получения доступа

6.4 Принудительная смена алгоритма шифрования

6.5 Атаки человека посередине

6.6 Атаки подмены ARP записей

7 Способы защиты от атак на Wi-Fi сети

7.1 Идентификация устройства, атакующего на отказ в обслуживании

спользовать специальные технологии для идентификации типа устройства, создающего помехи и определения его физического местоположения в зоне покрытия. Например, это может быть выполнено с большой эффективностью в случае, если сеть построена на оборудовании Cisco Systems и Точки Доступа WiFi поддерживают технологию CleanAir (модельные ряды Cisco 3700, 3600, 2700, 1550 и тд). После обнаружения местоположения излучателя, в данную точку могут быть направлены сотрудники службы безопасности для физического устранения проблемы.

7.2 Секретность на уровне проводной сети (WEP)

7.2.1 WEPCrack

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Линь Лай Тхи, Дык Буй Минь, Хуи Нгуен Нгок, Чыонг Нгуен Динь, Хю Нгуен Ба, Хыонг Лыу Чан Сетевая модель OSI // Научные исследования. 2017. №1 (12). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/setevaya-model-osi (дата обращения: 29.10.2024).
2. Сложно о простом. Физический уровень (L1) модели OSI https://habr.com/ru/companies/timeweb/articles/825344/
3. Степанов Н. С. Волны // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: https://bigenc.ru/c/volny-11a6a9/?v=10134364. – Дата публикации: 16.01.2024. – Дата обновления: 29.03.2024
4. Булыгин В. С. Уравнения Максвелла // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: https://bigenc.ru/c/uravneniia-maksvella-b11784/?v=5913356. – Дата публикации: 10.01.2023
5. Булыгин В. С. Электромагнитные волны // Большая российская энциклопедия: научно-образовательный портал – URL: https://bigenc.ru/c/elektromagnitnye-volny-22ae4f/?v=5933210. – Дата публикации: 13.01.2023
6. Иванов В. К. Физика. Электромагнитные волны: учеб. пособие / В.К.Иванов – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023 – 208 с.
7. ГОСТ 17657-79
8. Сахно Л.В. Математический анализ. Третья часть (направление «программная инженерия») / Электронный курс лекций, 2015, 146 стр. course.sgu.ru/course/view.php?id=723
9. Как работает Wi-Fi. Часть 2. Физический уровень [Электронный ресурс] // Хабр. — 2022. — URL: https://habr.com/ru/companies/timeweb/articles/677452/