# ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АБОНЕНТОВ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ПОТЕРЬ СОЕДИНЕНИЙ В СЕТЯХ С СИГНАЛАМИ OFDM

***А.О. Шорин,*** *технический директор ООО «НСТТ», as@nxtt.org*

***УДК 621.391***

***Аннотация.*** Рассматривается связь между интенсивностью потерь соединений в сетях подвижной связи с OFDM и скоростью движения абонентов. Показано, что наиболее высокой чувствительностью к движению абонентов обладают линии со сложными видами модуляции (QAM64). Установлено, что для простых видов модуляции (QPSK) воздействие от перемещений абонентов на интенсивность потерь соединений сильного влияния не оказывает. Для сети McWILL показано, что в диапазонах 300-400 МГц допустимым является перемещение абонентов вплоть до скоростей 100 м/с. Интенсивность потерь соединений при этом заметно не изменяется. Для базовой конфигурации LTE 2600 МГц установлено, что скорости абонентов выше 30 м/с приводят к недопустимо высокому росту интенсивности потерь соединений.

***Ключевые слова:*** OFDM, интенсивность потока, скорость движения, марковский процесс, обрыв соединения.

# INFLUENCE OF VELOCITY OF MOVEMENT OF SUBSCRIBERS ON INTENSITY OF LOSS OF CONNECTIONS IN NETWORKS WITH SIGNALS OFDM

***Alexander Shorin,*** *technical director of LLC «NXTT»*

**Annotation.** The relationship between the intensity of connection loss in mobile communication networks with OFDM and the speed of subscribers' traffic is considered. It is shown that lines with complex modulation types (QAM64) have the highest sensitivity to subscriber traffic. It has been established that for simple types of modulation (QPSK), the impact of user movements on the intensity of connection loss has no strong effect. For the McWILL network it is shown that in the 300-400 MHz bands it is permissible to move subscribers up to speeds of 100 m / s. The intensity of losses of the compounds does not change appreciably. For a basic configuration of LTE 2600 MHz, it is established that subscriber speeds of more than 30 m/s lead to an unacceptably high growth in connection loss rates.

**Keywords**: OFDM, flow intensity, speed of movement, Markov process, Drop Call Rate.

## Введение

Процент обрывов пользовательских соединений (Drop Call Rate) входит в множество ключевых показателей качества, используемых для описания работы сети мобильной связи. Он непосредственно связан с интенсивностью потока обрывов и может непосредственно сказываться на качестве услуг связи [1, 2], а через качество и на инвестиционные и рыночные показатели [3-5] телекоммуникационных компаний. Представляет особый интерес установить, как именно на этот ключевой показатель могут влиять другие физические характеристики, связанные с условиями работы в сети. Одной из таких характеристик является скорость движения абонентов. Результаты работ [6-8] указывают на то, что ее влияние на обрывы может быть существенным. Также это подтверждают и данные драйв-тестов, проводимые операторами сотовых сетей. На текущий момент даже установилось правило ограничения скорости движения до 50-60 км/час при проведении драйв-тестов, чтобы избежать заметных искажений результатов. Конкретно это относится и к возможности завышения показателя уровня обрывов.

Попытка обойти проблему за счет увеличения уровня трансляции не приводит к успеху, так как при этом нарушаются условия ЭМС [9-11] и условия распределения радиочастотного спектра [12-14].

Поэтому назрела насущная потребность в выявлении аналитической зависимости, устанавливающей связь между интенсивностью потока обрывов соединений и скоростью движения, чтобы иметь возможность определять допустимые условия работы сети с одной стороны, и иметь возможность коррекции результатов драйв-тестов с учетом скорости – с другой. Важно установить, какие дополнительные параметры могут влиять на указанную связь, и, как следствие, определить, какими способами можно избежать негативного воздействия высоких скоростей перемещения на интенсивность обрывов.

**Формулировка задачи в обобщающей форме**

Установить связь интенсивности потока потерь соединений с уровнем сигнала на приеме позволяет методика, предложенная в [15]. Она основана на аналитическом соотношении для вероятности выбросов стационарного марковского процесса за порог. В указанное соотношение, как аргумент, входит стационарная плотность распределения марковского процесса, которая бы наблюдалась при отсутствии порога:

$$\frac{1}{\lambda_0} = \frac{2}{K}\int_{x_1}^{b} \frac{dx'}{w_{ст}(x')}, \qquad (1)$$

где:

$\lambda_0$ – параметр, задающий вероятность выброса за порог $x_1$ марковского процесса x(t); $w_{ст}(x')$ – стационарное распределение марковского процесса x(t);

*K* – коэффициент диффузии марковского процесса x(t);

*b* – точка в области аргумента с наибольшими значениями $w_{ст}(x')$, обычно в качестве таковой выбирают позицию моды. В (1) использованы обозначения, принятые в [15].

Проведем анализ входящих в (1) параметров на предмет их зависимости от характеристик, описывающих движение абонентов и работу линий связи мобильных сетей.

В сетях мобильной связи обрыв соединения происходит при возникновении замираний, приводящих к провалу уровня принимаемого сигнала ниже критического порога:

$$P_s < H^2 \cdot P_{N+I},$$

где:

$P_s$ – уровень принимаемого полезного сигнала;

$P_{N+I}$ – уровень шума и помех;

H – пороговое значение амплитуды, ниже которого организовать прием сигнала нельзя.

Характеристики современных приемных систем с исправлением ошибок отличаются тем, что полная деградация происходит, практически, одномоментно при переходе точки критического уровня, задаваемой порогом H. Указанный уровень жестко связан с видом модуляции (QPSK, QAM16, QAM64 – для сетей 4G) и информационной скоростью кодеков, исправляющих ошибки (наиболее распространены скорости R=1/4, 1/3, ½, ¾, 1). Замирания сигнала, обычно, считают подчиняющимися логнормальному или обобщенному релеевскому (хи-2 распределение) законам [16]. Именно на них будем ориентироваться при расчете интенсивности по (1). Поэтому в качестве стационарного распределения далее рассматриваются:

$w_{ст}(x) = \frac{x^{2N_L-1}(2N_L-1)^{2N_L}}{2^{N_L-1}(N_L-1)!}\exp\left(-\frac{2N_L-1}{2}x^2\right)$ – Релеевский, с $N_L$ – лучами;

$w_{ст}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{dB}}\exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_{dB}^2}\right)$ – логнормальный, с сигмой замираний $\sigma_{dB}$.

В приведенных законах произведена нормировка так, чтобы аргумент моды равнялся 1. То есть, наиболее вероятный уровень сигнала принят за единичный. Нужно заметить, что в

случае релеевских замираний, закон связан с амплитудой сигнала, а в логнормальном - описывает поведение уровня сигнала в логарифмическом представлении через шкалу децибелов.

Выбирая коэффициенты сноса и диффузии так, чтобы стационарное распределение, являющееся решением уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова [15], совпадало с записанными законами, получаем выражения для коэффициента диффузии K, значение которого нужно иметь для использования в (1).

$$K = \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \frac{1}{2N_L - 1},$$

$$K = \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \sigma_{\text{dB}}^2,$$

где:

$\tau_{\text{cor}}$ – время корреляции замираний. Так как нас интересуют замирания, которые приводят к потере соединений, то интервал корреляции их должен превосходить время счетчика контроля, которое, обычно, устанавливается в сети в пределах 5-10 сек. То есть, правомерно ориентироваться на $\tau_{\text{cor}}$=10 сек.

**Решение задачи и результаты**

Теперь есть необходимые данные для решения поставленной задачи.

При расчете интенсивности потока потерь соединений нужно вместо x1 в (1) подставить некоторое достаточно малое пороговое значение H (обозначение выбрано в соответствии с принятым для порога). После того, как получим искомые соотношения, установим, как указанное значение порога зависит от типа модуляции, информационной скорости кодирования R и от скорости движения абонента. Это позволит нам выявить связь между интенсивностью потока потерь соединений и скоростью движения.

Подставляем записанные законы распределения в (1) и используем найденные соотношения для коэффициента диффузии. В результате преобразований находим выражения для интенсивности обрывов $\omega$:

$$\omega(\mathrm{H}) = \frac{2}{\tau_{\text{cor}}} \begin{cases} \left[ E_i\left(\frac{1}{2}\right) - E_i\left(\frac{\mathrm{H}^2}{2}\right) \right]^{-1}, & \text{для } N_L=1, \\ \left[ \begin{array}{l} E_i\left(N_L - \frac{1}{2}\right) - E_i\left(\mathrm{H}^2\left(N_L - \frac{1}{2}\right)\right) + \\ + \frac{e^{\mathrm{H}^2\left(N_L-\frac{1}{2}\right)}}{\mathrm{H}^2\left(N_L-\frac{1}{2}\right)} \left( \frac{(N_L-2)!}{\left(\mathrm{H}^2\left(N_L-\frac{1}{2}\right)\right)^{N_L-2}} + \frac{(N_L-3)!}{\left(\mathrm{H}^2\left(N_L-\frac{1}{2}\right)\right)^{N_L-3}} + \cdots + 1 \right) - \\ - \frac{e^{\left(N_L-\frac{1}{2}\right)}}{\left(N_L-\frac{1}{2}\right)} \left( \frac{(N_L-2)!}{\left(N_L-\frac{1}{2}\right)^{N_L-2}} + \frac{(N_L-3)!}{\left(N_L-\frac{1}{2}\right)^{N_L-3}} + \cdots + 1 \right) \end{array} \right]^{-1}, & \text{для } N_L>1, \end{cases}$$

где:

$E_i(u) = \int_{-\infty}^{u} \frac{e^t}{t}\, dt$ – интегральная показательная функция, понимаемая в смысле главного значения для u> 0.

$$\omega(\mathrm{H}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\tau_{\text{cor}}}\left[\int_0^{\mathrm{H}^*} e^{z^2/2} dz\right]^{-1} = \frac{\mathrm{H}^* e^{-\frac{\mathrm{H}^{*2}}{2}}}{\sqrt{2\pi}\tau_{\text{cor}}}\left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2n)!}{2^{2n}(n!)^2\left(\frac{\mathrm{H}^{*2}}{2}\right)^n} \Gamma\left(n+1, \frac{\mathrm{H}^{*2}}{2}\right)\right]^{-1},$$

где: $\mathrm{H}^* = -\frac{20\lg(\mathrm{H})}{\sigma_{\text{dB}}}$, $\Gamma(n,u) = \int_0^u e^{-t} t^{n-1} dt$ – нижняя неполная гамма-функция.

Используем разложение интегральной показательной функции:

$E_i(u) = \gamma + \ln(|u|) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{u^n}{n \cdot n!}$, где $\gamma \approx 0{,}57721566$ – постоянная Эйлера. Тогда, в предположении относительно малых значений H, можно получить упрощенные формулы расчета интенсивности потока обрывов соединений для релеевских замираний.

а) $N_L = 1, \omega(\mathrm{H}) \approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}}\left[-2\ln \mathrm{H} + 0.570151 - \frac{1}{2}\mathrm{H}^2\right]^{-1}$.

б) $N_L = 2, \omega(\mathrm{H}) \approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}}\left[\frac{2}{3}\frac{1}{\mathrm{H}^2} - 2\ln \mathrm{H} + 0.330812 - \frac{3}{4}\mathrm{H}^2\right]^{-1}$.

в) $N_L = 3, \omega(\mathrm{H}) \approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}}\left[\frac{2^2}{5^2}\frac{1}{\mathrm{H}^4} + \frac{2^2}{5}\frac{1}{\mathrm{H}^2} - 2\ln \mathrm{H} + 0.258063 - \frac{5}{6}\mathrm{H}^2\right]^{-1}$. (2)

г) $N_L = 4, \omega(\mathrm{H}) \approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}}\left[\frac{2^4}{7^3}\frac{1}{\mathrm{H}^6} + \frac{2^2 3}{7^2}\frac{1}{\mathrm{H}^4} + \frac{2\cdot 3}{7}\frac{1}{\mathrm{H}^2} - 2\ln \mathrm{H} + 0.219105 - \frac{7}{8}\mathrm{H}^2\right]^{-1}$.

д) $N_L = 5, \omega(\mathrm{H}) \approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}}\left[\frac{2^5}{3^7}\frac{1}{\mathrm{H}^8} + \frac{2^6}{3^9}\frac{1}{\mathrm{H}^6} + \frac{2^3}{3^5}\frac{1}{\mathrm{H}^4} + \frac{2^3}{3^2}\frac{1}{\mathrm{H}^2} - 2\ln \mathrm{H} + 0.193832 - \frac{9}{10}\mathrm{H}^2\right]^{-1}$.

е) $N_L = 6, \omega(\mathrm{H}) \approx \frac{2}{\tau_{\text{cor}}}\left[\frac{2^8 3}{11^5}\frac{1}{\mathrm{H}^{10}} + \frac{2^5 3\cdot 5}{11^4}\frac{1}{\mathrm{H}^8} + \frac{2^5 5}{11^3}\frac{1}{\mathrm{H}^6} + \frac{2^3 5}{11^2}\frac{1}{\mathrm{H}^4} + \frac{2\cdot 5}{11}\frac{1}{\mathrm{H}^2} - 2\ln \mathrm{H} + 0.175717 - \frac{11}{12}\mathrm{H}^2\right]^{-1}$.

Для логнормальных замираний соответствующее выражение интенсивности потока выхода под порог хорошо аппроксимирует соотношение:

$$\omega(\mathrm{H}) = \frac{e^{-\frac{\mathrm{H}^{*2}}{2}}}{\sqrt{2\pi}\tau_{\text{cor}}}\left(\mathrm{H}^* + \frac{1}{\mathrm{H}^*}\right), \quad (3)$$

где:

$$\mathrm{H}^* = -\frac{20\lg(\mathrm{H})}{\sigma_{\text{dB}}}.$$

Полученные соотношения (2), (3) задают интенсивность потока событий, связанных с уходом замирающего сигнала под пороговый уровень $\mathrm{H}^2$. Чтобы получить решение поставленной задачи остается только определить, каким является указанный порог, как он зависит от типа модуляции и ошибок синхронизации по частоте, возникающих при движении абонента.

Как уже отмечалось, современные системы цифровой обработки сигналов используют коды с исправлением ошибок, которые обеспечивают на выходе практически полностью очищенный от ошибок сигнал (с точки зрения удовлетворительной работы приложений), если на их входе вероятность ошибки на бит (BER) не превосходит 1/30-1/20. Как только ошибки начинают незначительно превышать указанный уровень, происходит полное нарушение работы линии связи. С точки зрения работы демодулятора, вероятность ошибки на бит порядка

1/25 возникает при уровне $\sigma$ шума, равном 0,5/1,7507 $\approx 1/2\sqrt{3}$ от расстояния между соседними точками амплитудно-фазового созвездия. Что в пересчете к среднему уровню полезного сигнала дает:

QPSK: $P_N = \frac{1}{6} P_S = \frac{1}{6}$.

QAM16: $P_N = \frac{1}{30} P_S = \frac{1}{30}$.

QAM64: $P_N = \frac{1}{126} P_S = \frac{1}{126}$.

Здесь мы воспользовались тем, что была принята система представления, в которой уровень полезного сигнала равнялся единице ( $P_S = 1$).

Системы связи в линиях используют комбинированные кодеки, в которых, перед кодом, исправляющим ошибки, используют сверточное кодирование. Работа сверточного кодека приводит к эффективному повышению сигнал/шум, которое в первом приближении можно оценить через 1/R, где R – информационная скорость сверточного кода. С учетом этого, получаем пороговые уровни замирающего сигнала, при которых начинает пропадать связь:

QPSK: $H^2 = 6 P_N R$,

QAM16: $H^2 = 30 P_N R$, (4)

QAM64: $H^2 = 126 P_N R$.

Соотношения (4) определяют, как рассчитывать порог H по уровню шума $P_N$. А так как мы используем представление с $P_S$=1, то вместо $P_N$ можно использовать $P_N$=1/z, где $z = \frac{P_S}{\sigma_{Ш}^2}$ – отношение сигнал/шум на входе демодулятора при отсутствии замираний и точной частотной синхронизации.

С учетом этого (4) можно записать в виде:

$$H^2 = \frac{Q_{mod}}{z} R, \quad (5)$$

где:

$Q_{mod}$ – коэффициент, связанный с используемой модуляцией. Он равен 6 для QPSK, 30 для QAM16 и 126 для QAM64.

При ошибках синхронизации по частоте в сетях связи с сигналами OFDM к шумам будет добавляться помеха с уровнем [20]

$P_S \rho_v$,

где:

$$\rho_v = \left(1 - \frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{(\pi\varepsilon)^2}\right) \Big/ \left(\frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{(\pi\varepsilon)^2}\right) \approx 1 - \frac{\sin^2(\pi\varepsilon)}{(\pi\varepsilon)^2},$$

$\varepsilon = \frac{\delta f}{\Delta f} = \frac{f_0 \frac{2v}{c}}{\Delta f}$ – ошибка синхронизации по частоте, возникающая по причине движения абонента, $f_0$ – несущая частота, $\Delta f$ – разнос поднесущих в OFDM, $c$ – скорость света, $v$– величина компоненты скорости перемещения абонента в направлении на БС.

С учетом этой добавки, уравнение для порога примет вид:

$$H^2 = Q_{mod} R \left(\frac{1}{z} + H^2 \rho_v\right)$$

Откуда находим:

$$H^2 = \frac{1}{1 - Q_{mod} R \rho_v} \frac{Q_{mod}}{z} R. \quad (6)$$

Сравнение (6) с (5) показывает, что ошибки синхронизации по частоте, возникающие при движении абонента, приводят в сетях с OFDM сигналами к эффективному увеличению нижнего порога замираний, определяющего возникновение обрывов связи, в $\left(1-\mathrm{Q}_{\mathrm{mod}}\mathrm{R}\rho_{v}\right)^{-1}$ раз.

**Анализ результатов**

Полученные соотношения (2), (3) и (6) позволяют рассчитывать интенсивность потока потерь соединений в условиях замираний полезного сигнала с учетом технологических параметров работы линии связи, закона замираний и скорости движения абонентов.

На рис. 1 и 2 для примера приведены зависимости интенсивности потока обрывов соединений от уровня $\frac{\mathrm{P_S}}{\sigma_{\mathrm{Ш}}^2}$ на входе демодулятора, рассчитанные по полученным формулам в условиях работы на частоте 1792,5 МГц (центр защитной полосы диапазона 1800 МГц (Band3 по рекомендации 3GPPTS 136.104)). Рассмотрены случаи применения различных видов модуляции и различные скорости движения абонентов.

На рис. 1 показаны зависимости, полученные для обобщенных релеевских замираний с тремя лучами, а на рис. 2, для логнормальных, со среднеквадратической глубиной 5 дБ.

Как видно, модуляция QPSK отличается высокой устойчивостью к движению. Только начиная со скоростей 100 м/с (авиационные) наблюдается заметное повышение интенсивности потерь, которое можно выразить через эффективное уменьшение сигнал/шум на 2,5 дБ. Модуляция QAM16 проявляет большую чувствительность к движениям абонентов. На скоростях 100 м/с организовать связь с данной модуляцией нельзя. Потери в представлении эффективного уменьшения сигнал/шум заметны на скорости 50 м/с и составляют 2,5 дБ. Самую высокую чувствительность к перемещению абонентов демонстрирует модуляция QAM64.

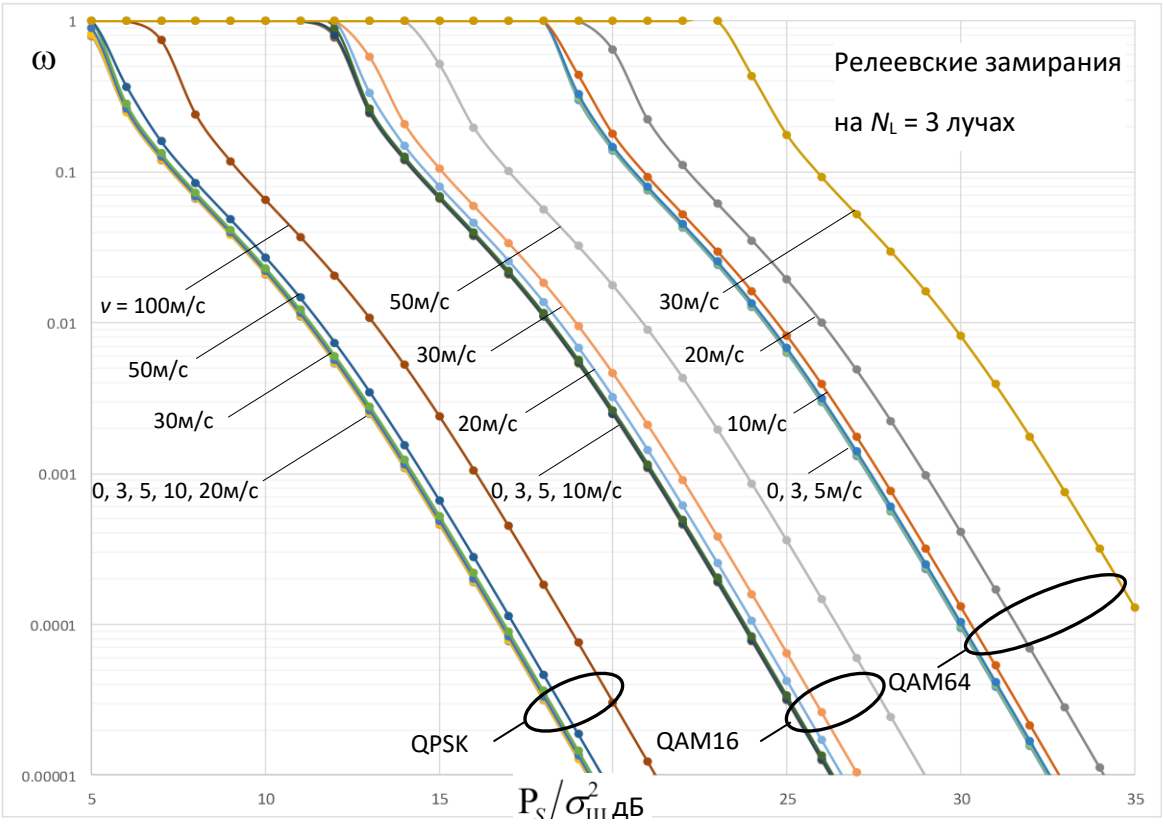


Рисунок 1.

Для нее нельзя организовать связь при скоростях выше 35 м/с. Это соответствует опыту эксплуатации сетей LTE в поездах САПСАН, который показал, что, начиная со скоростей 120-130 км/час, высокоскоростная связь в линиях не поддерживается. Для модуляции QAM64 даже при скоростях 30 м/с, увеличение интенсивности потока потерь становится существенным. В представлении снижения эффективного отношения сигнал/шум они составляют 4 дБ. Добиться качественного улучшения ситуации в данном вопросе можно, если применить усовершенствованные методы обработки. Так в [17, 18] предлагается техника адаптивной обработки и схема эквалайзера OFDM сигналов, позволяющая поднять порог допустимых скоростей движения абонентов в 2,0-2,5 раза. В [19-20] предложен режим активного управления числом логических каналов режима MIMO, который позволяет заметно снизить уровень негативного влияния замираний. Для той же цели могут использоваться техника адаптивных антенных решеток и методы управления размером ресурсного блока OFDM сигнала [21-22].

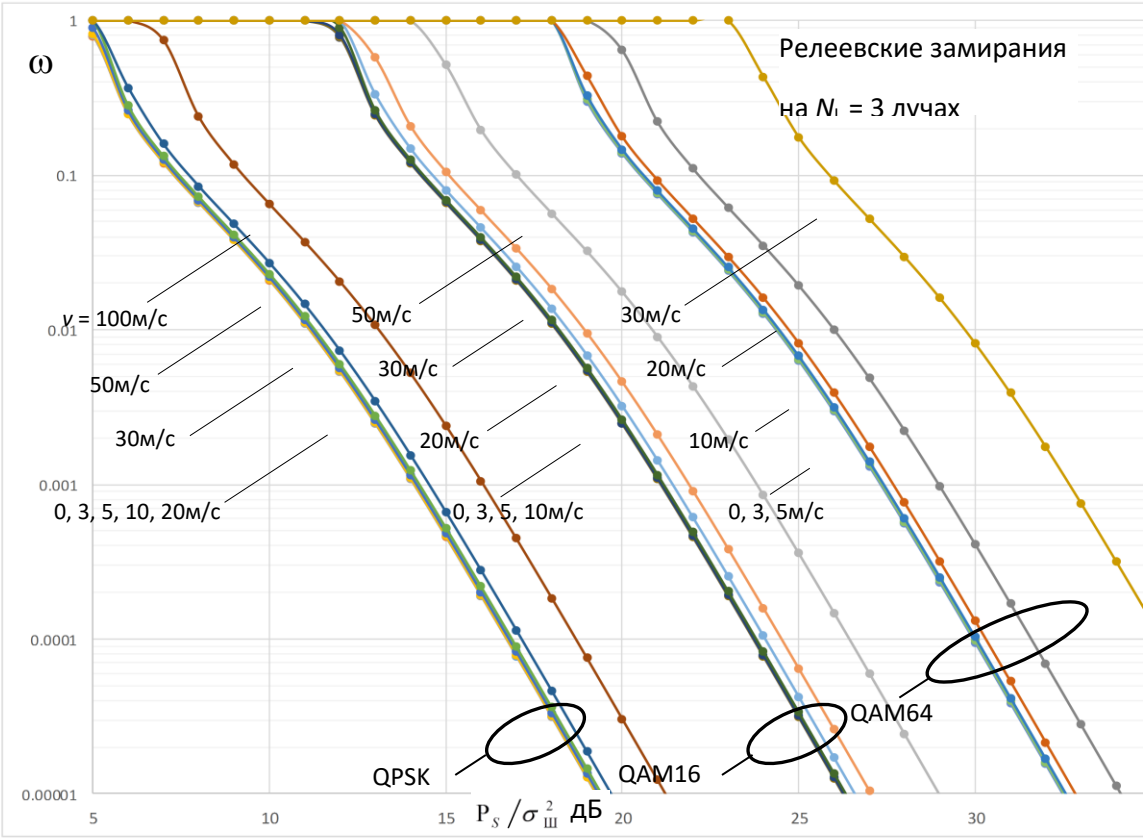


Рисунок 2.

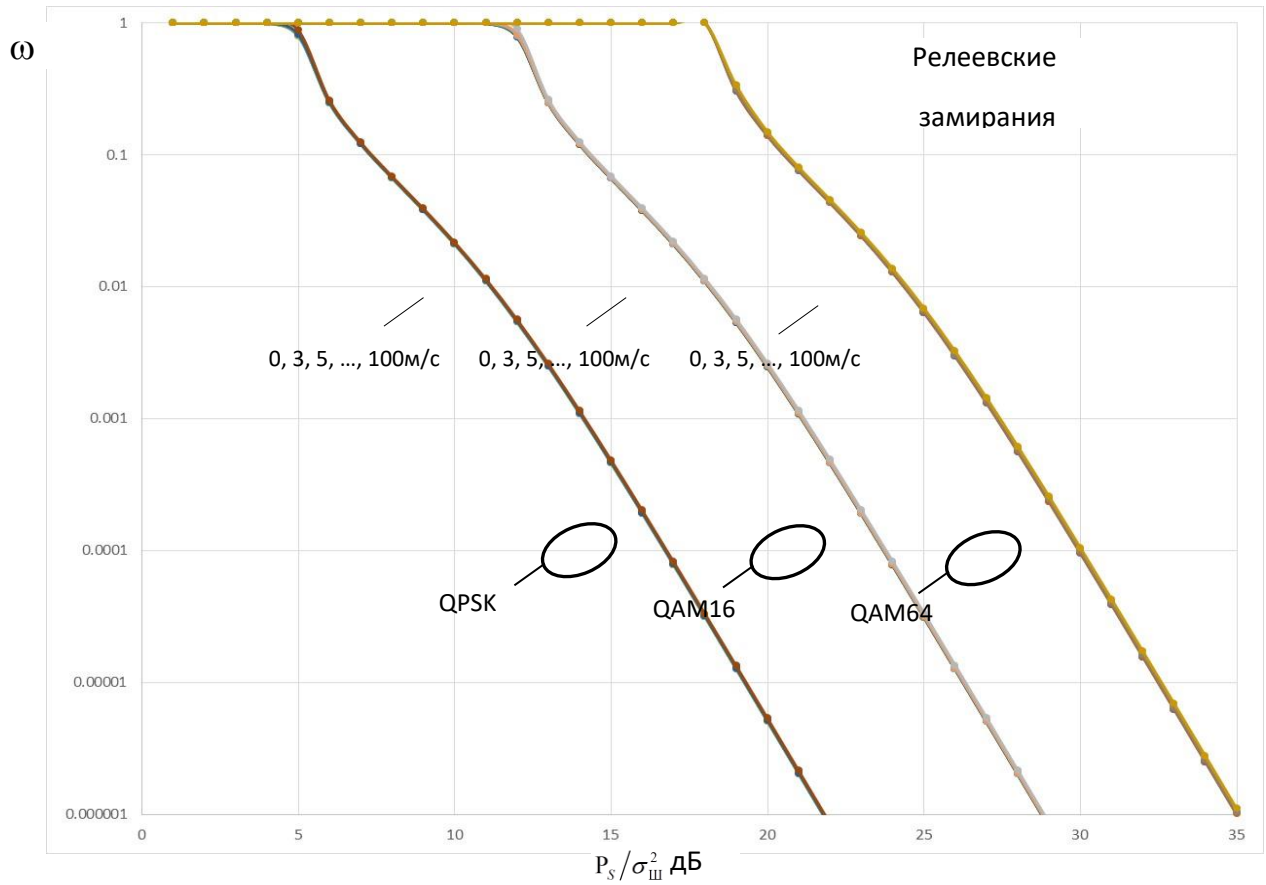


Рисунок 3.

В более низких частотных диапазонах, например, 300 МГц-400 МГц, являющихся базовыми для стандарта McWILL, негативное влияние движения заметно снижается. На рис. 3 показаны результаты расчета зависимости интенсивности обрывов от уровня сигнал/шум для работы на несущей 339 МГц. Результаты показывают практическое отсутствие зависимости от скоростей движения абонентов до 100 м/с. А в диапазоне 2600 МГц, базовом для LTE, влияние движения абонентов будет даже выше, чем представленное на рис. 1, 2.

**Выводы**

Получены аналитические выражения, устанавливающие связь между интенсивностью потока потерь соединений в сетях мобильной связи с сигналами OFDM и скоростью движения абонентов. Установлено, что самой высокой степени деградации подвержены линии со сложными видами модуляции (QAM64). Для простых видов модуляции (например, QPSK) влияние движения остается умеренным. Показано, что сети LTE не способны поддерживать линии связи с модуляцией QAM64 при скоростях движений абонентов более 30 м/с в диапазонах выше 1800 МГц.

Также установлено, что в диапазонах 300-400 МГц, являющихся базовыми для сетей McWILL, движение абонентов до скоростей 100 м/с на интенсивности обрывов соединений заметно не сказывается.

**Литература**

1. Володина Е.Е., Тихвинский В.О. Конкуренция и качество услуг на рынке подвижной связи // Мобильные системы, 2003. – № 8. – С. 31.

2. Бутенко В.В., Володина Е.Е., Девяткин Е.Е., Бессилии А.В., Суходольская Т.А. Концепция WAPECS как современное направление использования РЧС // Электросвязь, 2008. – № 9. – С. 1-7.
3. Салютина Т.Ю., Рабовская Л.С. Методические подходы к оценке инвестиционной привлекательности телекоммуникационной компании // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2009. – № 3. – С. 34-38.
4. Володина Е.Е., Бессилин А.В. Методические вопросы определения платы за использование радиочастотного спектра // Вестник РАЕН, 2009. – № 2. – С. 28.
5. Салютина Т.Ю. Понятие, сущность рыночного потенциала и проблемы оценки рыночного потенциала операторов связи // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2009. – № 3. – С. 41-45.
6. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, – 2011.
7. Luca Rugini, Paolo Banelli. Banded Equalizers for MIMO-OFDM in Fast Time-Varying Channels// 14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006), Florence, Italy, September 4-8, 2006, copyright by EURASIP.
8. Шорин О. А. Методы оптимального распределения частотно-временного ресурса в системах подвижной радиосвязи // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МТУСИ, 2005. – 263 с.
9. Шорин О.А., Бокк Г.О. Анализ электромагнитной совместимости стандартов четвертого поколения // Первая миля, 2016. – № 1 (54). – С. 44-53.
10. Шорин О.А., Бокк Г.О. К вопросу об электромагнитной совместимости стандартов четвертого поколения // Экономика и качество систем связи, 2016. – № 2. – С. 51-59.
11. Шорин О.А., Бокк Г.О. Особенности планирования сети McWILL с учетом электромагнитной совместимости с сетями LTE в смежных диапазонах частот // Электросвязь, 2017. – № 2. – С. 46-51.
12. Володина Е.Е., Плосский А.Ю. Критерии кластерного подхода к перераспределению радиочастотного спектра при внедрении цифрового телевидения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2012. – Т. 6. – № 12. – С. 4-6.
13. Веерпалу В.Э., Володина Е.Е., Девяткин Е.Е. Управление использованием радиочастотного спектра. Конверсия и экономика. Монография. – М., 2011. – 184 с.
14. Volodina E., Plossky A. Features of the Digital Dividend Implementation in Conditions of Great Population Density Discontinuity and Limitation of the Frequency Resource // Proceedings of EMC Europe 2011 York – 10th International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – 2011. – С. 664-669.
15. Стратонович Р.Л. Избранные вопросы теории флюктуаций в радиотехнике. – М.: Советское радио, 1961. – 558 с.
16. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б., Шлома А.М., Шумов А.П. Технология OFDM. – М.: Горячая линия - Телеком, 2016. – 352 с.
17. Аверьянов Р.С., Шорин А.О. Оценка оптимальных параметров OFDM-сигналов с учетом мобильности абонентов // Электросвязь, 2015. – № 12. – С. 60-65.
18. Шорин О.А., Бокк Г.О. Эквалайзер для коррекции мультидоплеровских искажений OFDM-сигналов в сетях LTE и McWILL // Электросвязь, 2017. – № 1. – С. 28-34.
19. Бокк Г.О. MIMO: Оптимизация управления числом логических каналов // в книге: Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом. Сборник материалов (тезисов) 38-ой международной конференции РАЕН. – Шри-Ланка, 2016. – С. 6.
20. Аверьянов Р.С., Бокк Г.О., Шорин А.О. Оптимизация размера кольцевой антенны и правила формирования территориальных кластеров для сотовой сети McWILL // Электросвязь, 2017. – № 1. – С. 22-27.

21. Бокк Г.О. Повышение эффективности работы систем связи на основе пространственно-временной обработки и спектрального анализа сигналов: Диссертация на соискание ученой степени д.т.н.: 05.12.17. – Москва, 2000. – 396 с.
22. Шорин О.А., Бокк Г.О., Аверьянов Р.С., Шорин А.О. Оптимизация геометрии адаптивной антенны для сотовой сети с OFDM сигналами // Экономика и качество систем связи, 2016. – № 2. – С. 60-67.